



جامعة زيان عاشور الجلفة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم علوم التكنولوجيا



مركز لبحث لنووي بالبيرين
ص.ب: 180 عين وسارة - الجلفة
الهاتف : 027-87 29 21 / 027-87 29 35
الفاكس : 027- 87 42 80
البريد الإلكتروني: cmb@wissal.dz

Modélisation CFD de la convection naturelle dans un canal expérimental d'une boucle pressurisée sous solveur CFD

Abdelkader TIKIALINE

Thèse de Master

**Filière : Génie Mécanique
Option : Modélisation et Simulation en Mécanique**

Plan de Thèse

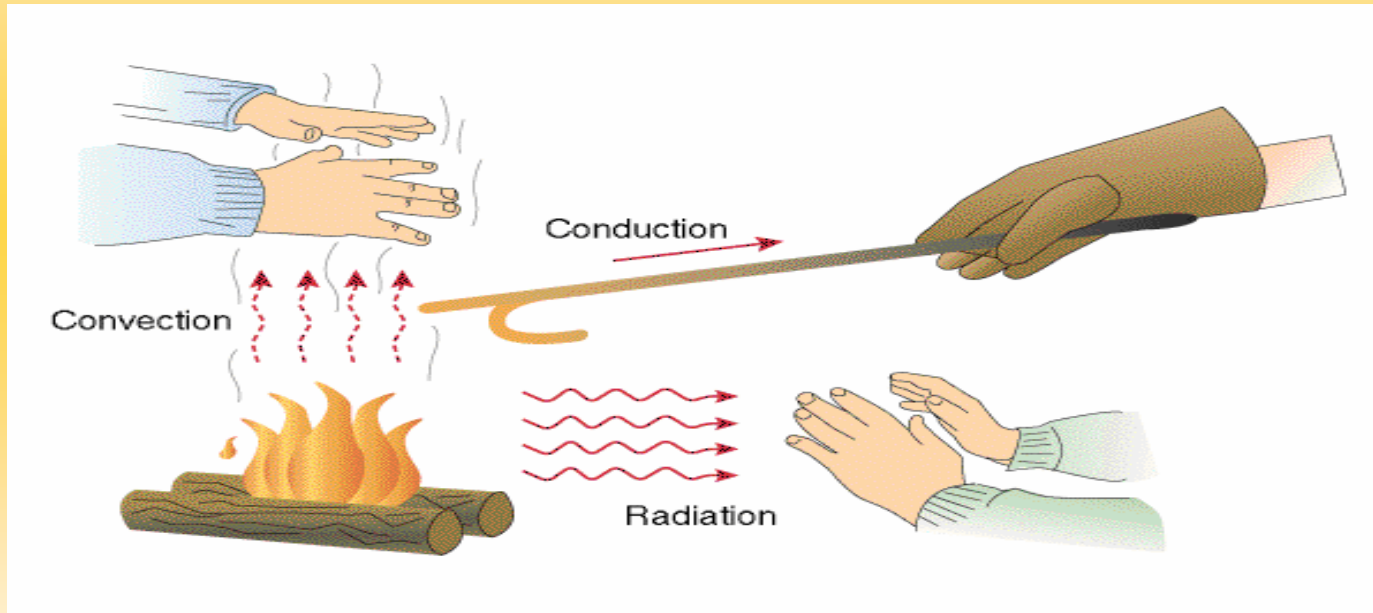
- **Introduction général**
- **Généralités**
- **Formulation numérique et logiciel du calcul**
- **Modèle mathématique et géométrie du simulation**
- **Résultats et discussion**
- **Conclusions – Perspectives**
- **Références bibliographiques**

Introduction générale

- La convection naturelle est le mécanisme principal de refroidissement dans certains réacteurs nucléaires dans des situations bien précises. Elle s'établit par la circulation naturelle de l'eau réfrigérante entre les éléments combustibles du cœur du réacteur. Le défi majeur d'une étude thermo hydraulique de ces réacteurs consiste à savoir si le refroidissement par convection naturelle du réfrigérant est suffisant pour permettre l'évacuation de la chaleur résiduelle du cœur en toute sécurité .
- Dans ce travail, on s'intéresse au transfert de chaleur, par convection naturelle, produite par la désintégration des produits de fission et l'échauffement gamma dans le crayon combustible suite à un accident d'arrêt de pompe primaire ou un blocage d'écoulement dans le cœur.
- Ce travail de mémoire sert à évaluer numériquement l'échange thermique par convection naturelle laminaire dans un canal de réfrigération d'une boucle pressurisée de forme cylindrique où un flux de chaleur variable se dégage de l'élément combustible vers le caloporteur. Ce scénario se produit suite à un arrêt accidentel des pompes de circulation. Cette étude sera réalisée à l'aide d'un logiciel de mécanique des fluides numérique qui va nous permettre de réaliser la géométrie, le maillage, la configuration, le calcul et la présentation des résultats en régime instationnaire

Chapitre I : Généralités

- Les transferts de chaleur, phénomènes implicitement admis en thermodynamique qui décrit l'évolution d'un système vers l'équilibre thermique, peuvent s'effectuer de trois façons différentes: par conduction, par rayonnement et par convection.

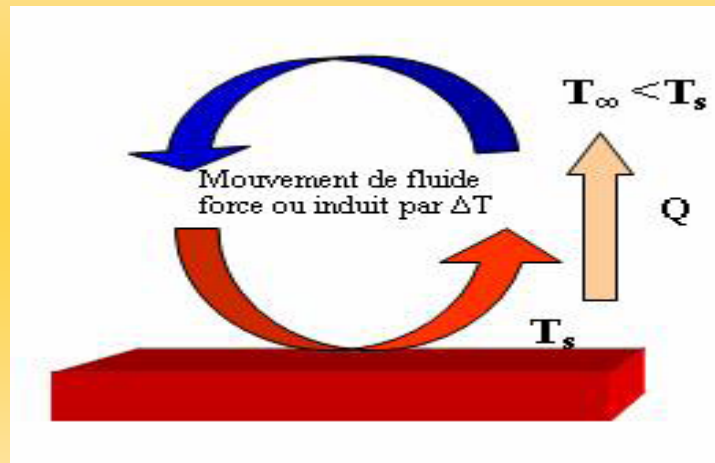


Types de transfert de chaleur

Chapitre I : Généralités

Convection

- La convection est un phénomène qui caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide, gaz ou liquide, dont les molécules sont en mouvement.



- Deux formes de convection sont distinguées ; la convection libre (ou naturelle) et la convection forcée.

Chapitre I : Généralités

Convection naturelle (ou libre)

- La convection naturelle (libre) se distingue de la convection forcée par le fait que le mouvement du fluide n'est pas due a un apport externe d'énergie mécanique, mais qu'il trouve sa source au sein même du fluide, sous l'effet conjugué d'un gradient de masse volumique et d'un champ de pesanteur.
- On peut exprimer la quantité de chaleur transmise par convection entre une paroi solide et un fluide au moyen de l'équation :

$$Q = h.s(T_p - T_\infty)$$

Q : Flux de chaleur transmis par convection

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection

s : Aire de surface de contact solide/fluide

T_p : Température de surface de solide

T_∞ : Température de fluide loin de la surface du solide

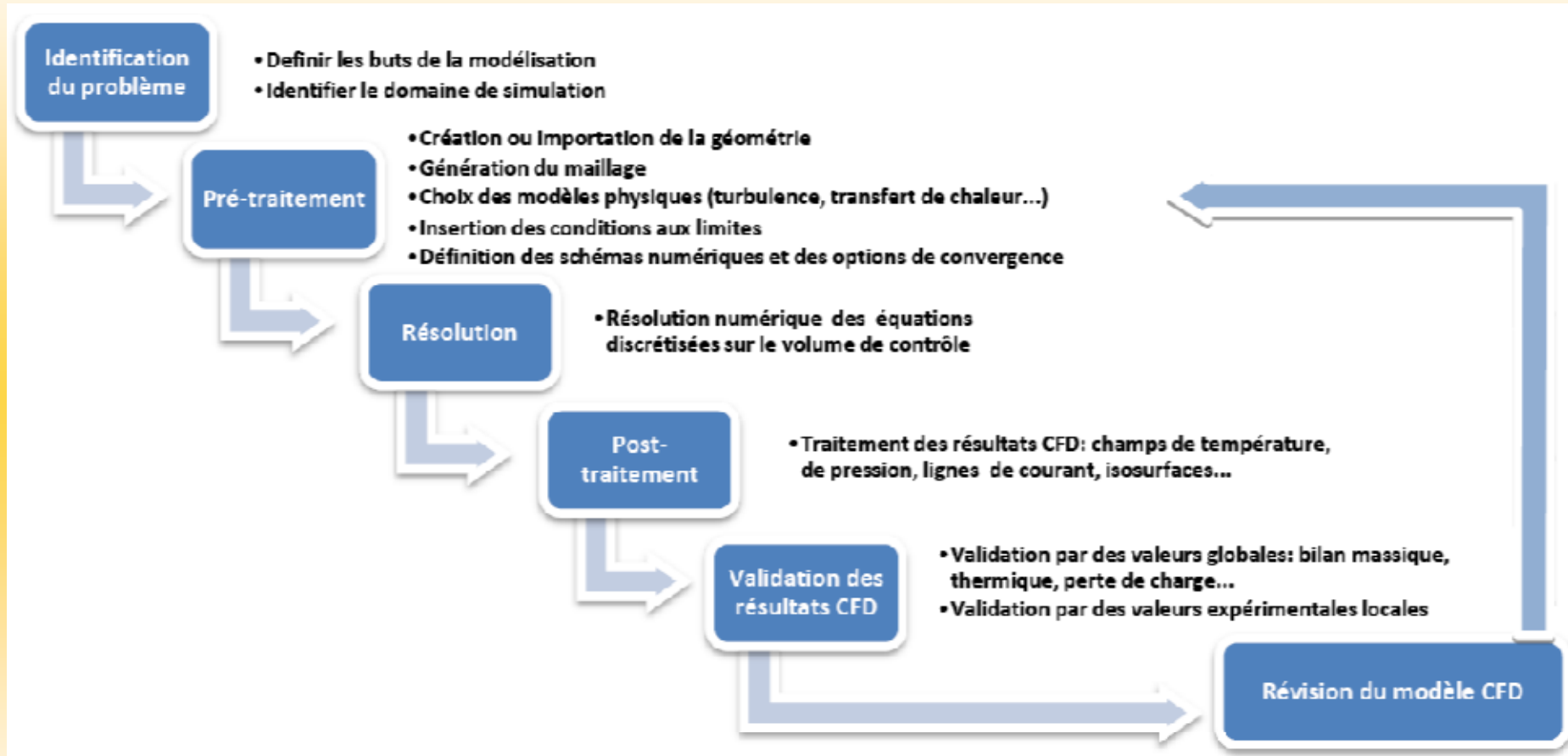
Chapitre II: Formulation numérique et logiciel de calcul

Présentations du logiciel Ansys CFX

- Dans la présente étude, on a utilisé le code CFD CFX (v 12.1) basé sur la méthode des volumes finis, cette méthode consiste à discrétiser le domaine de l'écoulement en une multitude de volumes de contrôle (cellules) puis d'effectuer des bilans (de masse, de quantité de mouvement ...) sur ces petits volumes. L'avantage déterminant des volumes finis par rapport aux autres méthodes est qu'ils sont conservatifs, en bref, tout ce qui sort d'un volume de contrôle entre dans un autre.
- CFX-12.1 est un logiciel général de simulation numérique d'écoulements en mécanique des fluides et transfert thermique.
- Il permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète de la modélisation, de la création géométrique, et la visualisation des résultats, en passant par la création du maillage et le calcul.

