

EXT-2001-053
03/10/2001



IPNO 01-08

**Etude thermique
de la plaque de couplage à 6m
du RFQ d' IPHI.**

F. Launay, P. Balleyguier

Etude thermique de la plaque de couplage à 6m du RFQ d'IPHI.

François Launay *, Pascal Balleyguier.**

21 Septembre 2001

Résumé

Une étude thermique de la plaque de couplage et de la barre de stabilisation dipolaire associée (Figure 1) a été menée. Le but est de prévoir sur ces pièces les températures atteintes, les contraintes et les déformations attendues lors du fonctionnement nominal du RFQ d'IPHI.

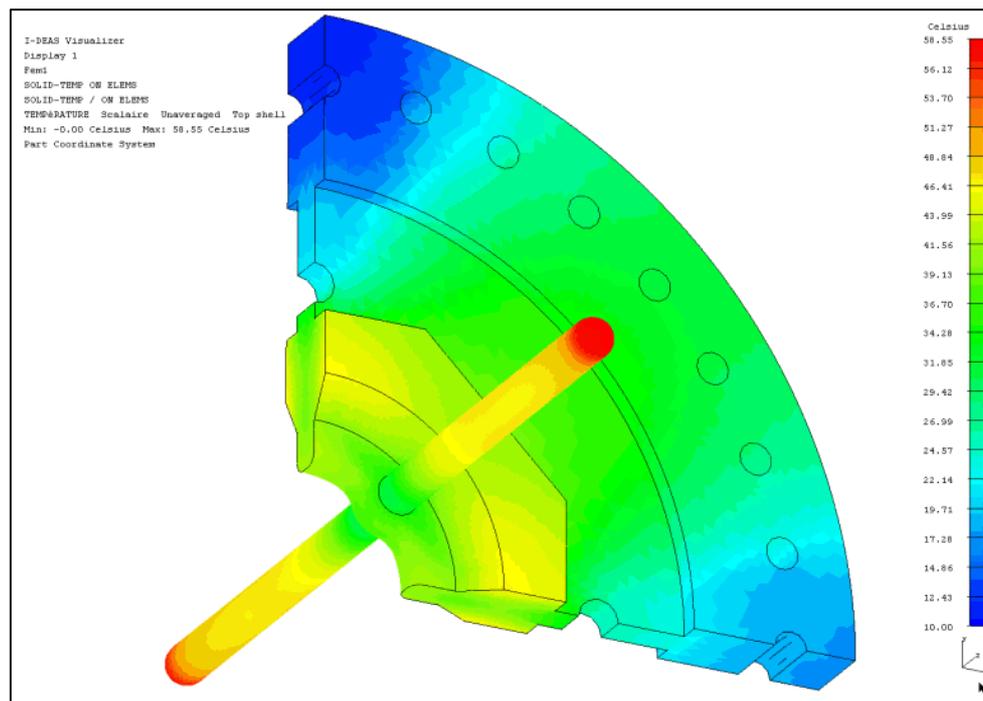


Figure 1. Températures atteintes sur la plaque de couplage :10 à 58°C.

* CNRS/IN2P3/IPNO/DA 91406 Orsay Cedex. (launayf@ipno.in2p3.fr)

** CEA/DIF/DPTA/SP2A 91680 Bruyères le Châtel BP12. (balleyg@bruyeres.cea.fr)

1. Introduction.....	4
2. Etude RF et transfert des dépôts de puissance.....	4
2.1 Principe du transfert de puissance.....	4
2.2 MAPFLUX: programme de transfert de puissance.....	5
2.3 Application à la plaque de couplage à 6m.....	6
3. Etude thermique.....	9
3.1 Généralités.....	9
3.2 Géométrie de départ (n°1).....	10
3.2.1. Résultats du calcul thermique.....	10
3.2.2 Résultats du calcul mécanique.....	12
3.2.3 Conclusion sur la géométrie de départ.....	16
3.3 Géométrie modifiée.....	16
3.3.1 Calcul thermique.....	17
3.3.2 Calcul mécanique.....	19
3.3.3 Commentaires.....	22
4. Conclusions.....	24
Remerciements.....	24
Références.....	24

1. Introduction.

Parmi les trois plaques de couplage, celle à 6 m est la plus sollicitée thermiquement. Cela résulte de la tension quadrupolaire du RFQ qui est plus élevée en cet endroit qu'au niveau des deux autres plaques de couplage. C'est pourquoi seule la plaque à 6 m a été étudiée.

Le point de départ est l'étude électromagnétique de cette extrémité de segment faite par une simulation MAFIA [1]. Ce code permet de calculer les dissipations de puissance produites par les courants de surface. Une amélioration que nous avons suggérée a permis d'obtenir des valeurs de dissipations restant réalistes dans le cas d'arêtes réentrantes [2]. Toutefois, ce nouvel algorithme générait des cartes de dissipation erronées dans les surfaces non parallèles aux axes de coordonnées. Plusieurs échanges avec la société CST (qui commercialise et maintient MAFIA) ont été nécessaires à l'obtention d'une version satisfaisante.

L'étude [1] montrait que les dissipations pouvaient parfois dépasser localement 200 W/cm^2 , valeur très supérieure à ce qui est généralement admis comme raisonnable. Il était donc indispensable, pour pouvoir faire des calculs thermiques fiables, de partir de puissance d'échauffements réaliste.

2. Etude RF et transfert des dépôts de puissance.

2.1 Principe du transfert de puissance.

Le premier problème à résoudre a été celui du transfert de puissance. En effet, les simulations thermomécaniques réalisées avec I-DEAS utilisent un maillage différent du maillage rectangulaire généré par MAFIA. Il fallait donc pouvoir transférer les données thermiques (dissipation de puissance sur la surface de la cavité) entre les deux codes. Vu la complexité de la géométrie, un transfert de donnée manuel introduit une grande part de subjectivité et de simplification. Un tel transfert manuel augmente naturellement les discontinuités (source de gradient thermique et donc de contraintes) et ne garantit pas facilement la conservation de la puissance globale.

La méthode utilisée pour transférer les données consiste, à partir du maillage final (généré par I-DEAS), à appliquer sur chaque élément un dépôt de puissance surfacique en W/m^2 interpolé à partir des points les plus proches du maillage MAFIA. Par rapport à une méthode consistant à projeter les points MAFIA sur le maillage I-DEAS, la méthode choisie a l'avantage d'être non ambiguë et de ne pas créer de rupture de densité. De plus, elle reste applicable même si le domaine MAFIA s'étend au-delà du domaine I-DEAS: les points MAFIA en dehors du domaine I-DEAS sont naturellement ignorés car trop éloignés.

En revanche, la méthode choisie ne garantit pas la conservation de la puissance globale. En effet, à cause du maillage rectangulaire de MAFIA, il est courant que certains points soient relativement éloignés de la surface I-DEAS, particulièrement en cas de coin arrondi. Si le maillage de MAFIA est trop dense par rapport au maillage I-DEAS, certains points MAFIA risquent de ne jamais être pris en compte dans l'interpolation (Figure 2). Si ces points correspondent à un angle réentrant où la dissipation est nettement plus importante, cela conduit à une sous estimation de la puissance totale.

Pour un transfert satisfaisant des données, il est donc nécessaire que le maillage MAFIA soit le plus près possible du domaine I-DEAS, et que sa résolution ne soit pas inférieure à celle du maillage I-DEAS. En conséquence, les arrondis de la surface réelle doivent être approchés au mieux, ce qui pose des problèmes en cas de formes complexes vues les limitations du mailleur de MAFIA.

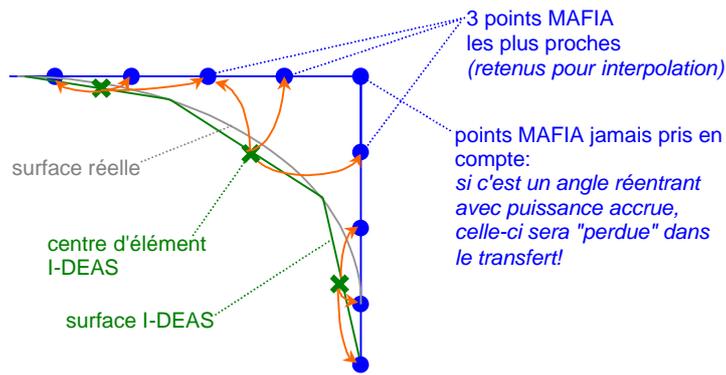


Figure 2. Un coin non arrondi par MAFIA, associé à un maillage trop serré par rapport au maillage I-DEAS, risque de conduire à une sous-estimation de la puissance totale.

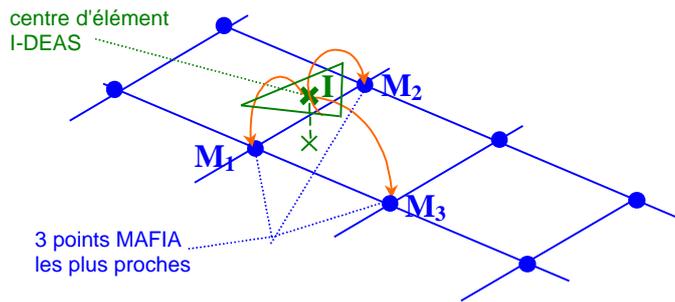
2.2 MAPFLUX: programme de transfert de puissance.

L'étape préalable au transfert consiste à faire écrire par MAFIA les données thermiques dans un fichier texte. Pour chaque point de son maillage 3D, on récupère les coordonnées du point et la puissance surfacique en W/m^2 . Mais le fichier ainsi généré est très volumineux, car tous les points du maillage 3D sont passés en revue, alors que seuls les points sur la surface sont utiles (les autres présentant des dissipations nulles). De plus, MAFIA génère un fichier découpé en pages avec une entête en début de chaque page. Un premier pré-traitement (par une procédure UNIX) est donc utilisé pour éliminer les points à dissipation nulle et les lignes d'entête, ce qui réduit la taille du fichier texte d'un facteur 25 environ. Une compression classique (commande UNIX "compress") permet de gagner encore un facteur 4. Dans le cas présenté ici, (maillage MAFIA de 200000 points), le fichier final de 150 kilo-octets peut aisément être transmis par le réseau (pour un fichier initial de 16 Mo).

Le programme réalisant le transfert a été sous-traité à la société "MAYA Heat Transfer Technology" sur un cahier des charges élaboré par les auteurs de cette note. Le produit logiciel résultant de cette fructueuse collaboration (programme MAPFLUX) donne des résultats jugés satisfaisants.

L'utilisation du programme MAPFLUX suppose qu'un maillage I-DEAS de la géométrie étudiée a été effectué. Cette géométrie peut ne contenir qu'une partie du domaine calculé par MAFIA. La première étape du programme MAPFLUX consiste à récupérer les données produites par MAFIA, à leur appliquer un traitement élémentaire: changement d'unités, coefficient, décalage d'origine, symétrie éventuelle.