Chapitre II: Formulation numérique et logiciel de calcul

Etapes suivies en simulation CFD



Chapitre II: Formulation numérique et logiciel de calcul

Les modules du CFX

- Le module CFX-pre permet de définir les conditions aux limites et initiales du système, ainsi que les équations à résoudre, le type de résolution (régime permanent ou transitoire), les paramètres du solver, parmi lesquels: le pas de temps, le nombre d'itération, le critère de convergence ainsi que la nature des fluides (ou solides) en présence.

Les conditions aux limites sont de 5 types : inlet, outlet, opening, wall et sym.

- Le module CFX-solve est le module qui effectue les calculs. Il est basé sur l'intégration des équations de Navier Stokes dans chaque maille et dispose de modèles additionnels pour prendre en compte la turbulence, le rayonnement thermique. A la fin de son calcul, CFX-solve génère deux types de fichiers :

Chapitre II: Formulation numérique et logiciel de calcul

suite

- un fichier « .out » lisible par un éditeur de texte. Ce fichier résume le déroulement du calcul. Il contient, entre autres, les informations du « .def », ainsi que le bilan masse du système.

- un fichier « .res » qui contient l'ensemble des résultats. Ce fichier est directement exploitable par CFX-post.

▪ Le module CFX-post est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant, des champs de vitesses. Il permet également l'exportation des résultats sous forme numérique, comme par exemple la valeur des différentes variables sur chaque nœud, sous forme photographique et même sous forme d'animation.

Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation

Modèle mathématique

- Après cette brève présentation sur le logiciel utilisé en parle maintenant du modèle mathématique et de la géométrie de simulation.
- Equations fondamentales:
- La grande majorité des solutions analytiques et des simulations numériques présentées jusqu'à ce jour ont été basées sur les hypothèses de Boussinesq
- Soit ρ une fonction décroissante de la température telle que:

$$\rho = \rho(T)$$

- L'hypothèse de Boussinesq consiste à écrire la relation précédente sous la forme:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$$

- Avec β le coefficient de dilatation thermique.

Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation

Les équations de la convection naturelle régissant l'écoulement sont les équations de continuité, de Navier Stokes et l'équation d'énergie, qui expriment la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

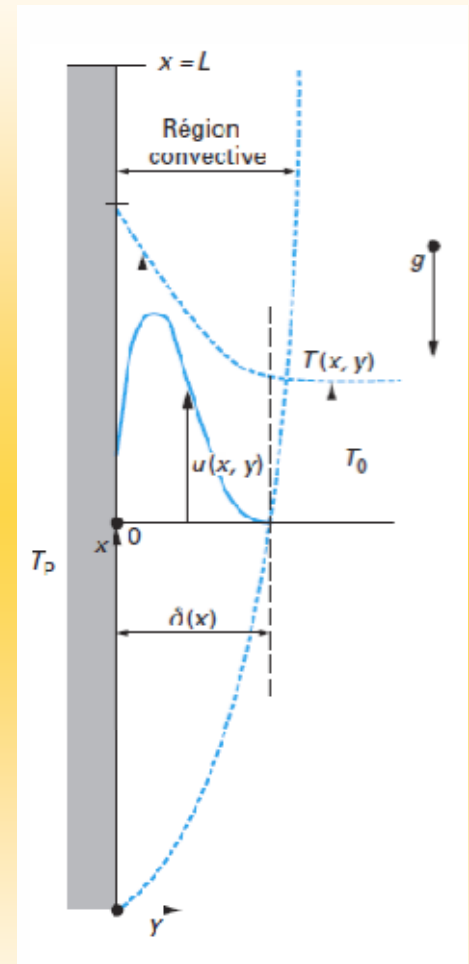
L'équation de conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

L'équation de conservation de la masse (continuité):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

L'équation d'énergie thermique :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$


Couche limite le long d'une paroi verticale (Plaque chaude)

Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation

Suite équations fondamentales

Nombre de Grashof :

- Rapport des effets thermiques de convection naturelle aux effets visqueux
Forces d'Archimède sur Forces visqueuses

$$G_r = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

- Nombre caractéristique dans la convection naturelle.

▪ Si $G_r \approx 0$

$$\left. \begin{array}{l} \beta \approx 0 \\ (T_s - T_\infty) \approx 0 \\ \nu \text{ très grande} \end{array} \right\}$$

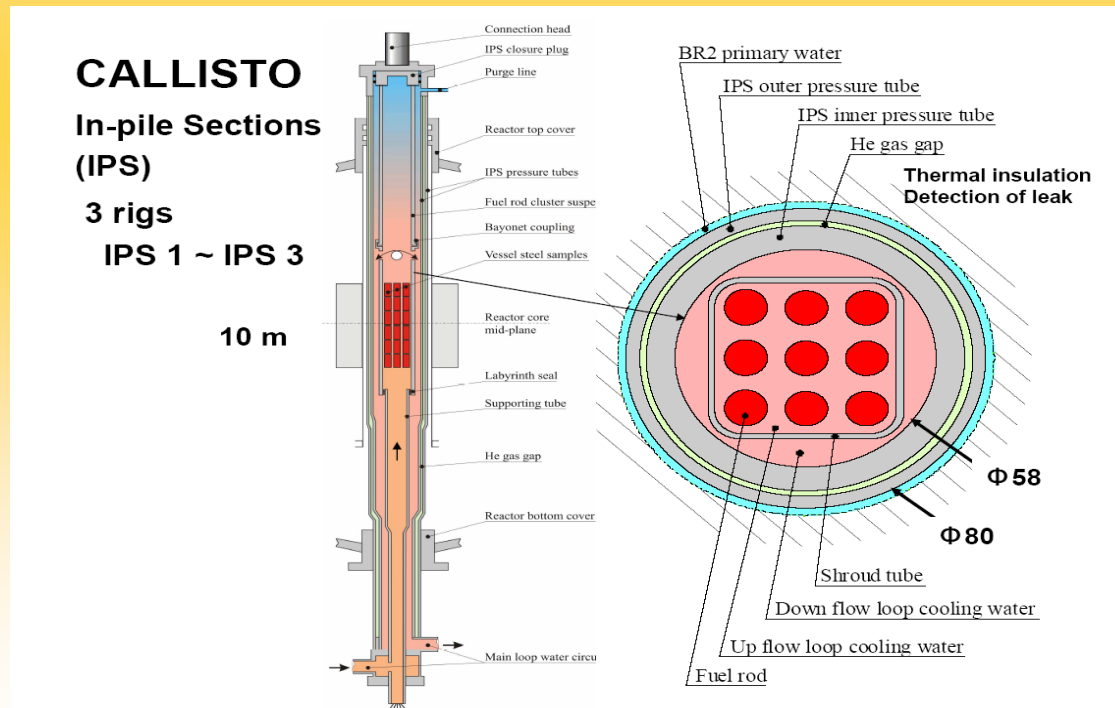
Pas de mouvement induit par le ΔT

- Si G_r élevé } Effet important de convection naturelle

Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation

Géométrie de simulation

- La boucle d'essai en pile, CALLISTO (Capability for Light water Irradiation in Steady state and Transient Operation), est prototype d'un réacteur à eau pressurisée (PWR).
- destinée principalement aux tests d'irradiation des crayons combustibles, test des matériaux de structures des réacteurs existants et des réacteurs du futur.
- Cette boucle est constituée d'un circuit hors-pile et trois sections d'essais en pile permettant chacune l'irradiation de 9 crayons combustibles.

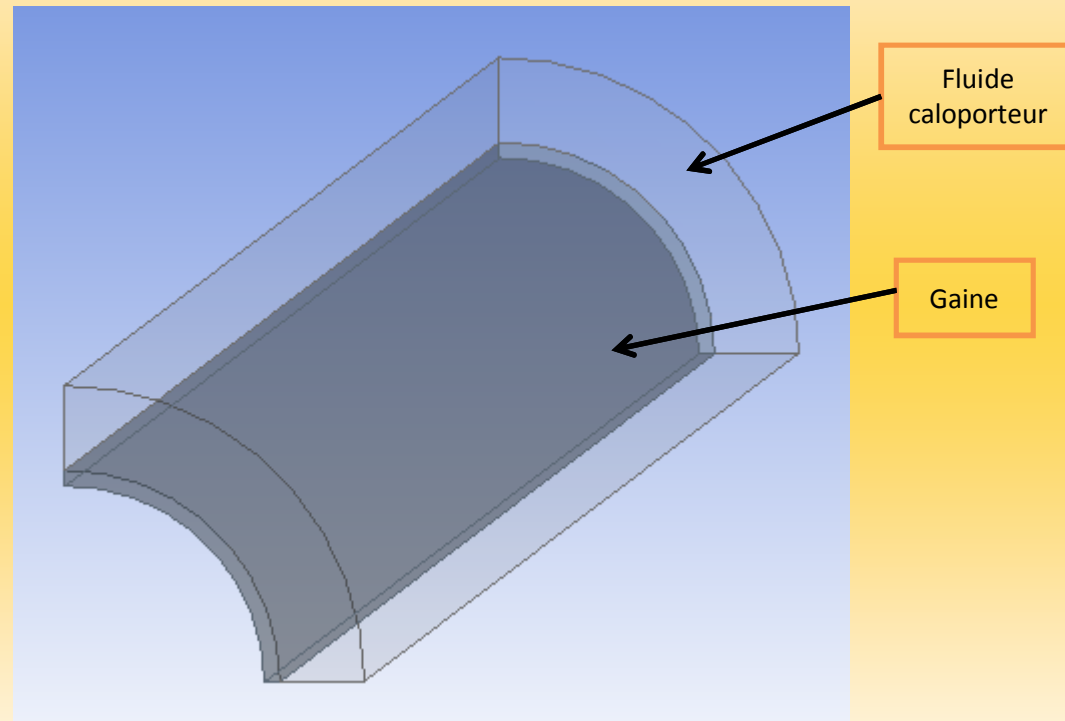


Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation

Suite

- Le système physique, considéré, consiste en un canal de réfrigération dans la boucle CALLISTO contenant un élément combustible cylindrique. Le transfert de chaleur s'effectue radialement et on suppose que le transfert de chaleur dans la direction axiale est négligeable. Les deux extrémités du cylindre étant supposés adiabatiques. Cet élément combustible a une longueur L de un mètre et un diamètre D de 9.5 mm y compris tous leurs constituants tels que : la matière fissile UO_2 , le gaz d'hélium et la gaine.
- Afin de simplifier le temps de calcul CFD, on a pris un quart du canal réfrigérant contenant seulement le réfrigérant et la gaine. Puisque on s'intéresse uniquement au transfert de chaleur à la surface de la gaine, on a supprimé le gap d'hélium et la matière fissile (UO_2), comme indiqué dans la figure ci-dessous.

Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation



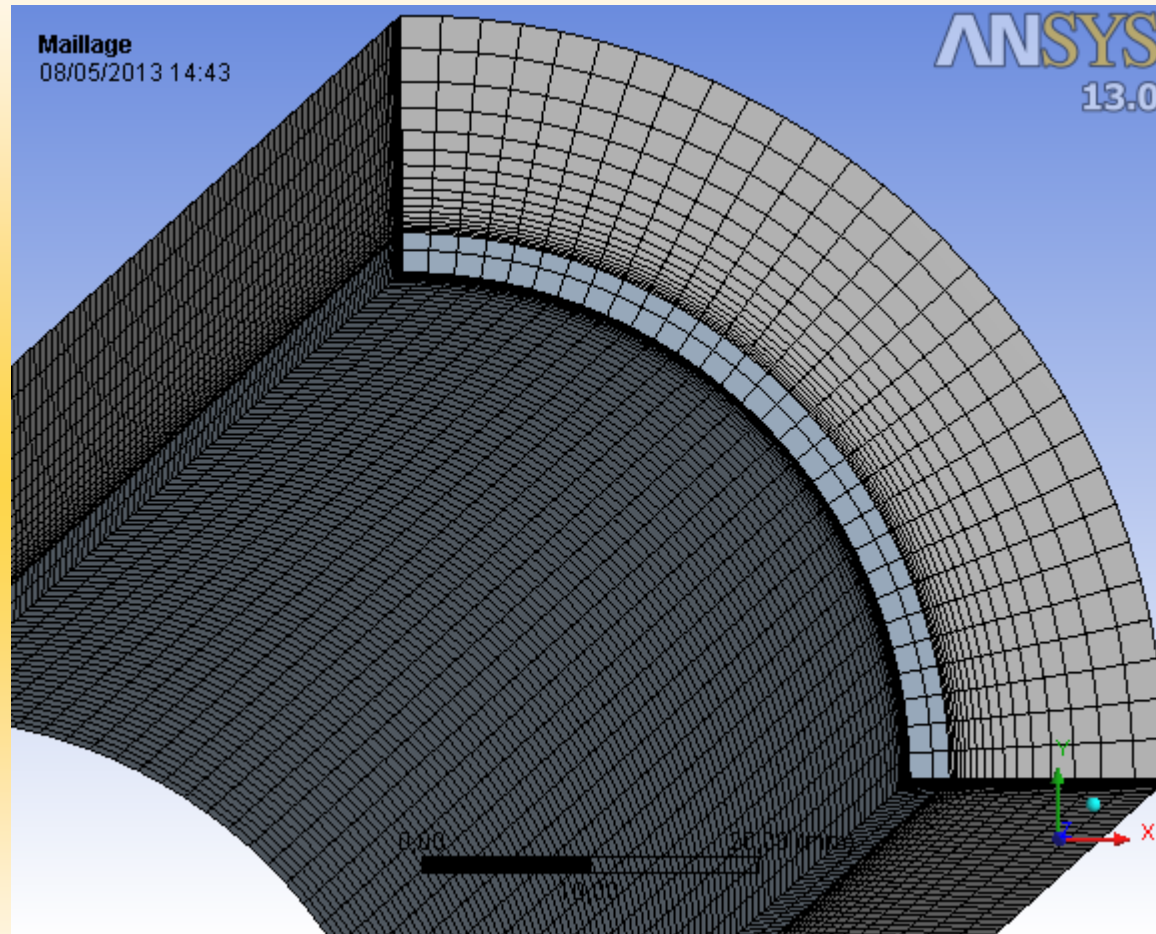
Un quart du canal réfrigérant simplifiant le transfert de chaleur

Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation

Maillage du domaine

- Le code de calcul ANSYS-CFX permet de mailler de deux manières différentes: maillage structuré et non structuré.
- En générale, le code ANSYS permet de réaliser un maillage automatique de toute la géométrie étudiée. En raison de la qualité de la résolution CFD qui dépend fortement de la qualité du maillage effectué. Vu la faible dimension de l'élément combustible (diamètre extérieur = 9.5mm), nous avons maillé finement l'ensemble de la gaine et du volume fluide caloporteur et plus finement à l'interface entre la gaine et le fluide.
- Nous avons maillé le domaine de simulation par blocs en fonction des spécificités géométriques. Puisque notre géométrie n'est pas complexe, on a utilisé un maillage structuré dans toutes les géométries extrudables (sweepable bodies): gaine du combustible et dans la zone fluide entourant le combustible.

Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation



Maillage structuré dans les zones fluide et la gaine

Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation

Donnée du maillage du domaine

Les données du maillage du domaine sont :

- Gaine (*Cladding*): nombre de Nœuds est de 152190.
- Eau (*Water*): nombre de Nœuds est de 547884.
- Pour l'ensemble des domaines (*All Domains*): nombre de Nœuds est de 700074.

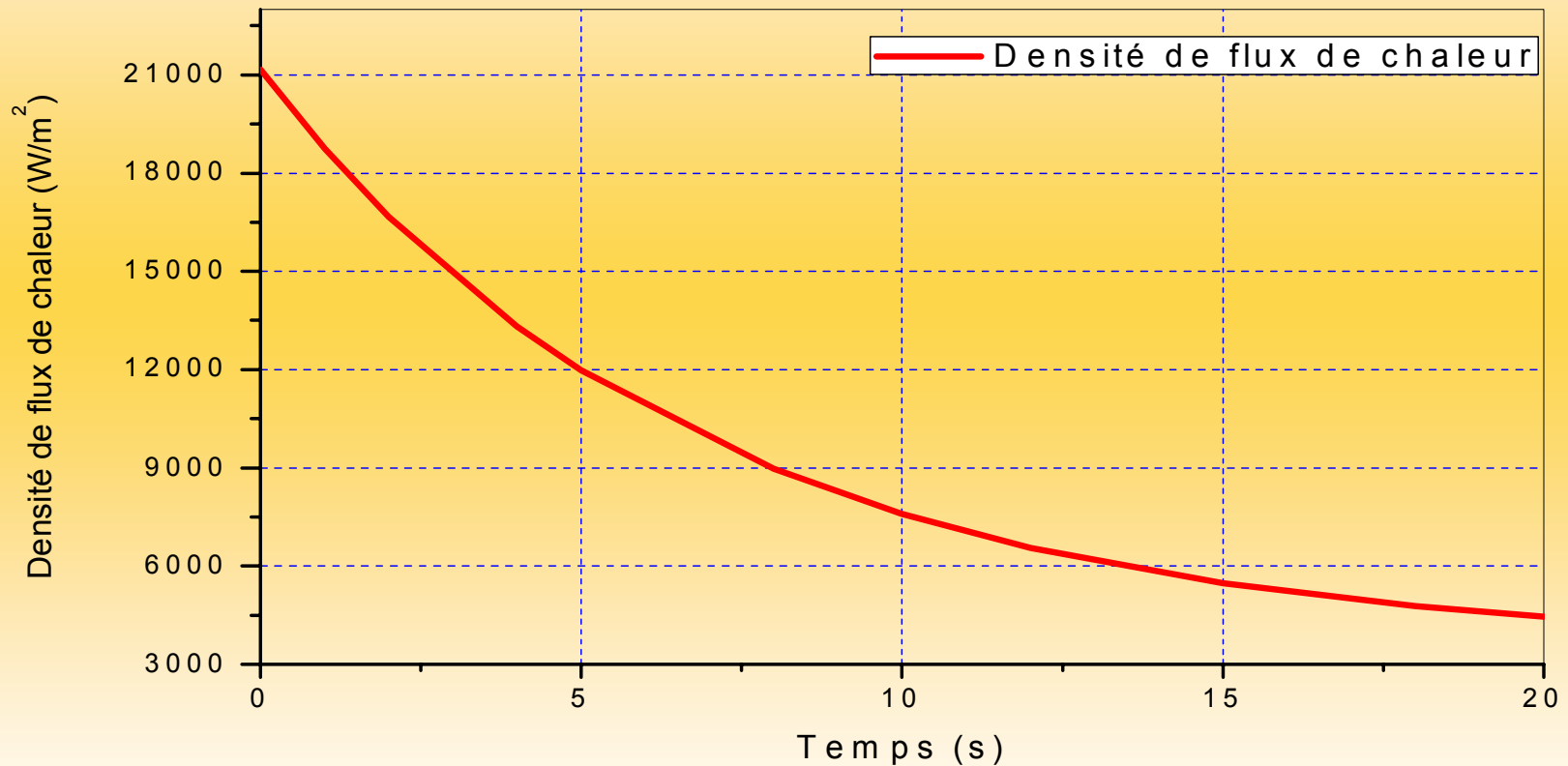
Conditions aux limites et initiales pour CFX

- Une distribution uniforme de la densité de flux de chaleur imposée à la paroi de la gaine est égale à 21163,7 W/m². La température de réfrigérant et de la gaine sont respectivement 300 °C et 345 °C ainsi que la pression de fonctionnement est de l'ordre de 155 bar.

Chapitre III: Modèle mathématique et géométrie de simulation

Variation de la densité de flux de chaleur imposé à la surface de la gaine

- La densité de flux de chaleur imposé à la paroi de la gaine est uniforme sur toute leur surface. Cette densité est décrite par une expression exponentielle.