Ensuite, MAPFLUX considère successivement chaque élément du maillage I-DEAS. Pour un élément donné, il cherche les n points du maillage MAFIA les plus proches du centre de l'élément. Le nombre n peut être choisi entre 2 et 10 (sur les exemples des figures 2 et 3, on a $n=3$). MAPFLUX applique une moyenne pondérée sur les dépôts de puissance surfaciques en ces points, les coefficients de pondération étant inversement proportionnels à la distance entre le centre de l'élément et les points MAFIA. La moyenne calculée est alors la dissipation de puissance affectée à l'élément considéré (Figure 3).



$$p(I) = \alpha_1 p(M_1) + \alpha_2 p(M_2) + \alpha_3 p(M_3),$$

$$\text{avec : } \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$$

$$\alpha_1 IM_1 = \alpha_2 IM_2 = \alpha_3 IM_3$$

Figure 3. Formule d'interpolation pour transfert de puissance

De plus, le programme MAPFLUX génère un fichier graphique permettant de contrôler visuellement le résultat du transfert. Enfin, il calcule la puissance intégrée dans l'ensemble du domaine I-DEAS, ce qui permet une vérification globale. Notons qu'il est possible de n'effectuer le transfert que sur un sous-ensemble du domaine I-DEAS, ce qui permet de calculer la puissance intégrée dans une zone spécifique.

2.3 Application à la plaque de couplage à 6m.

La plaque de couplage à 6m a été recalculée avec le nouvel algorithme de MAFIA débogué, et avec l'hémisphère en extrémité de barre. La dissipation en extrémité de barre est sans doute surestimée par le nouvel algorithme de MAFIA, car le maillage rectangulaire génère une arête fictive avec un dépôt de puissance accrue sur le périmètre de l'hémisphère. L'arrondi au niveau du trou central (et du "point chaud") a été approché par une marche afin que l'arête du maillage MAFIA soit suffisamment proche de la surface I-DEAS (Figure 4). Lors du transfert, la moyenne pondérée a été calculée sur 10 points ($n=10$), mais les essais ont montré que ce paramètre avait peu d'influence.

On constate (Figure 5) que les valeurs de puissance surfacique sont bien conservées dans la plus grande partie de la plaque de couplage. Le "point chaud" semble toutefois insuffisamment transféré: la puissance maximale est plus faible et moins étalée à l'arrivée, laissant craindre une perte notable de la puissance totale. Une intégration autour de ce point montre que la perte de puissance locale est d'environ un tiers. En tenant compte du fait que la surface du domaine MAFIA est surestimée dans cette zone (à cause des "marches d'escalier"), le transfert de puissance est jugé acceptable.

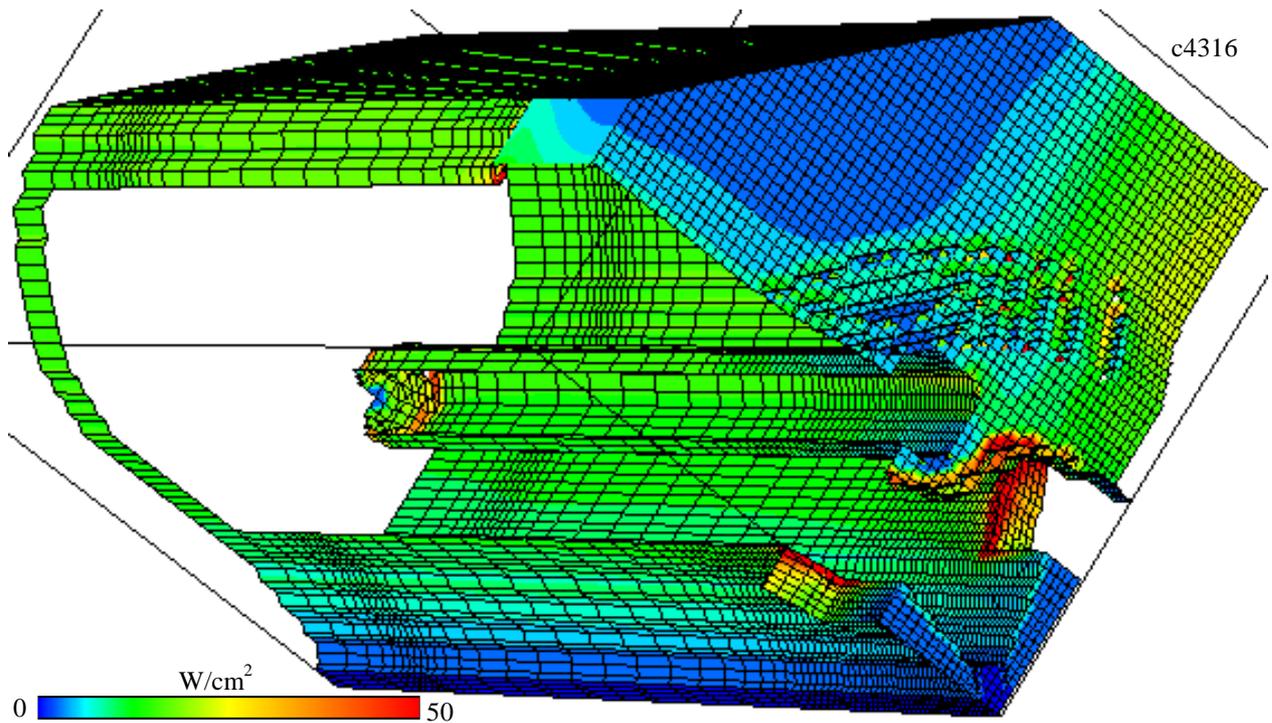


Figure 4. Dissipations de puissance en extrémité de segment à 6 m. La barre est terminée par un hémisphère. Le calcul est effectué avec le nouvel algorithme de MAFIA débogué.

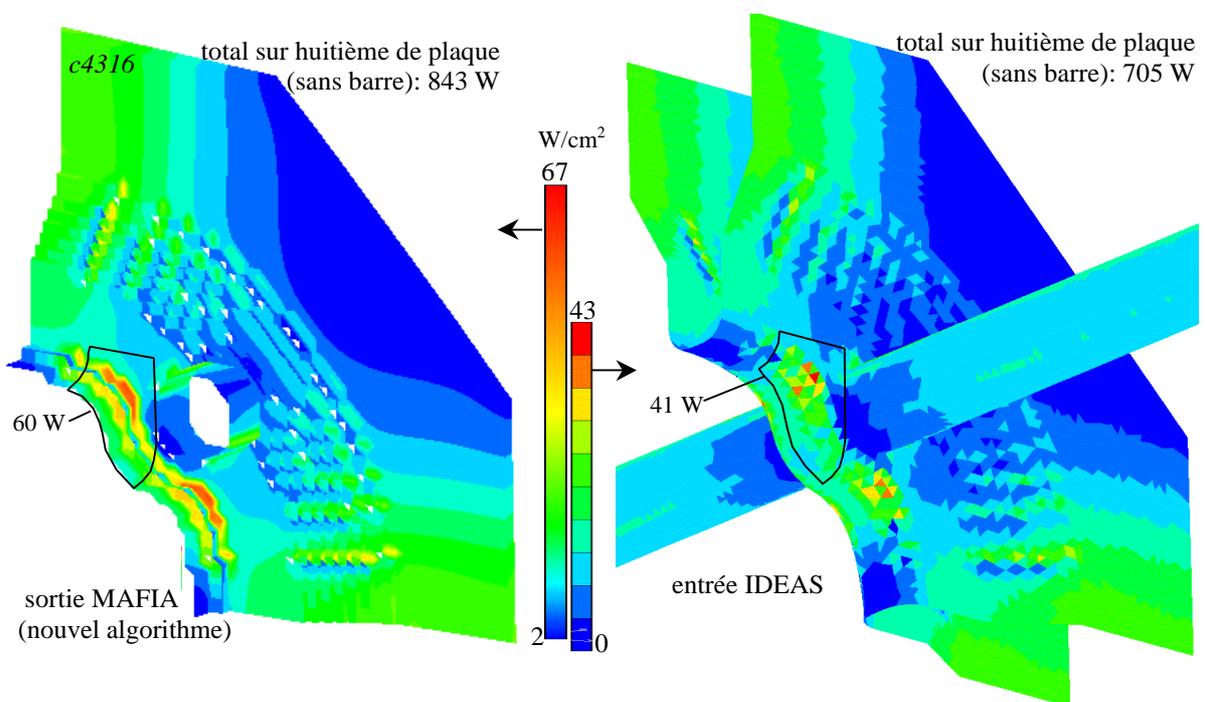


Figure 5. Transfert des dissipations par MAPFLUX : zoom sur la plaque.

Un bilan plus complet sur l'ensemble du domaine I-DEAS est donné sur le Tableau 1. On constate un bilan satisfaisant dans la barre et à son extrémité. Le bilan sur la plaque seule montre une perte de puissance d'environ 16%. A nouveau, on attribut cela à la surestimation de la surface de MAFIA dû au maillage rectangulaire, ce qui est cohérent avec l'inconvénient reconnu de MAFIA de sous-estimer les facteurs de qualité.

Tableau 1

Transfert de puissance dans un huitième de plaque de couplage avec barre.

	MAFIA	I-DEAS
"point chaud"	60 W	41 W
total plaque seule	843 W	705 W
milieu de barre	69 W/cm	66 W/cm
extrémité de barre (13 mm)	140 W	136 W
total barre	1121 W	1083
total barre+plaque	1964 W	1788 W

3. Etude thermique

3.1 Généralités.

Un quart de la plaque de couplage à 6m a été modélisé avec le logiciel I-DEAS. Le modèle comporte la bride en inox, la plaque de cuivre, les deux barres en cuivre, et le circuit de refroidissement voir Figure 6 et Figure 7.

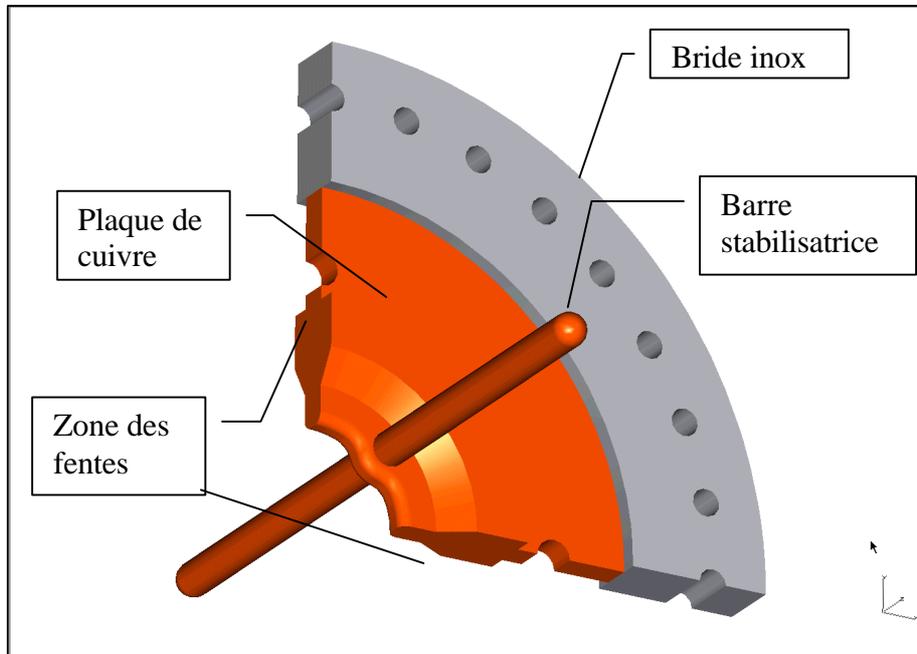


Figure 6. Modèle mécanique d'un quart de plaque. La plaque de cuivre est supposée fendue et constituée de quatre quarts maintenus ensemble par la bride.