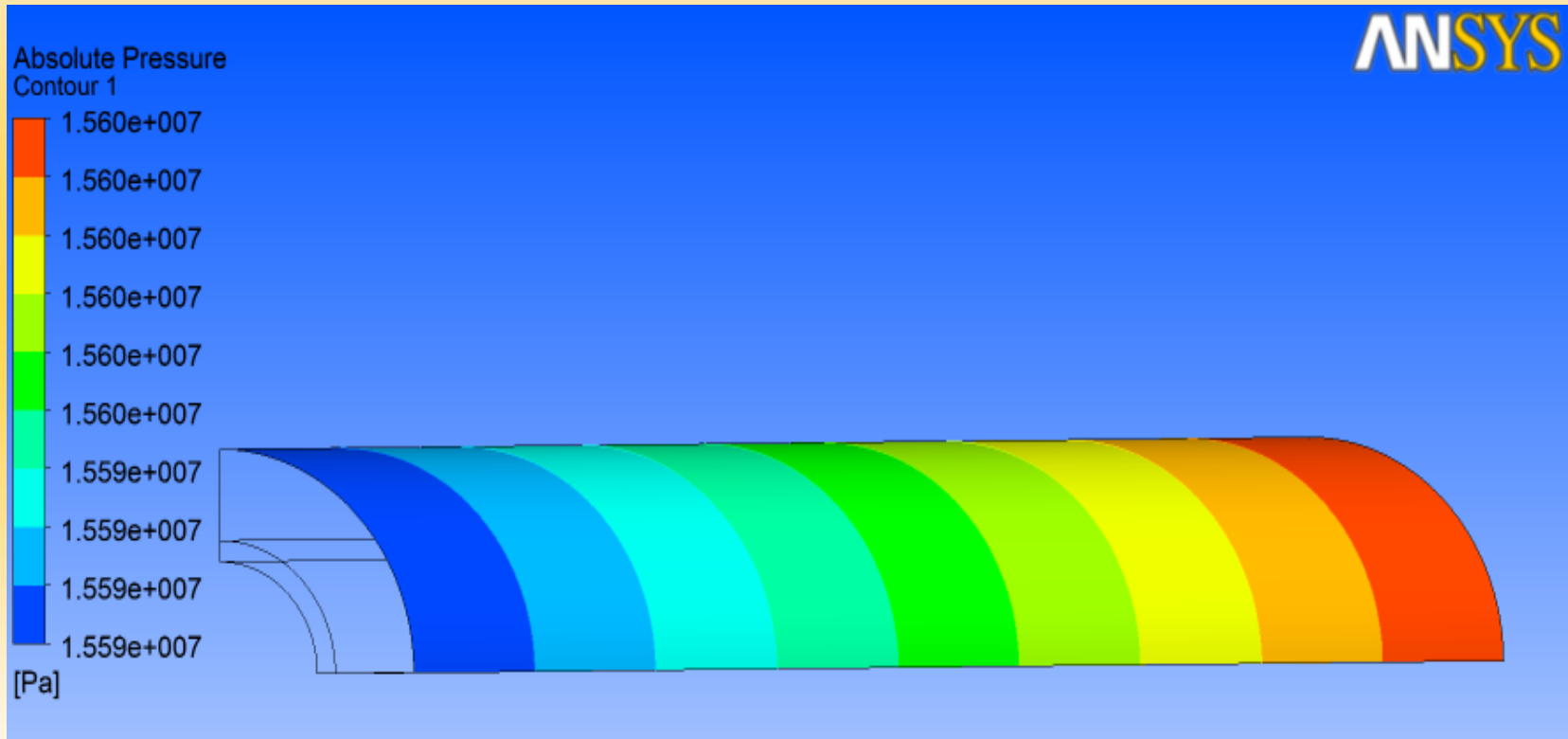
Chapitre VI: Résultats et discussion

- On va procéder à l'analyse des résultats obtenu par la simulation du phénomène de convection naturelle dans le canal de réfrigération. Le temps de simulation est de 05 seconds. Nous présentons les champs d'écoulement, dynamique et thermique, ainsi que les profils de la température et de la vitesse dans la direction radiale de l'écoulement.
- Dans cette étude, nous avons opté pour un maillage structuré, uniforme dans les deux directions, horizontale et verticale, resserré près des parois actives, vu les gradients de température élevés entre la gaine et le réfrigérant.
- Pour s'assurer de la convergence des solutions, le code CFD « CFX » indique la convergence dès que les itérations de tous les résidus calculés atteignent la valeur du critère de convergence, introduite pour chaque paramètre.

Chapitre VI: Résultats et discussion

Pression de l'eau

- Les figures suivantes représentent respectivement:
- le contour de pression de l'eau



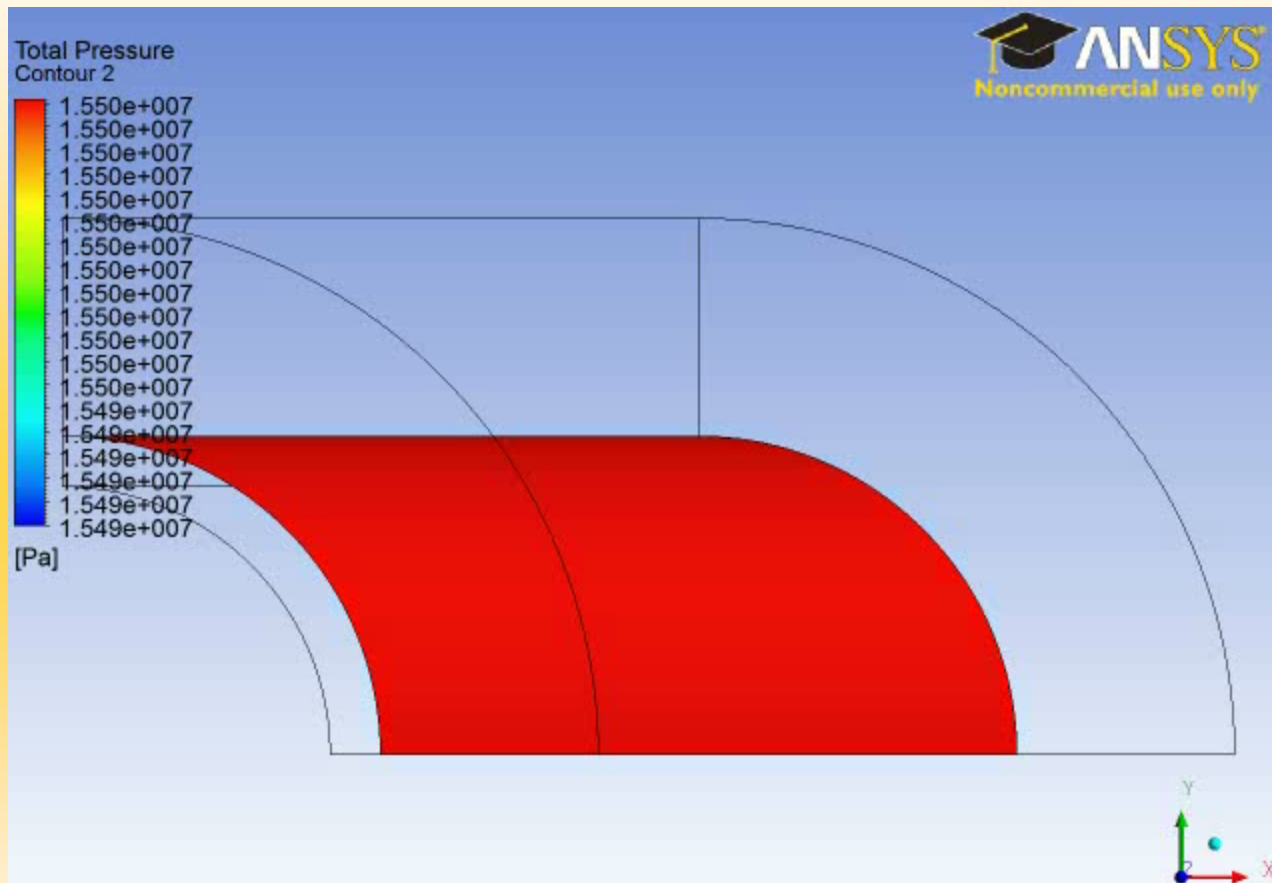
Contour de la variation axiale de la pression

Chapitre VI: Résultats et discussion

- On observe qu'il y a un gradient de pression entre les deux extrémités du canal qui est dû à la variation de la densité et qui va mettre l'eau en circulation. Le gradient de pression est maximal à l'extrémité haute du canal. En effet, c'est toujours lorsqu'il y a une différence de pression importante que le fluide prend de la vitesse.
- Contour de pression selon Z

Chapitre VI: Résultats et discussion

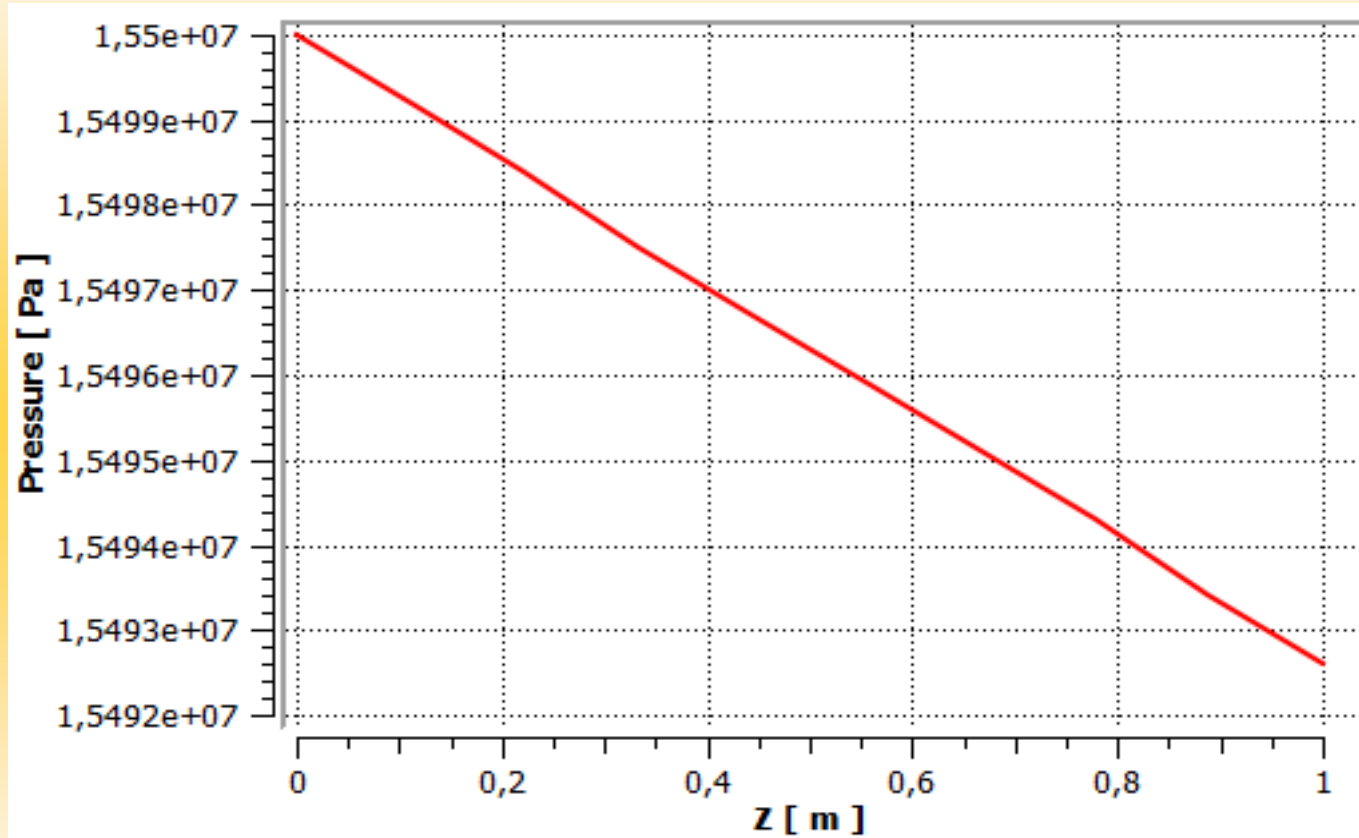
Contour de pression selon Z



Contour de pression selon Z

Chapitre VI: Résultats et discussion

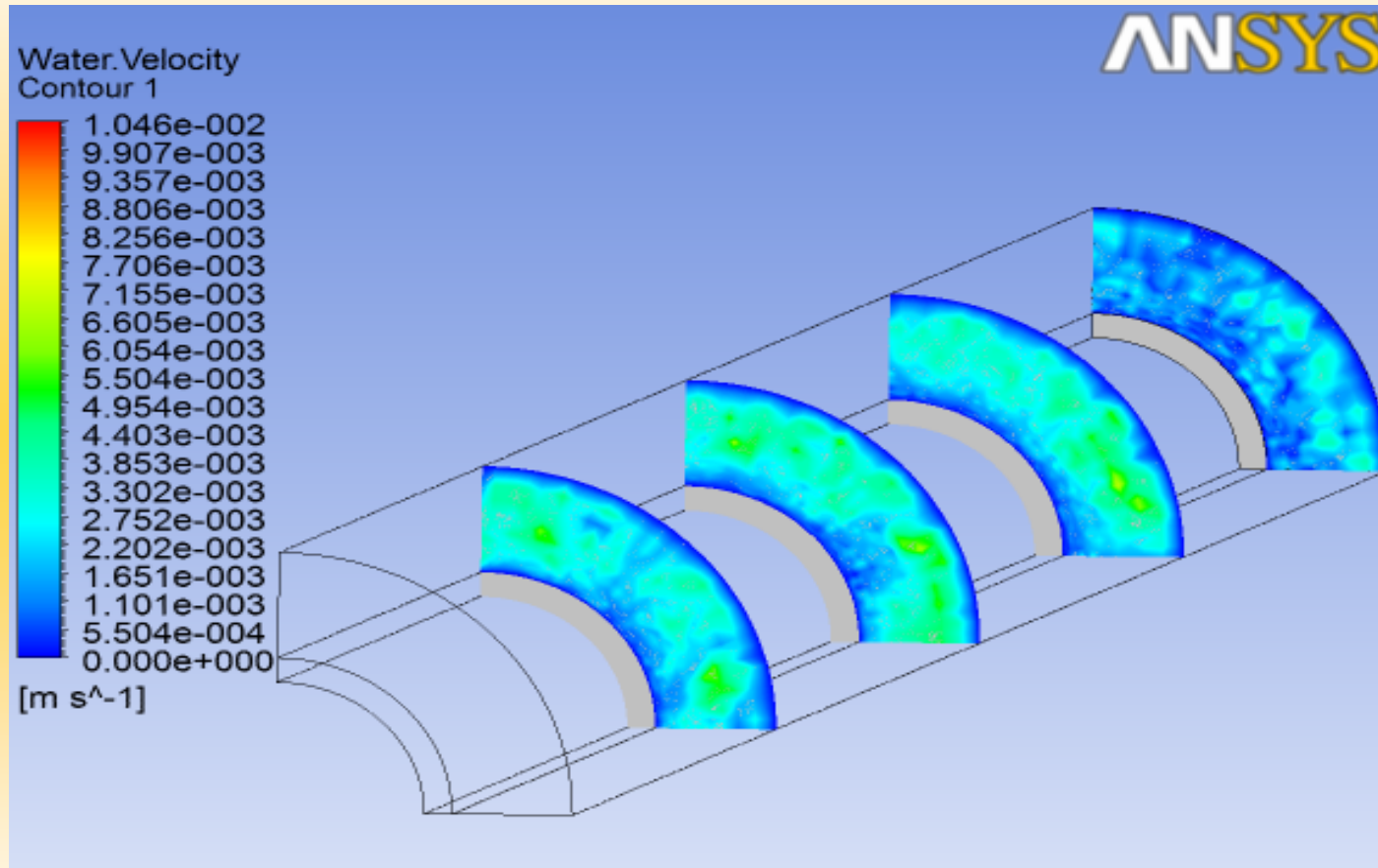
Variation axiale de la pression de l'eau



Variation axiale de la pression de l'eau

Chapitre VI: Résultats et discussion

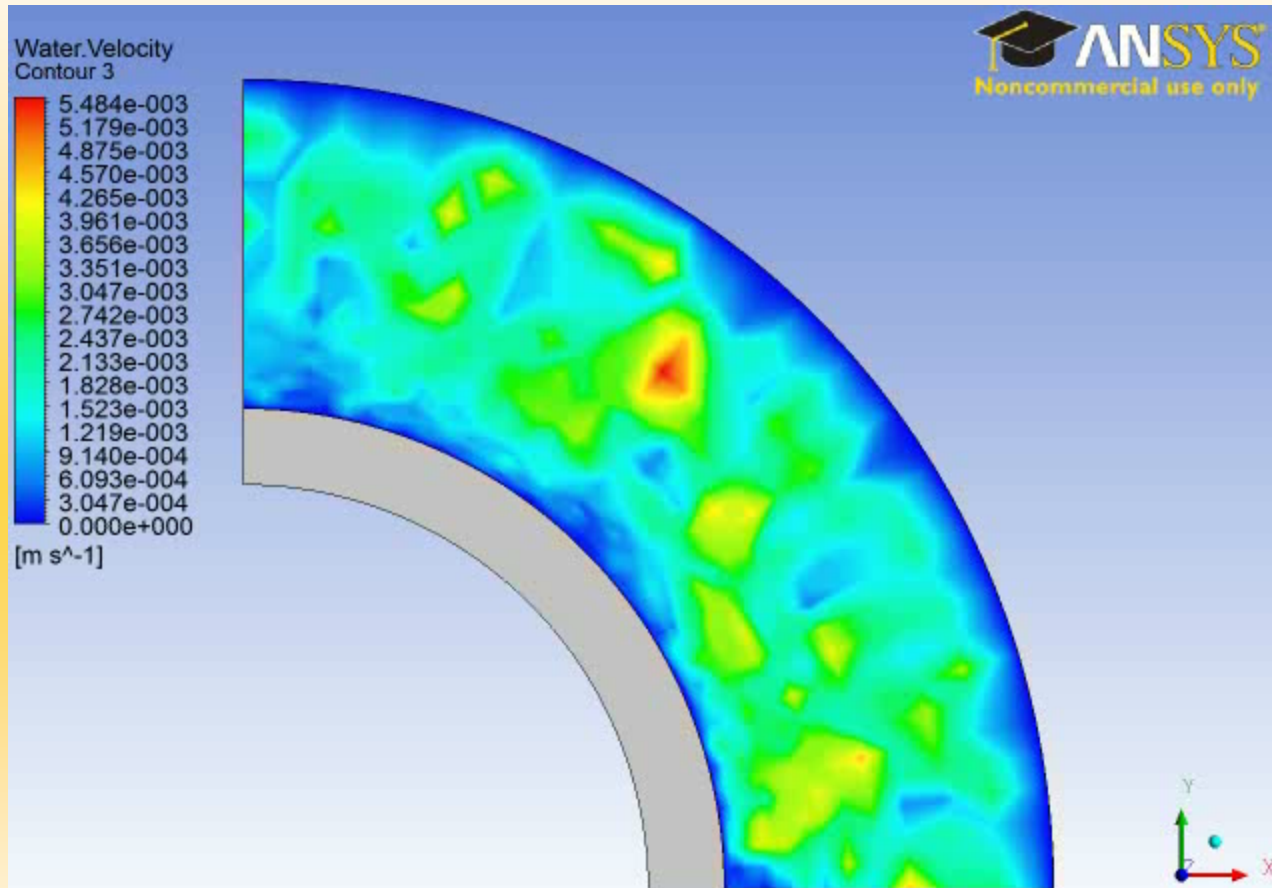
le contour de la variation radiale de la vitesse de l'eau,



contour de la variation radiale de la vitesse de l'eau

Chapitre VI: Résultats et discussion

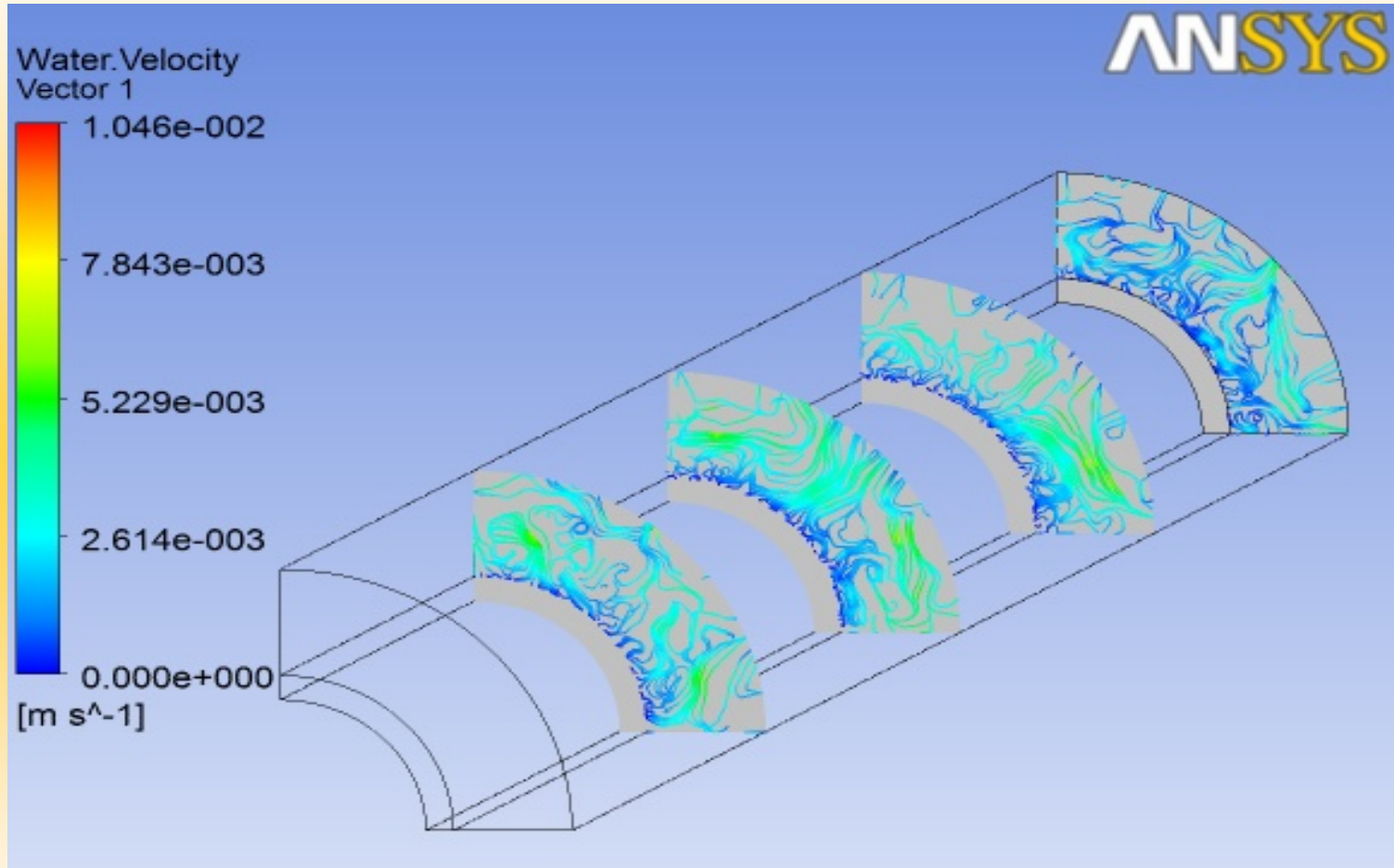
Contour de vitesse à Z=0,5 m en fonction du temps