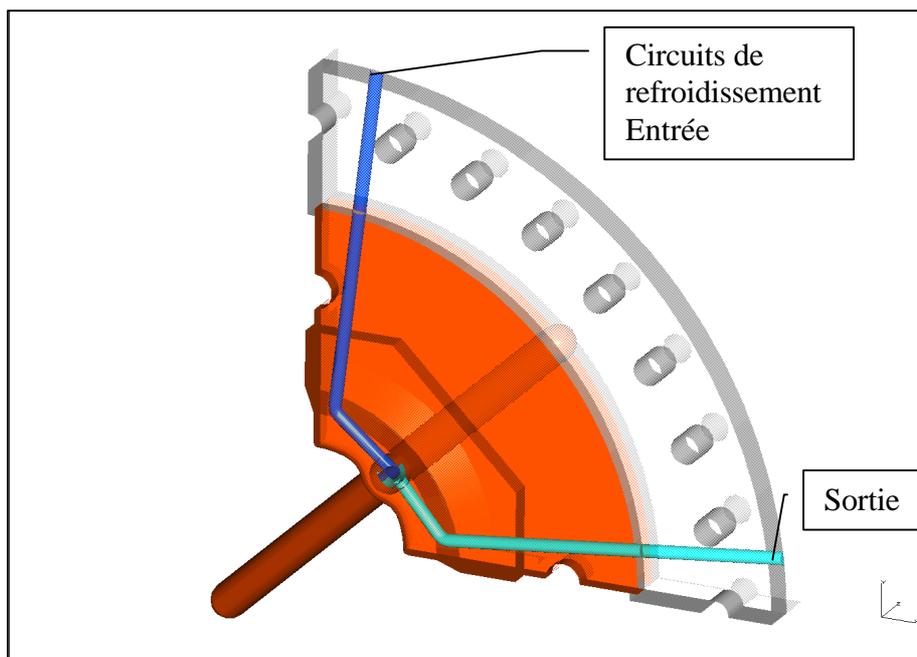


Figure 7. Circuit de refroidissement dans la plaque.

On identifie les surfaces exposées au flux de chaleur sur lesquelles le programme MAPFLUX transférera des densités de puissance surfacique issues de MAFIA. On impose ensuite une vitesse et une température à l'entrée du circuit de refroidissement, un calcul couplé thermique-fluidique donne les températures dans le modèle. Ces températures, accompagnées des blocages nécessaires constituent les conditions aux limites pour effectuer un calcul de mécanique linéaire. Les résultats donnent les déplacements et les contraintes dans la plaque de couplage.

Deux plaques ont été modélisées avec deux circuits de refroidissement différents.

3.2 Géométrie de départ (n°1).

Ce modèle comporte environ 190000 éléments. Le transfert avec Mapflux du fichier c4316 de Mafia dans le modèle Ideas avec 10 points d'interpolation donne une puissance intégrée de 3577 W (pour deux huitièmes de plaque, du fait de la symmétrie). Les densités de puissance surfaciques s'étendent de $5.24 \cdot 10^2$ à $4.2 \cdot 10^5$ W/m², voir Figure 8.

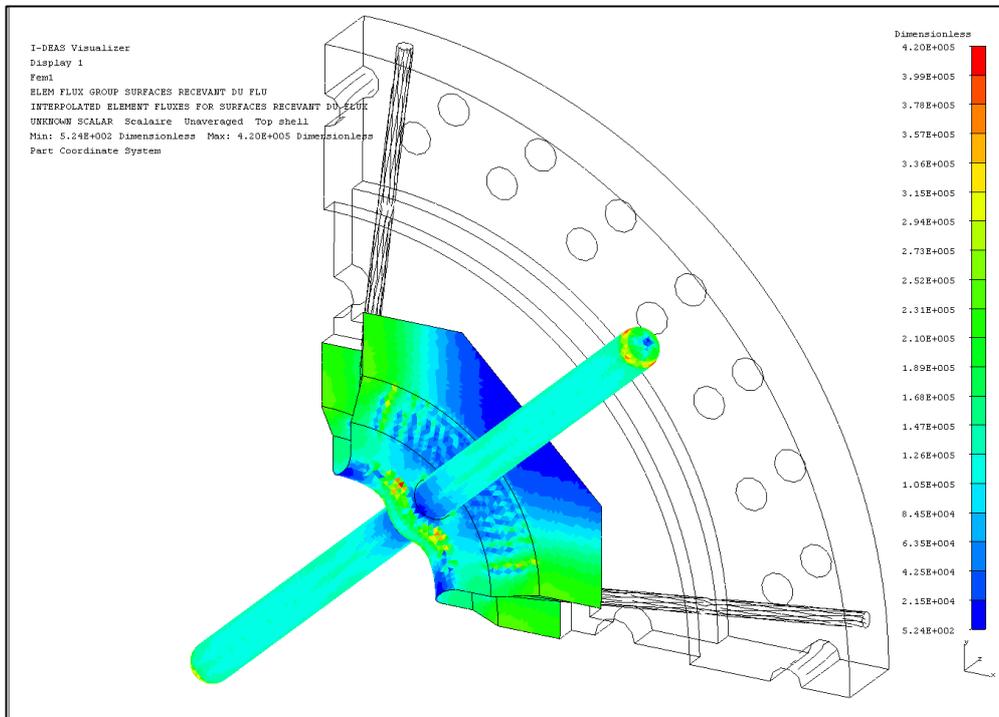


Figure 8. Dépôts de puissance transférés

3.2.1. Résultats du calcul thermique

Conditions initiales : vitesse de l'eau en entrée 5m/s, température de l'eau en entrée 10°C
Puissance HF : 3577 W.

Résultats :

La température sur les éléments solides est comprise entre 10.3°C et 162.3°C Figure 9.

La température de l'eau varie de 10°C à 16.6°C Figure 10.

La vitesse maximale de l'eau est de 6.8 m/s Figure 11.

La puissance transférée par convection au fluide est de 3577 W.

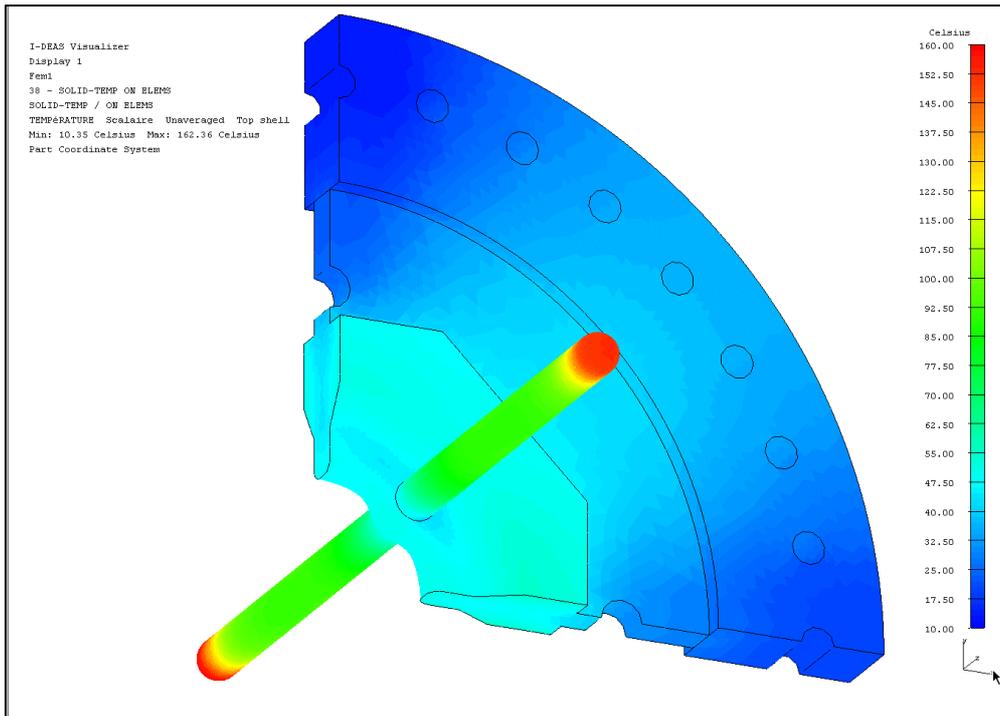


Figure 9. Température de la plaque.

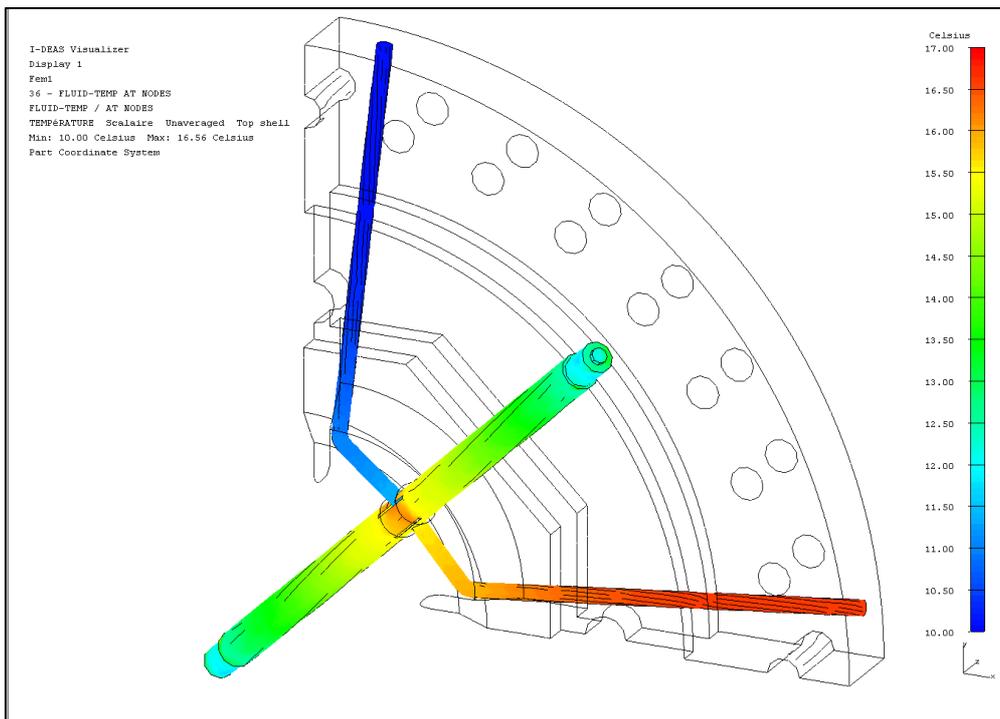


Figure 10. Température de l'eau.

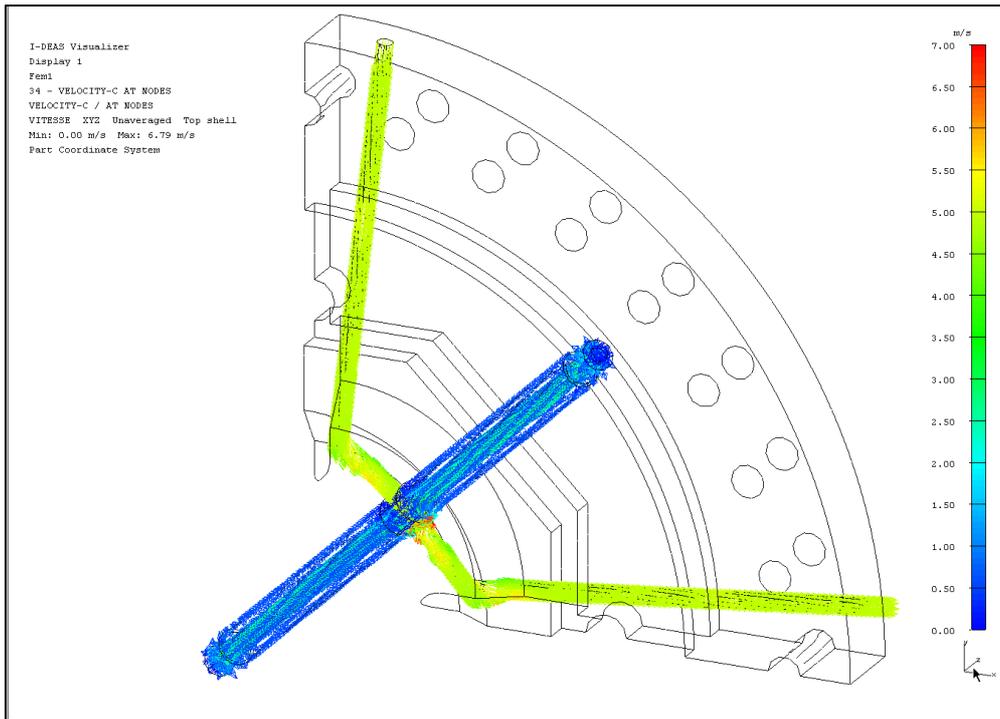


Figure 11. Vitesse de l'eau.

3.2.2 Résultats du calcul mécanique.

Conditions aux limites : blocage des faces de symétrie en translation normale de la bride en inox, blocage d'une face d'appui en translation normale de la bride, chargement thermique sur les nœuds des éléments issu du calcul précédent. La simulation des fentes consiste à ne pas bloquer les surfaces en regard Figure 12.

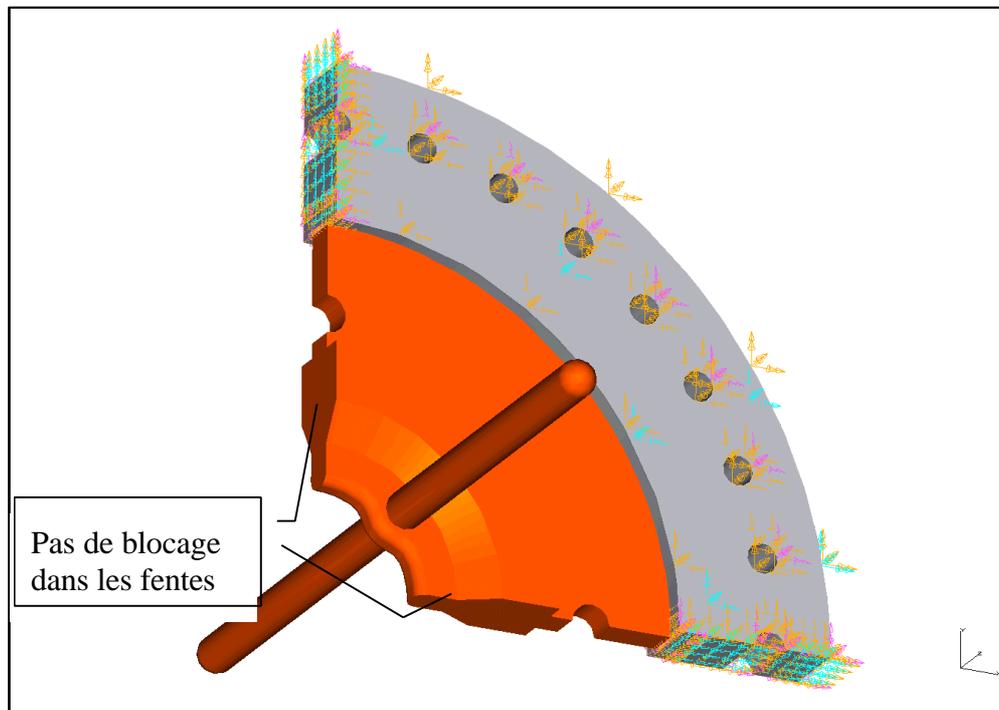


Figure 12. Blocage de la plaque avec fentes.

Résultats : Les contraintes dans la pièce sont comprises entre 0.124 MPa et 74.3 MPa
Figure 13 et Figure 14 .

Le déplacement maximum est de 213 μm Figure 15 et sur les fentes il est de 40 μm Figure 16 .

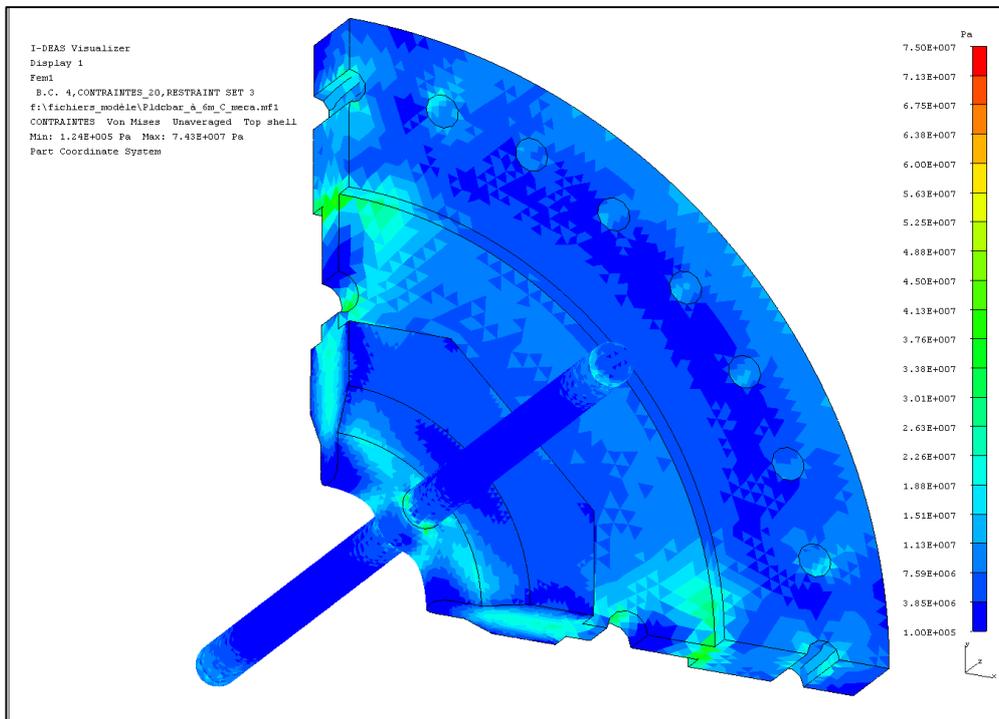


Figure 13. Contraintes de Von Mises.

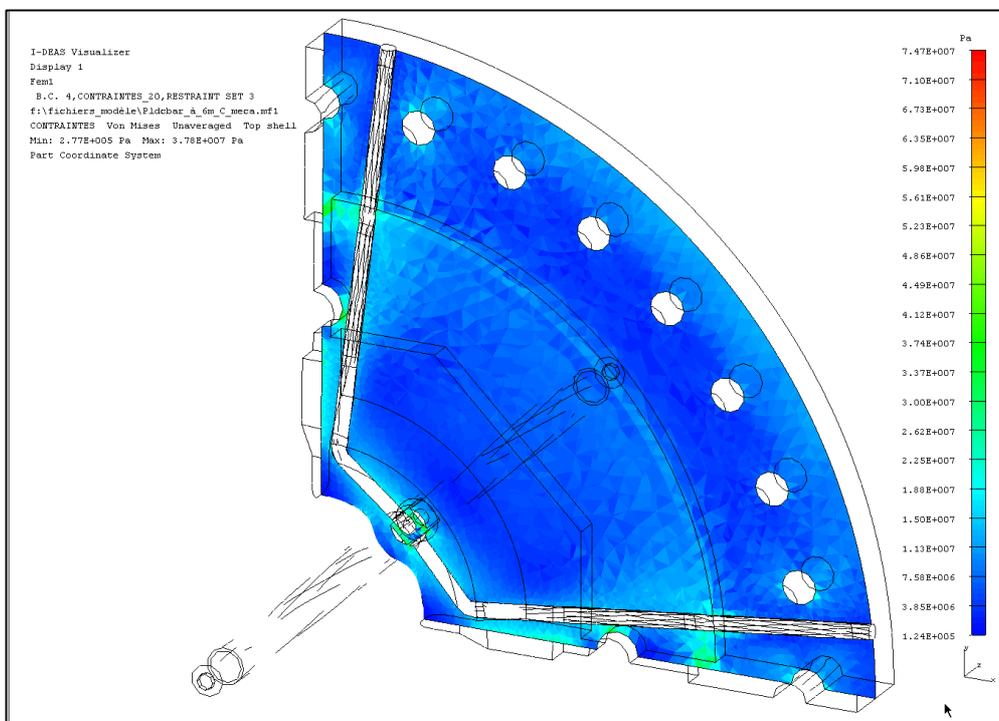


Figure 14. Contraintes ,vue en coupe.