Contour de vitesse à Z=0,5 m en fonction du temps

Chapitre VI: Résultats et discussion

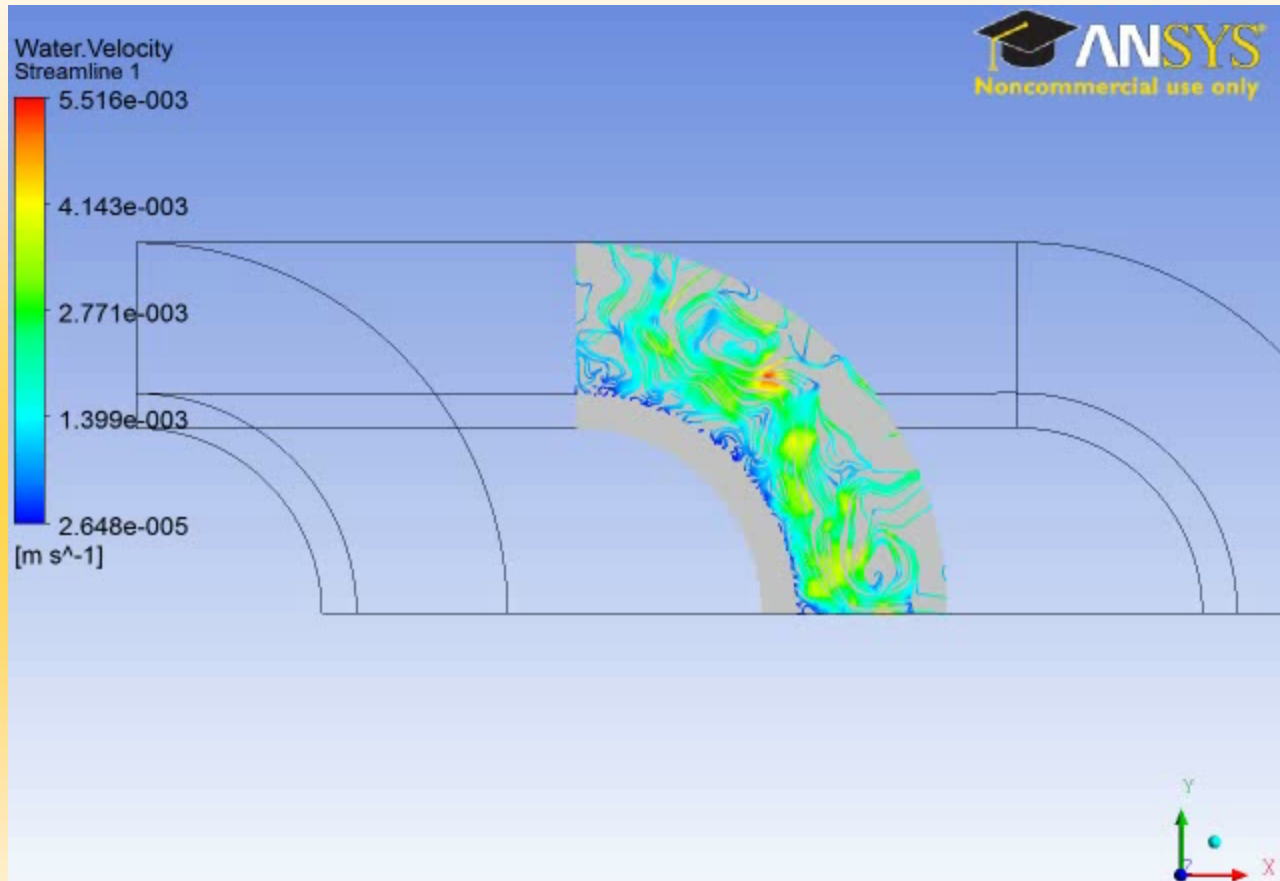
Contour des lignes de courant surfacique



Contour des lignes de courant surfacique

Chapitre VI: Résultats et discussion

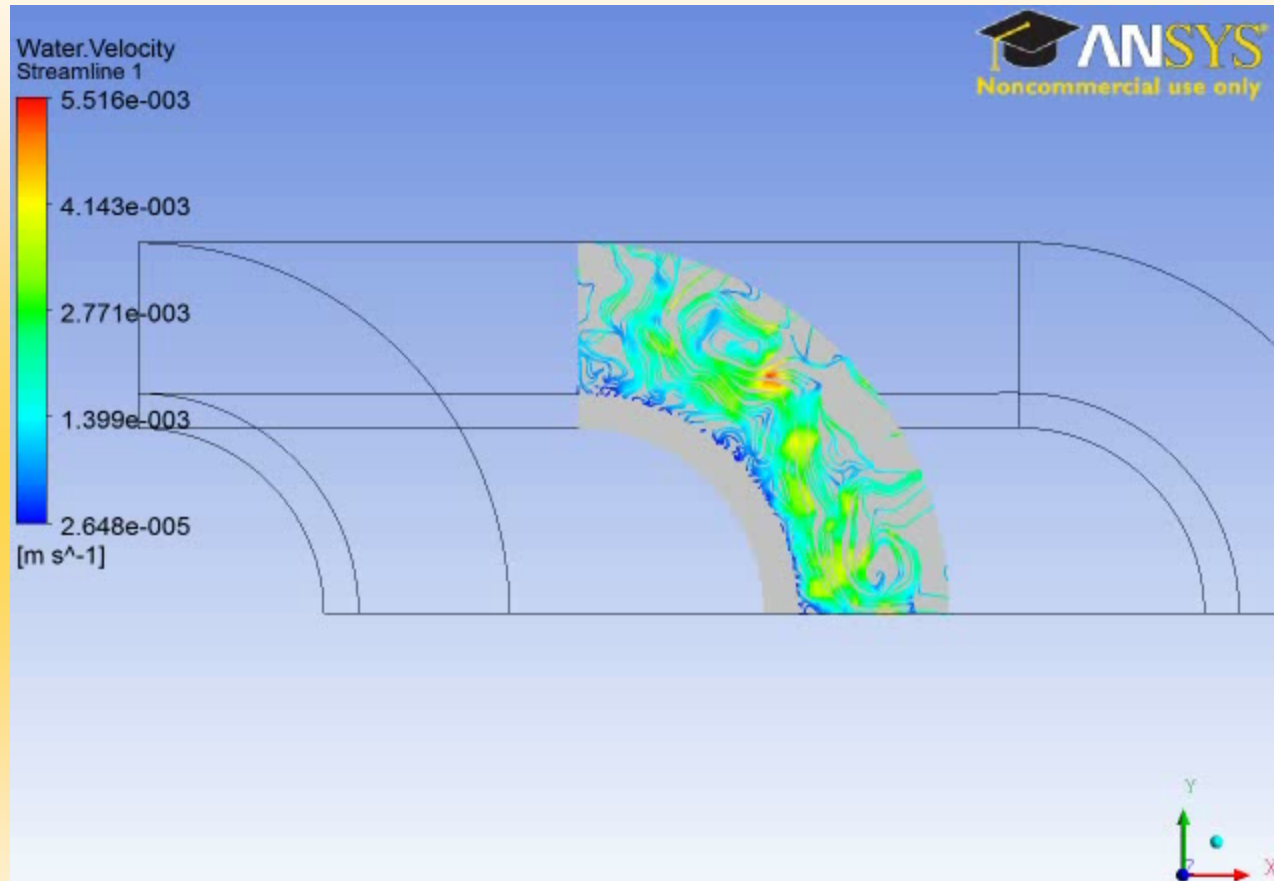
Ligne de courant à Z=0,5 m en fonction du temps