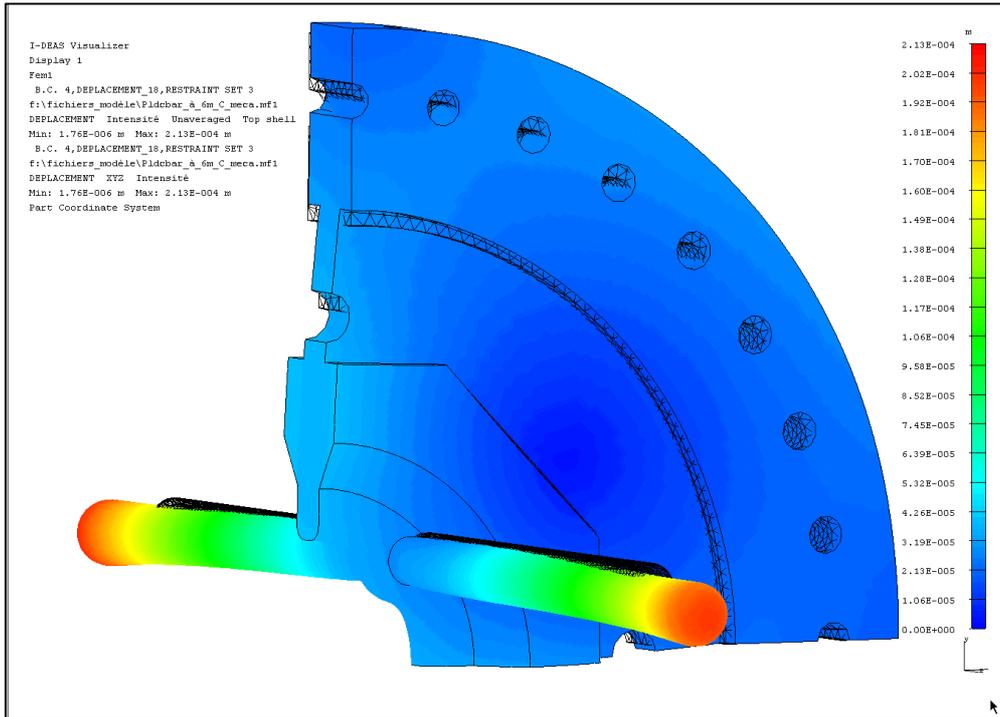


Figure 15. Déplacements, et déformée.

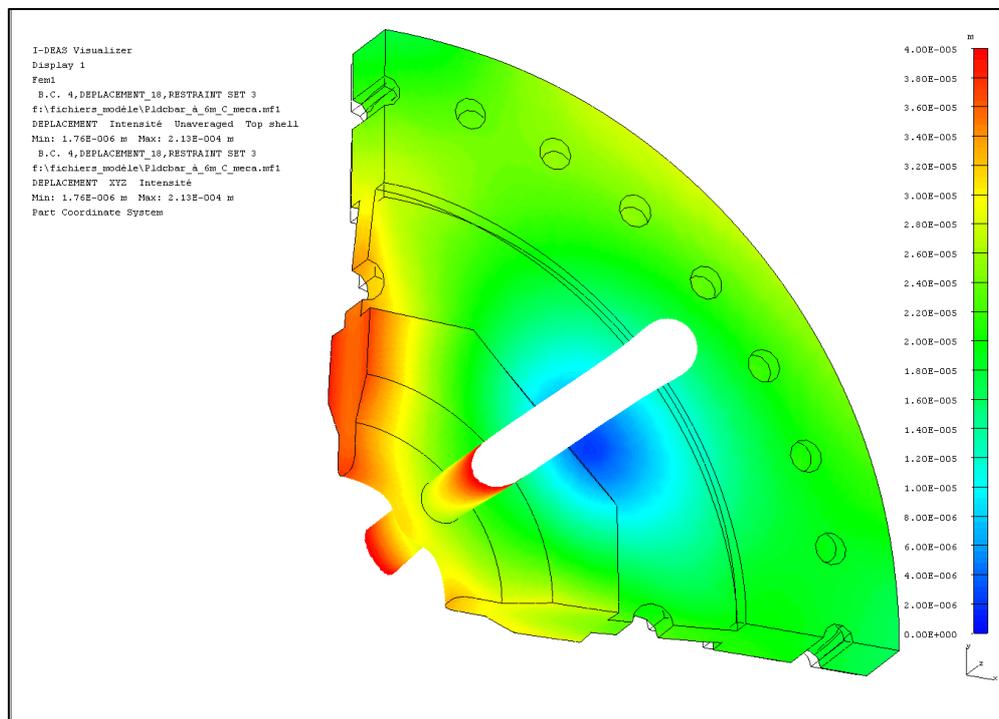


Figure 16. Déplacements : échelle 0 à 40µm.

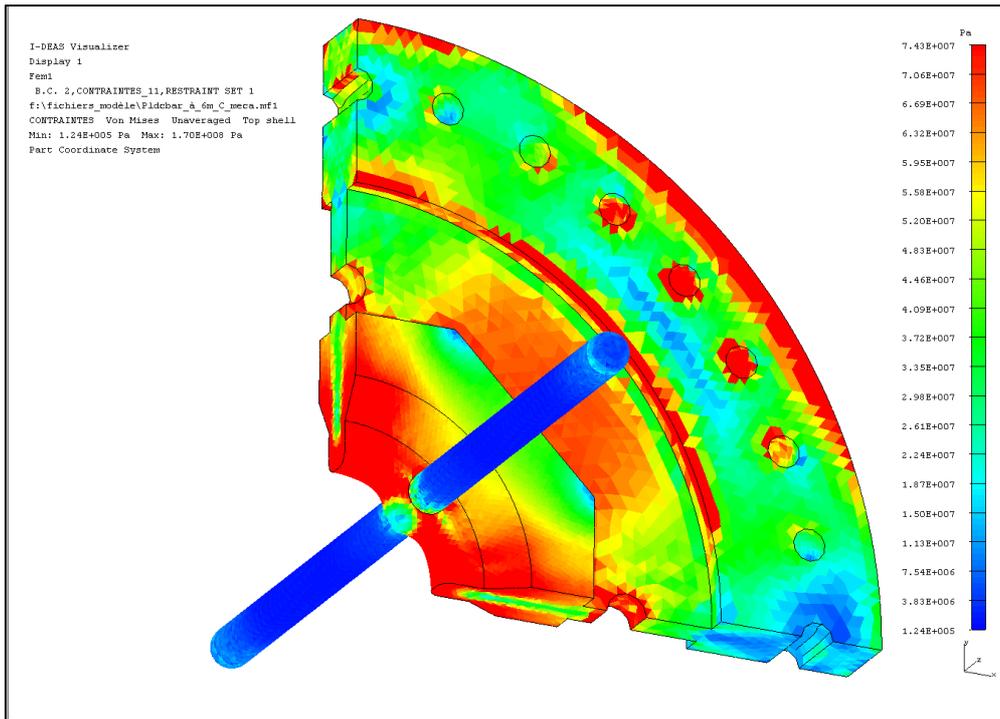


Figure 17. Contraintes dans une plaque sans les fentes, même échelle que la Figure 13 .

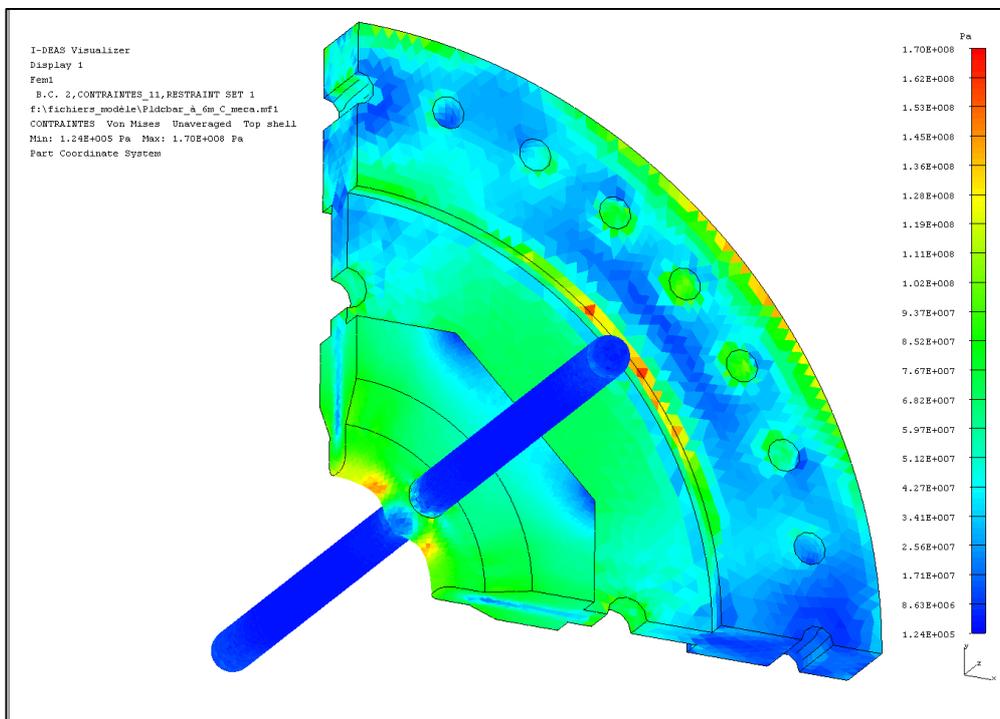


Figure 18. Contraintes dans la plaque sans les fentes : échelle 0.12 à 170 MPa.

3.2.3 Conclusion sur la géométrie de départ.

On constate que les températures de la plaque seule restent inférieures à 55°C, alors que dans les barres les températures dépassent 160°C. Ceci est dû aux faibles vitesses de l'eau (donc du coefficient d'échange) dans la partie du circuit de refroidissement de retour dans la barre. Les déplacements atteignent 200µm aux extrémités des barres. En conséquence, il faut modifier le circuit de refroidissement pour abaisser les températures dans les barres.

Avec la plaque fendue les contraintes sont pour la plupart inférieures à 40 MPa. Les contraintes atteintes avec la plaque non fendue (170 MPa) montrent la nécessité de laisser un jeu pour la dilatation entre chaque quart de plaque (Figure 17 et Figure 18). Le déplacement de l'ordre de 40µm au niveau des fentes montre que la largeur des fentes prévue (200 µm) est suffisante.

3.3 Géométrie modifiée.

Dans cette nouvelle géométrie, le diamètre hydraulique du canal de retour a été diminué, les orifices de passage entre le canal central et le canal de retour sont modifiés et l'épaisseur de la paroi du canal central est modélisée en éléments solides Figure 19 et Figure 20.

L'ensemble du maillage a été raffiné et représente environ 460000 éléments. La puissance intégrée lors du transfert du fichier Mafia reste la même soit 3577W.

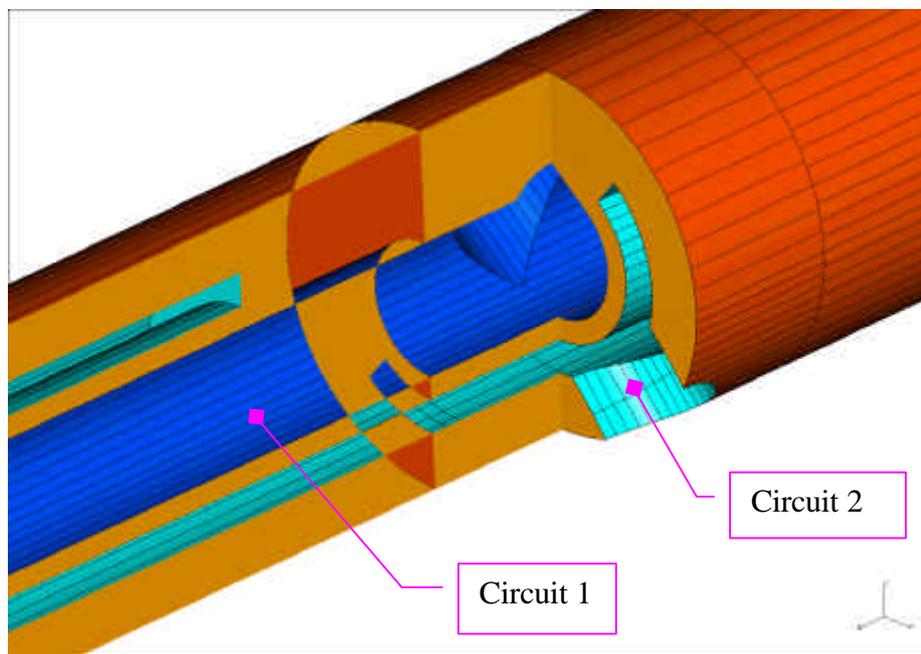


Figure 19. Détail de la géométrie modifiée : circuit d'eau à l'entrée de la barre.

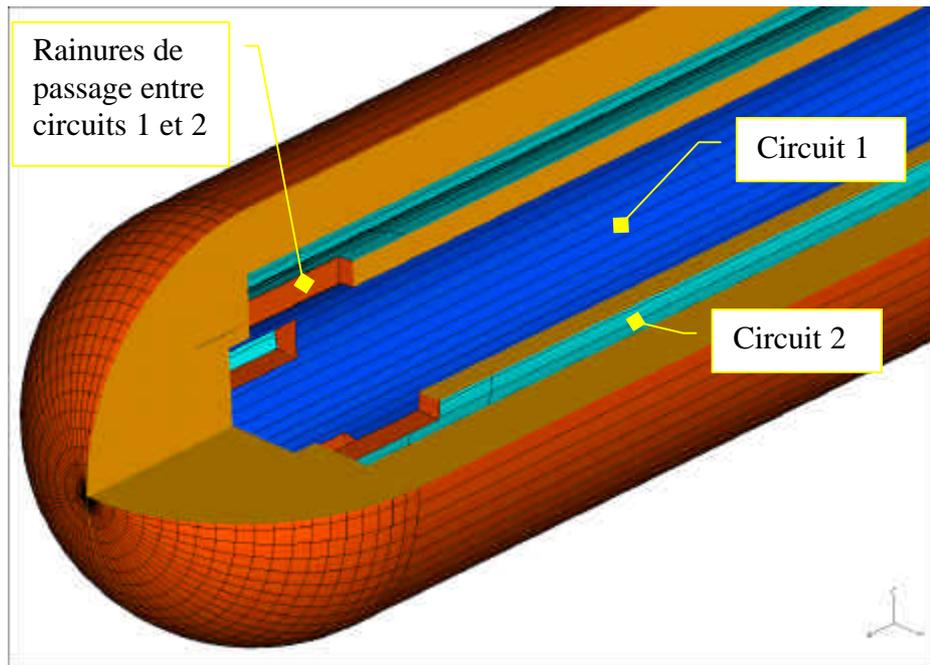


Figure 20. Géométrie modifiée : circuit d'eau à l'extrémité de la barre.

3.3.1 Calcul thermique.

Conditions initiales : vitesse de l'eau en entrée 5m/s, température de l'eau en entrée 10°C, puissance HF 3577W.

Résultats :

La température sur les éléments solides varie de 10.3°C à 58.6°C Figure 21.

La température de l'eau varie de 10°C à 17°C Figure 22.

La vitesse maximale du fluide est de 6.7m/s Figure 23.

La puissance transférée par convection au fluide est de 3577W.

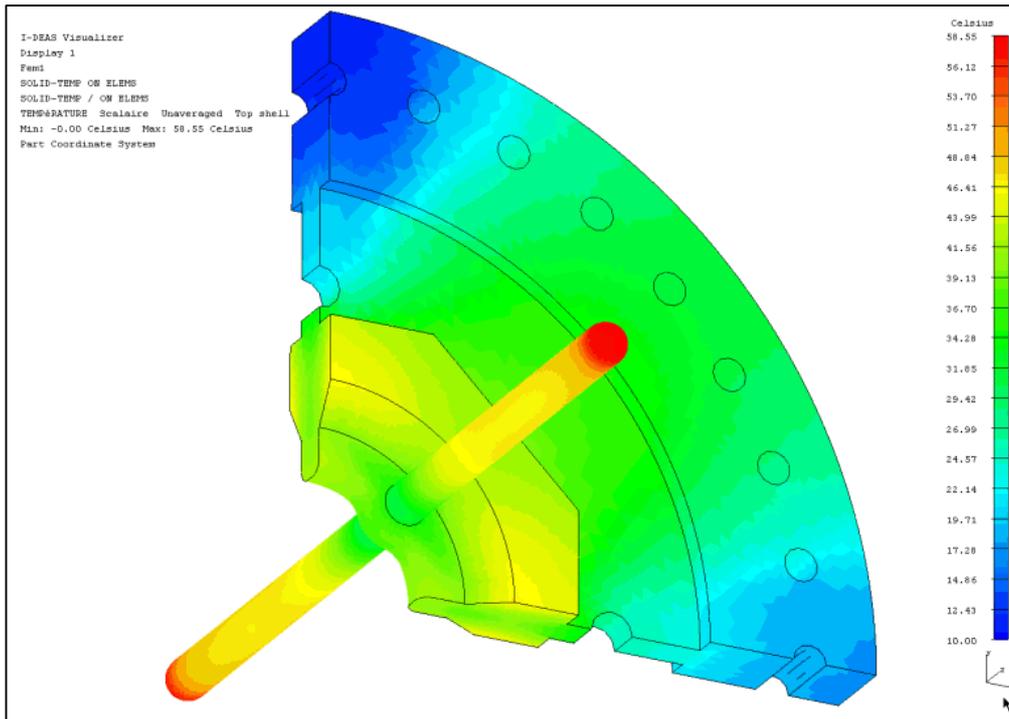


Figure 21. Température de la plaque.

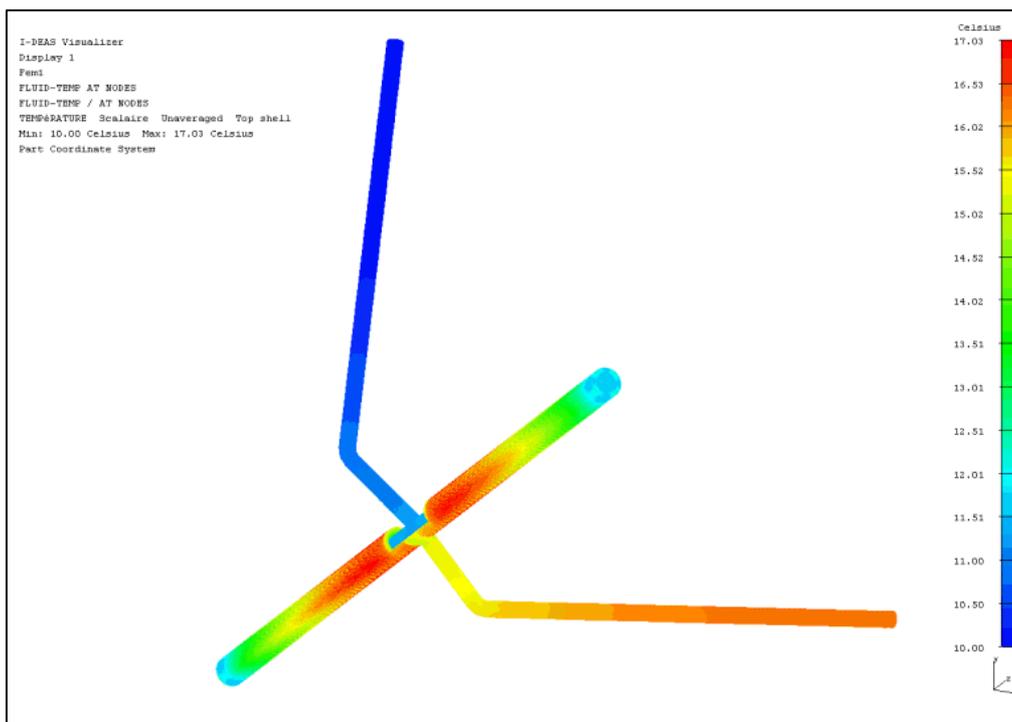


Figure 22. Température de l'eau.

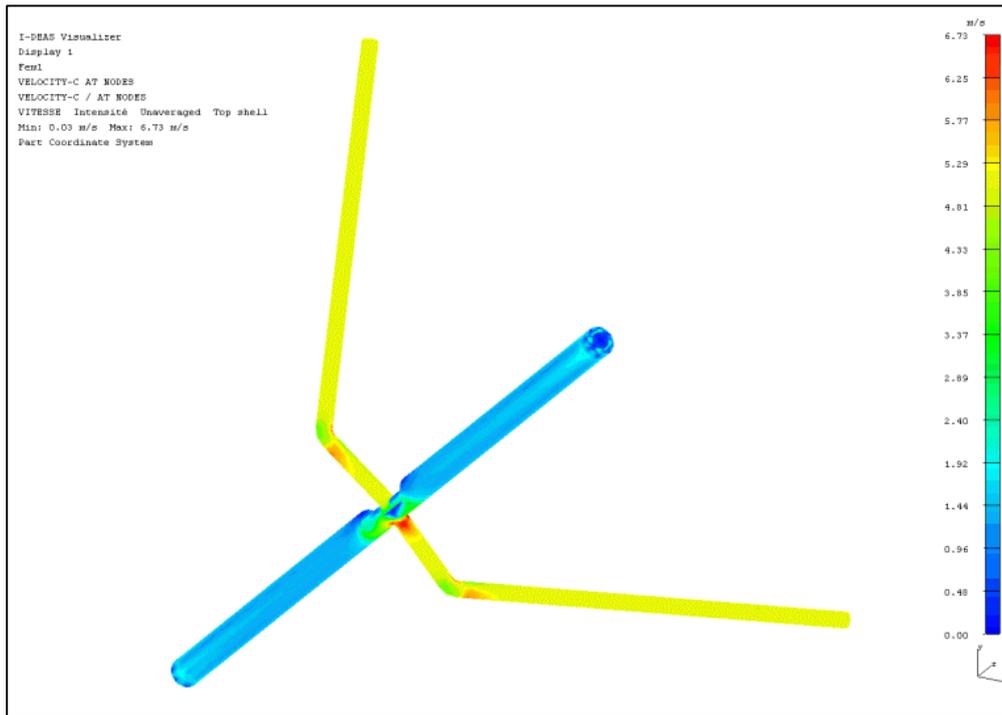


Figure 23. Vitesse de l'eau.