Ligne de courant à Z=0,5 m en fonction du temps

Chapitre VI: Résultats et discussion

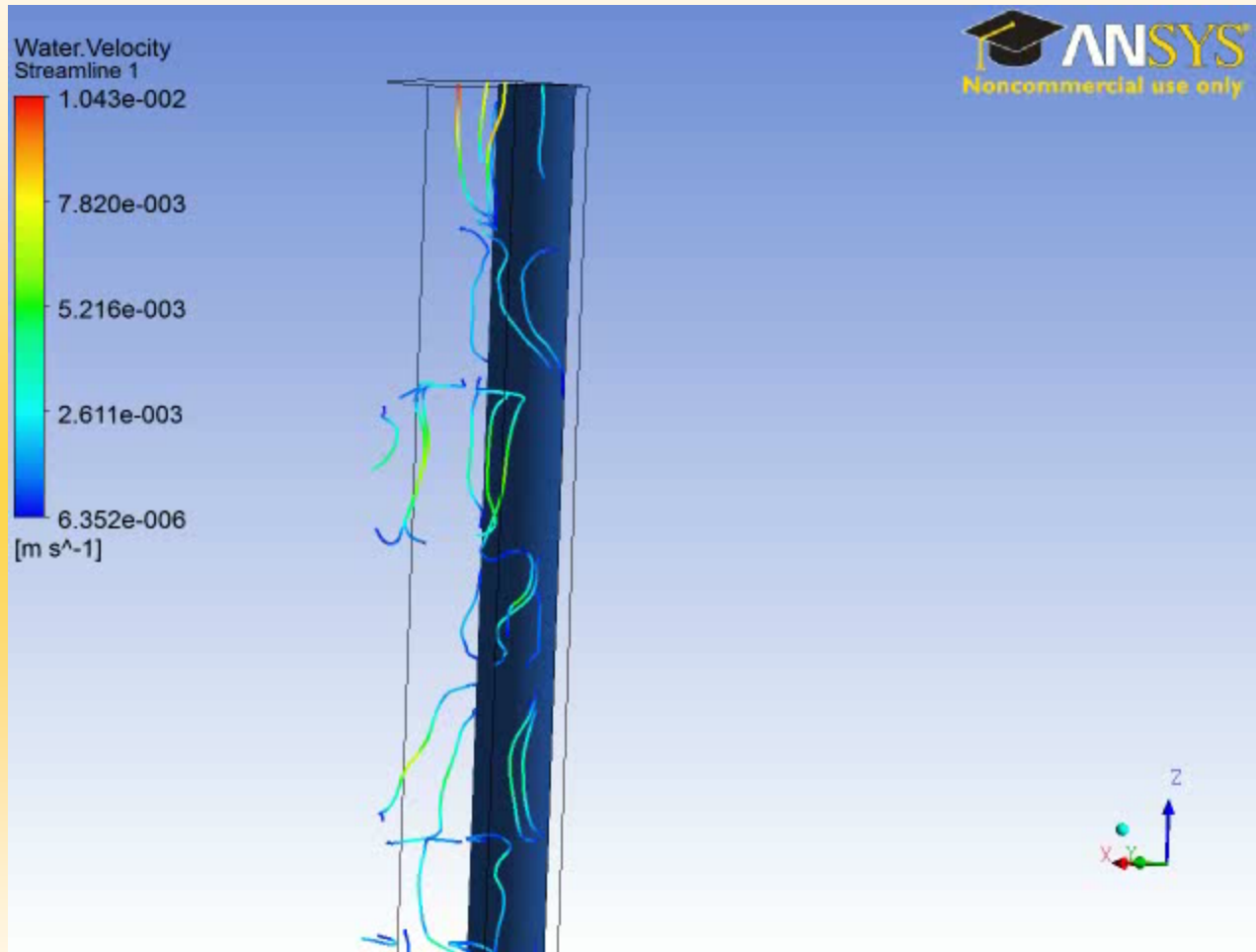
Lignes de courant à $t=5$ s selon Z



Lignes de courant à $t=5$ s selon Z

Chapitre VI: Résultats et discussion

Lignes de courant en 3D en fonction du temps

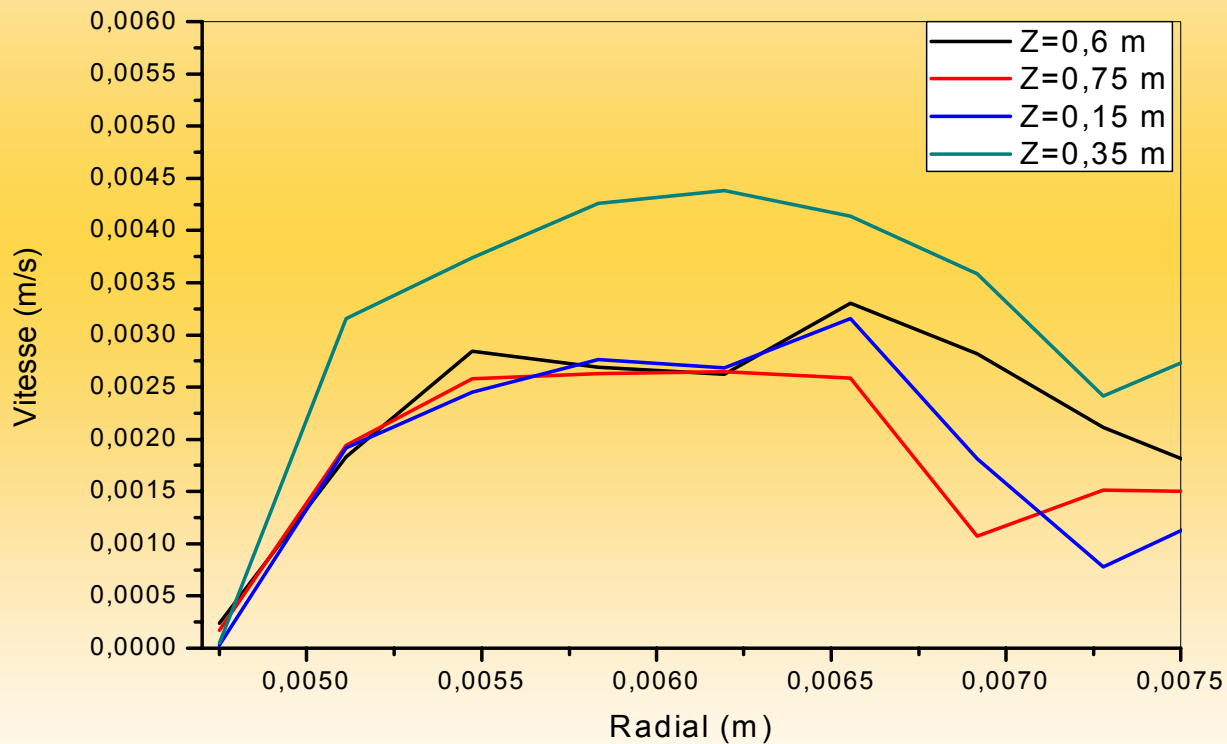


Lignes de courant en 3D en fonction du temps

Chapitre VI: Résultats et discussion

Variation radiale de la vitesse

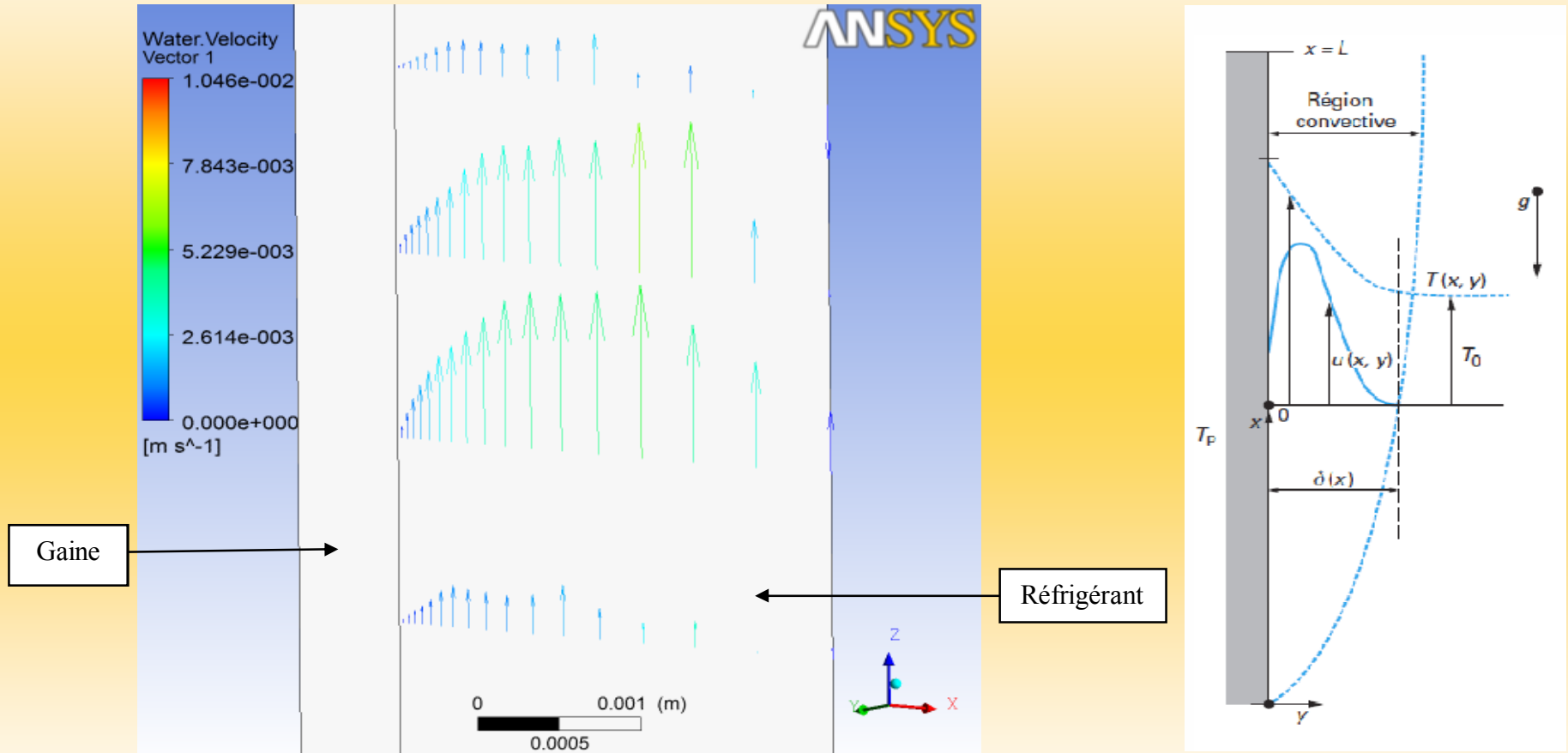
Nous remarquons que les vitesses radiales sont positives et dirigées vers le haut du canal de réfrigération selon les vecteurs vitesse du plan vertical. Il est clair que le profil de vitesse radiale prend la forme gaussienne qui nous informe sur l'importance de la vitesse entre les deux sources froide et chaude.



Variation radiale de la vitesse

Chapitre VI: Résultats et discussion

Variation radiale des vecteurs de vitesse

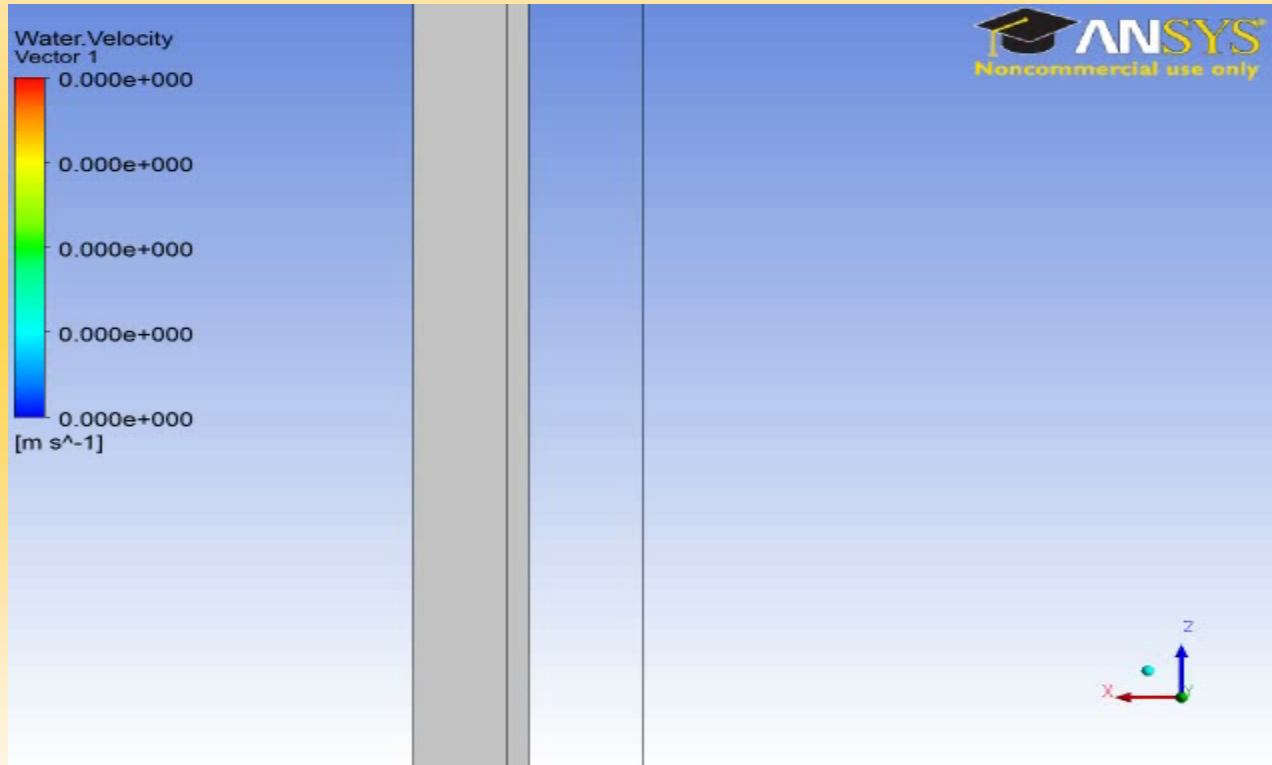


Variation radiale des vecteurs de vitesse

Chapitre VI: Résultats et discussion

Vecteur vitesse sur un plan vertical en fonction du temps

Nous avons jugé utile de montrer ce champ du vecteur vitesse pour bien visualiser le développement de l'écoulement près des parois actives, donné sous forme de contour, de ligne de courant et de vecteur de vitesse,