3.3.2 Calcul mécanique.

Les conditions aux limites sont les même que celles énoncées au paragraphe 3.2.2 Figure 12.

Résultats : les contraintes de Von Mises s'échelonnent de 0.211 MPa à 132 MPa, Figure 24 , et se décomposent de la manière suivante :

- contraintes dans la bride inox de 0.254 MPa à 41.8 MPa,
- contraintes dans la plaque de cuivre seule de 0.211 MPa à 34.7 MPa,
- contraintes dans les barres stabilisatrices de 0.211 MPa à 132 MPa.

Pour la majeure partie des barres les contraintes restent inférieures à 40 MPa, pour les valeurs comprises entre 40 MPa et 132 MPa elles se situent sur les parois intérieures du canal central. Figure 25 et Figure 26 .

Le déplacement maximum est de 63 μm Figure 27 et Figure 28.

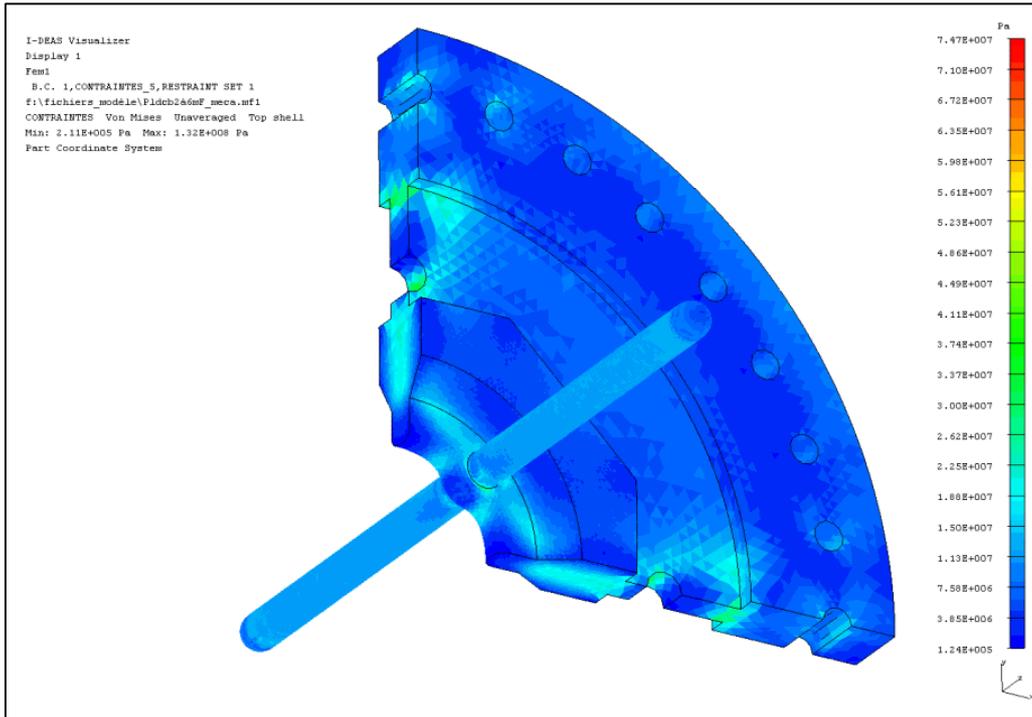


Figure 24. Contraintes de Von Mises avec la même échelle que la Figure 13.

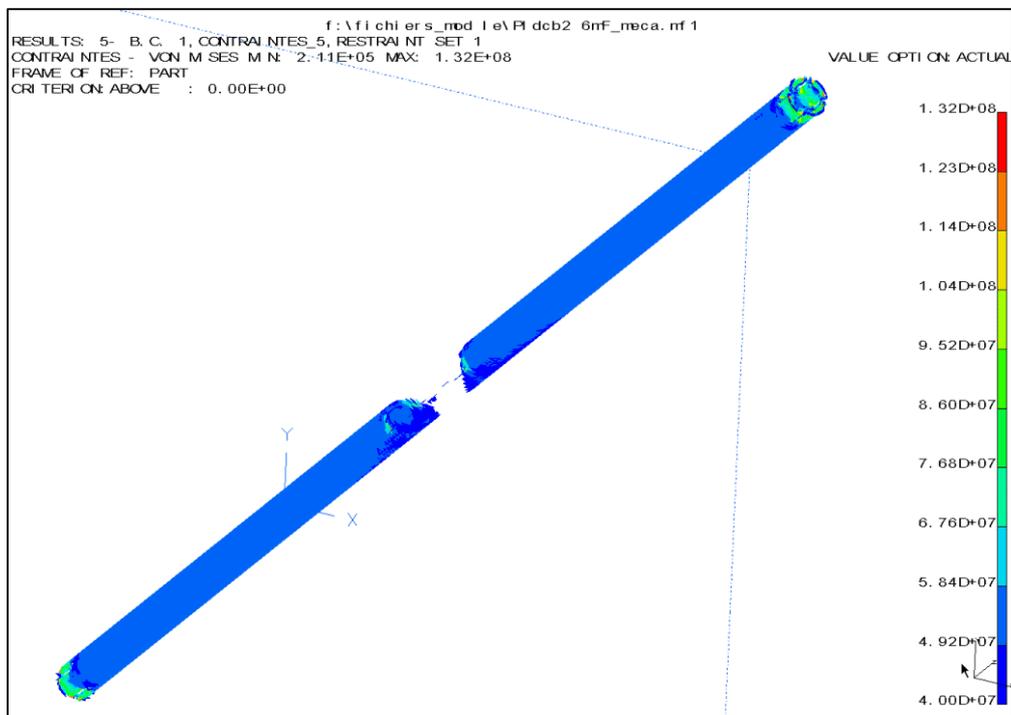


Figure 25. Contraintes dans le canal central des barres.

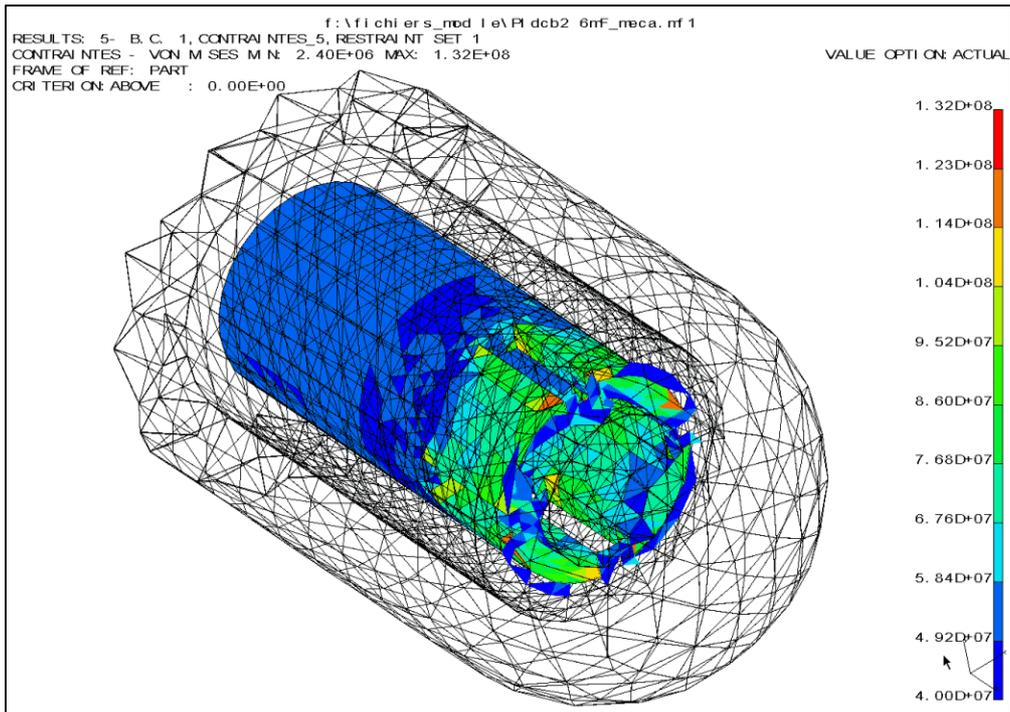


Figure 26. Contraintes en extrémité de barre.

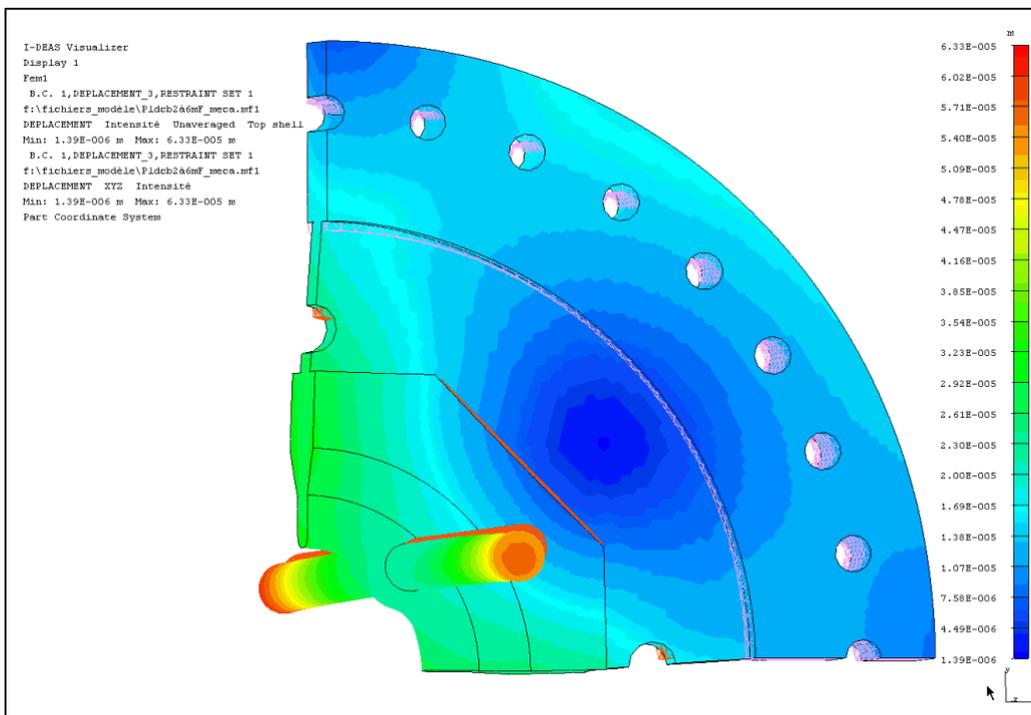


Figure 27. Déplacements et déformée.

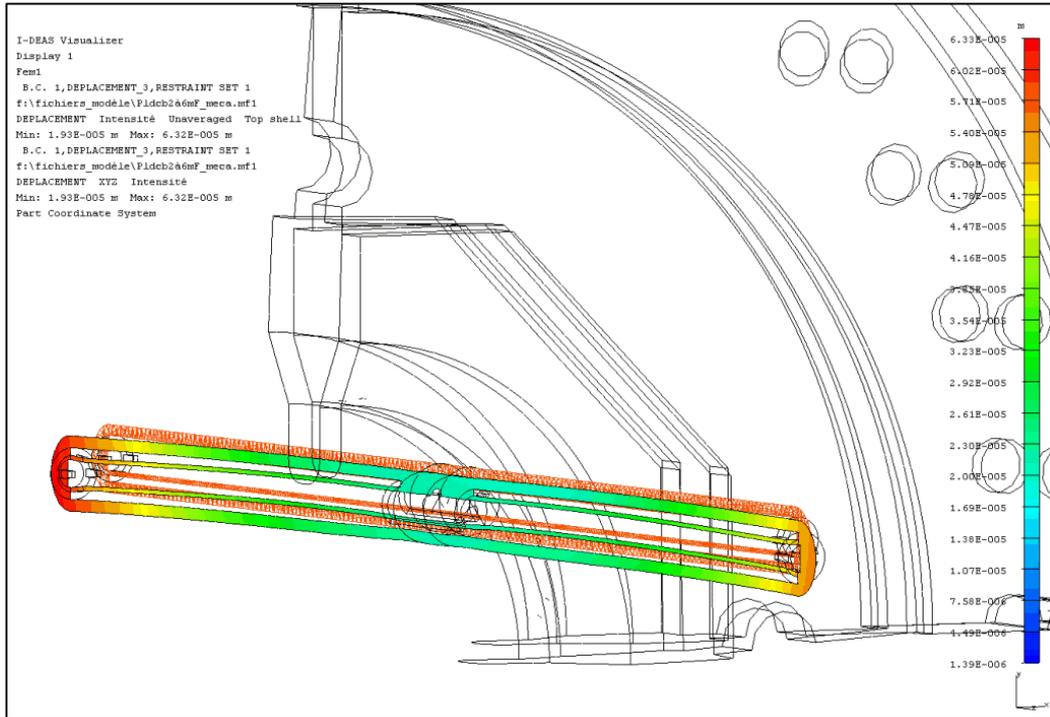


Figure 28. Déplacements vus en coupe des barres.

3.3.3 Commentaires.

Avec cette nouvelle géométrie la vitesse moyenne de l'eau dans le canal de retour a augmenté, entraînant une baisse des températures maximales dans les barres de 162°C à 58°C.

Pour l'ensemble du modèle, les contraintes maximales sont de l'ordre de 40 MPa, excepté le canal intérieur dans les barres. Ceci est dû au gradient de température entre les parois de ce canal et les parois extérieures des barres Figure 29 et Figure 30.

En permutant l'entrée et la sortie de l'eau le calcul thermique montre une augmentation de 10°C de la température maximale soit 68,5°C en extrémité de barre. Les contraintes maximales sont de l'ordre de 133MPa et les déplacements de 73µm.

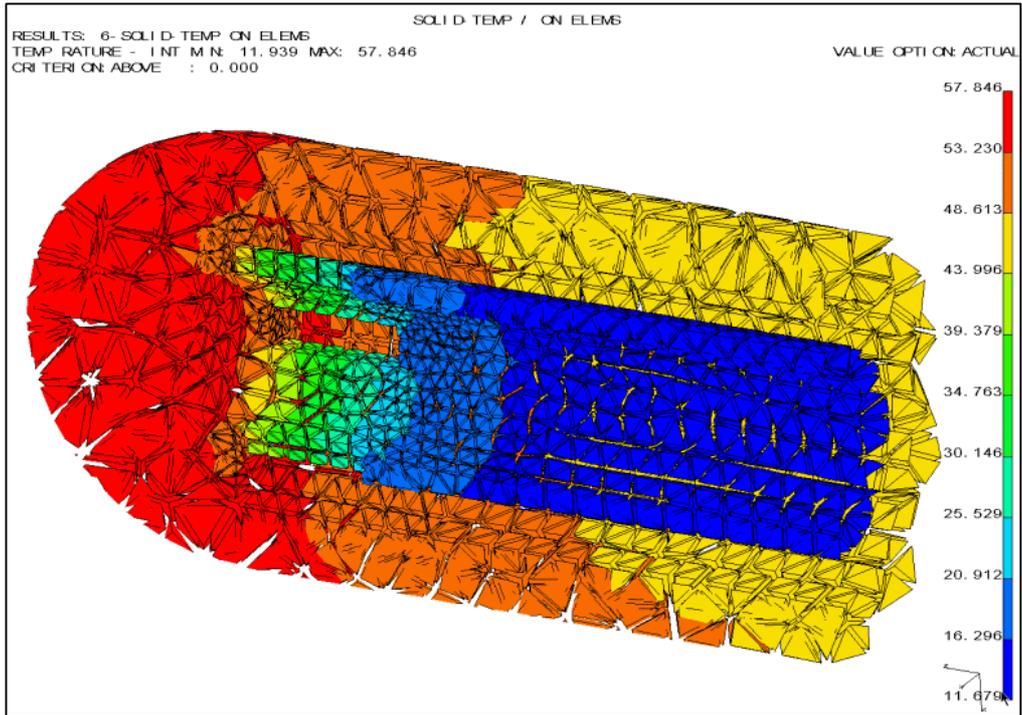


Figure 29. Température de l'extrémité de barre vue en coupe.

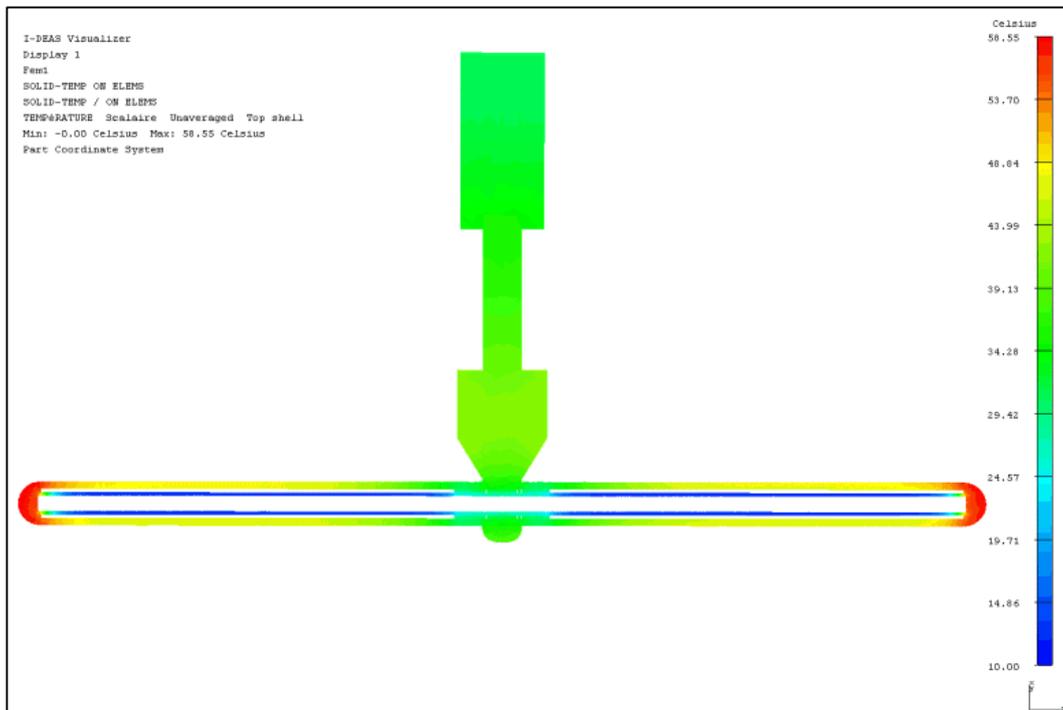


Figure 30. Température vue en coupe.

4. Conclusions.

Nous disposons maintenant d'un module de transfert des puissances surfaciques entre les logiciels MAFIA et I-DEAS. Cet outil nous sera utile pour d'autres études thermiques sur les cavités d'IPHI.

Il est intéressant de remarquer que les zones qui paraissent critiques du point de vue de la puissance dissipée (67 W/cm^2 , valeur brute MAFIA) se révèlent absolument sans problème après étude thermomécanique. D'un autre côté, des contraintes rédhibitoires peuvent apparaître dans des zones où la dissipation semblait raisonnable (entre les quarts de plaque, dans l'hypothèse où la plaque n'est pas fendue). Tout ceci montre la nécessité d'une approche complète (électromagnétique, thermique, fluïdique et mécanique) et que l'application d'un critère de dissipation maximale n'est ni nécessaire ni suffisant.

La plaque de couplage du RFQ à 6 m munie de sa barre a été étudiée en condition de fonctionnement nominal. Après modification du circuit de refroidissement, la température reste faible sur la plaque et sur la barre ($<60^\circ\text{C}$).

Grâce aux fentes coupant la plaque en quatre quarts, les contraintes dans le cuivre sont généralement inférieures à 40 MPa, ce qui restent bien en deçà de la limite élastique. On note toutefois des contraintes nettement plus élevées en extrémité de barre au niveau du tube intérieur (130 MPa), mais comme ce dernier ne joue aucun rôle d'étanchéité, le dépassement local de la limite élastique sera sans conséquence.

Les déplacements sont négligeables sur la plaque. En particulier le déplacement latéral de la barre reste inférieur à $50 \mu\text{m}$, et ne peut avoir d'influence notable sur l'adaptation d'extrémité de segment.

Remerciements.

Les auteurs remercient Michel Painchault qui a initié et suivi l'ensemble de l'étude. Nous remercions également Ralf Ehman de la société CST pour les modifications successives de MAFIA.

Enfin, les auteurs remercient Jean-Sebastien Genot, de la société "MAYA Heat Transfer Technology" qui a développé et mis au point le programme MAPFLUX avec efficacité et rapidité.

Références.

- [1] P.Balleyguier, "Nouvelles plaques de couplages et terminales du RFQ d'IPHI" CEA/DIF/DPTA/SP2A/ n°148/00
- [2] P.Balleyguier et al., "Improvement in 3D computation of RF-losses in resonant cavities", Conference Linac2000, Monterey, Août 2000