Vecteur vitesse sur un plan vertical en fonction du temps

Chapitre VI: Résultats et discussion

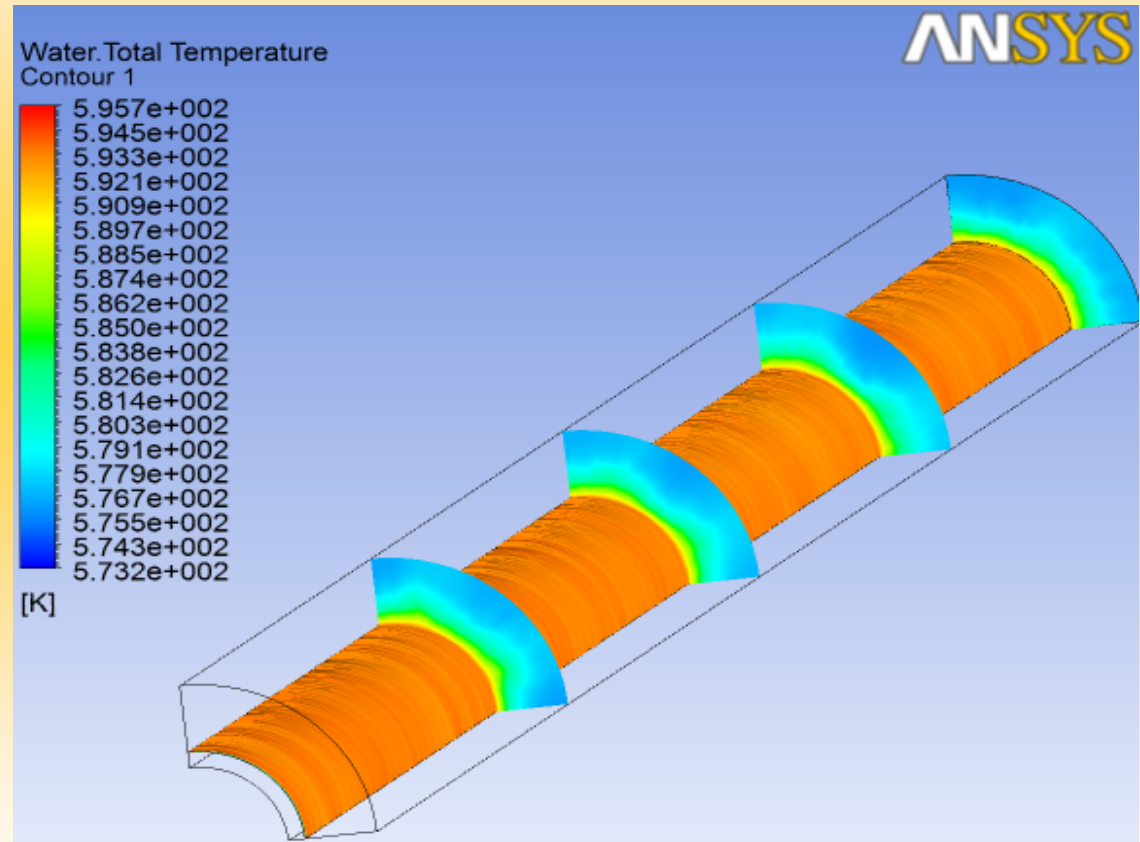
contours de température

- Le champ thermique est représenté par les contours de température, illustrés respectivement sur les figures suivantes.

Chapitre VI: Résultats et discussion

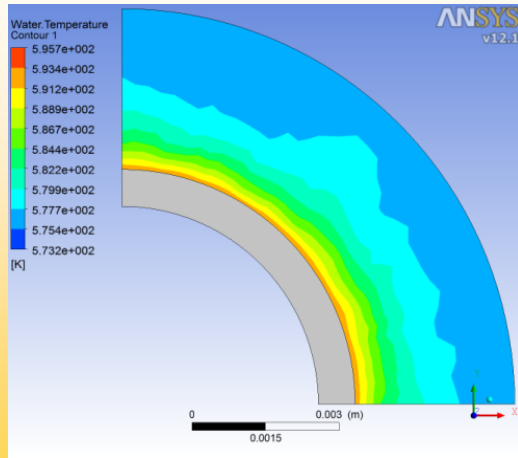
Contour de la variation radiale et axiale de la température de l'eau

- Ces contours montrent bien l'existence d'une paroi chaude à partir de laquelle se créent des mouvements convectifs du fluides chaud qui se refroidi en contact avec d'autres particules froides.

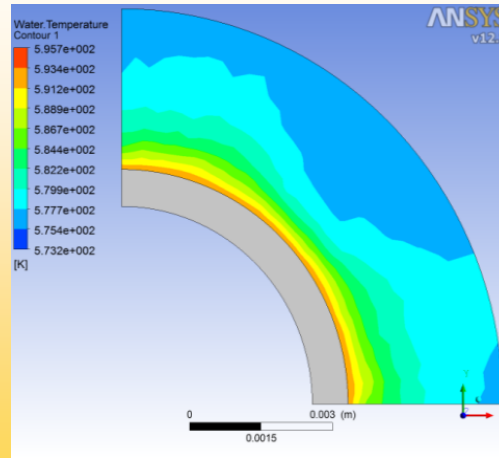


Contour de la variation radiale et axiale de la température de l'eau

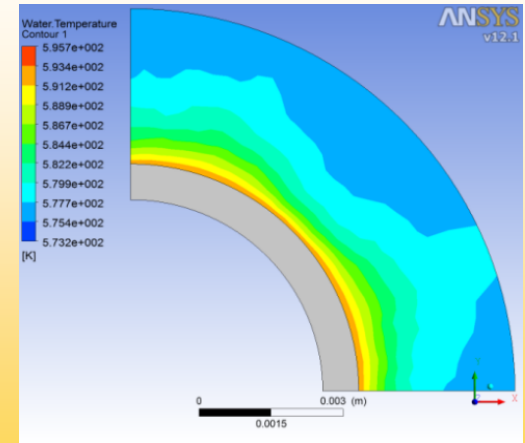
Chapitre VI: Résultats et discussion



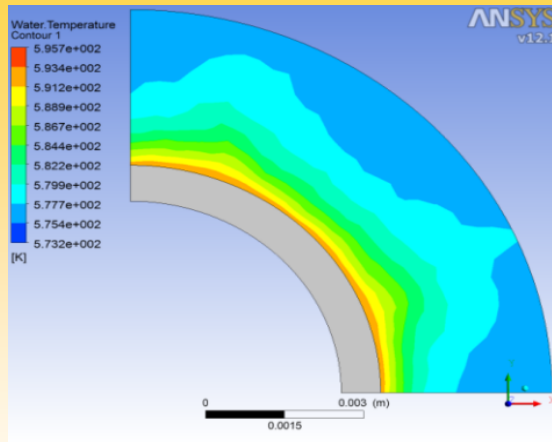
Z=0 m



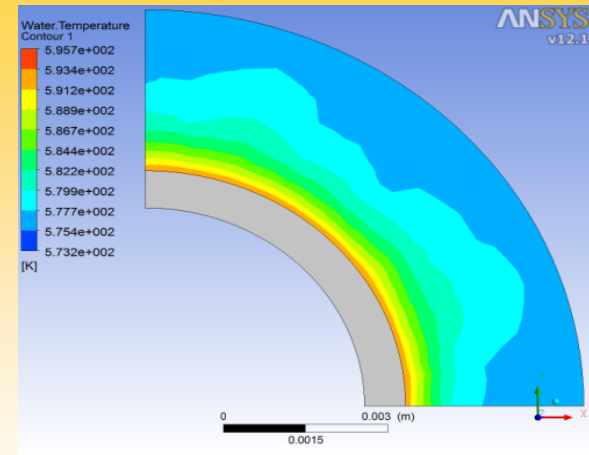
Z=0,25 m



Z=0,5 m



Z=0,75 m

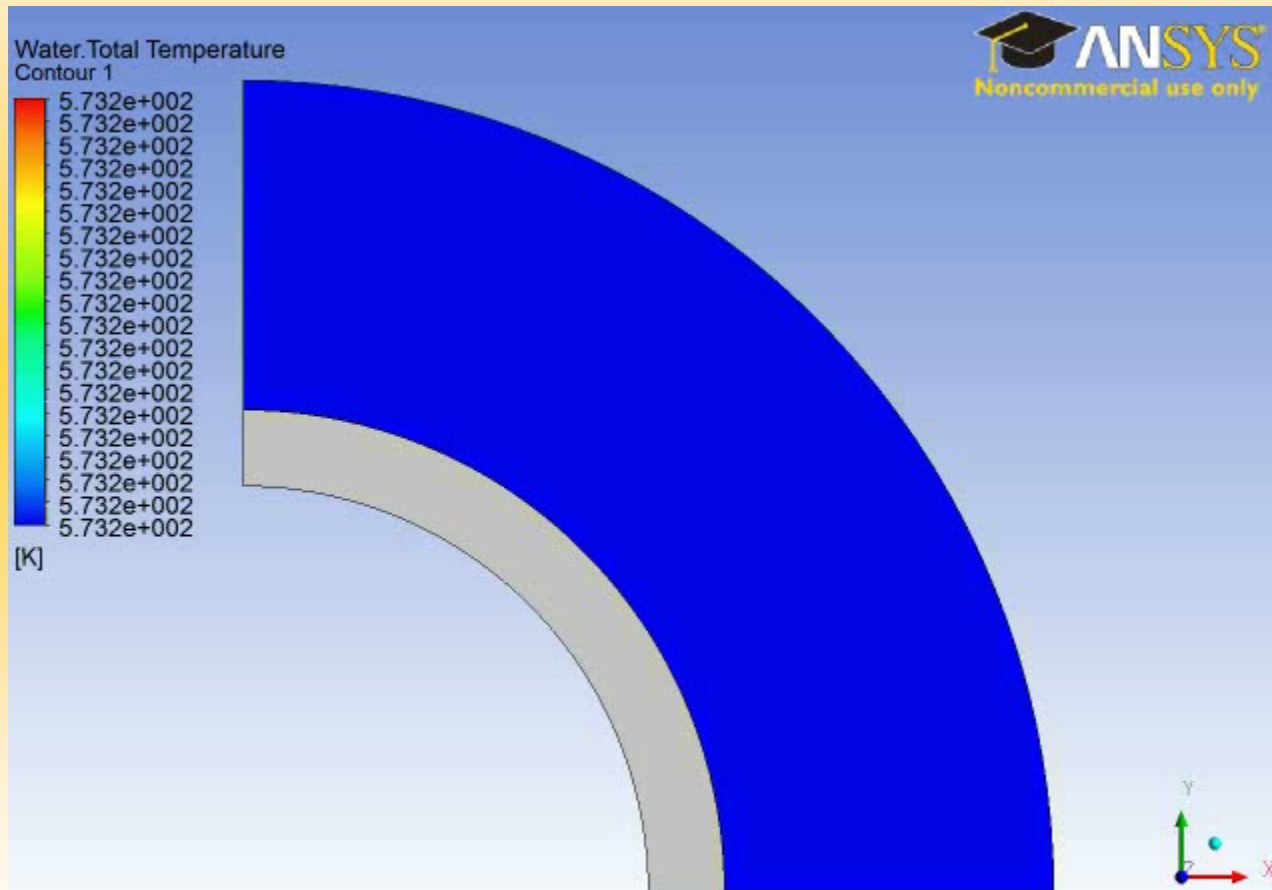


Z=1 m

Chapitre VI: Résultats et discussion

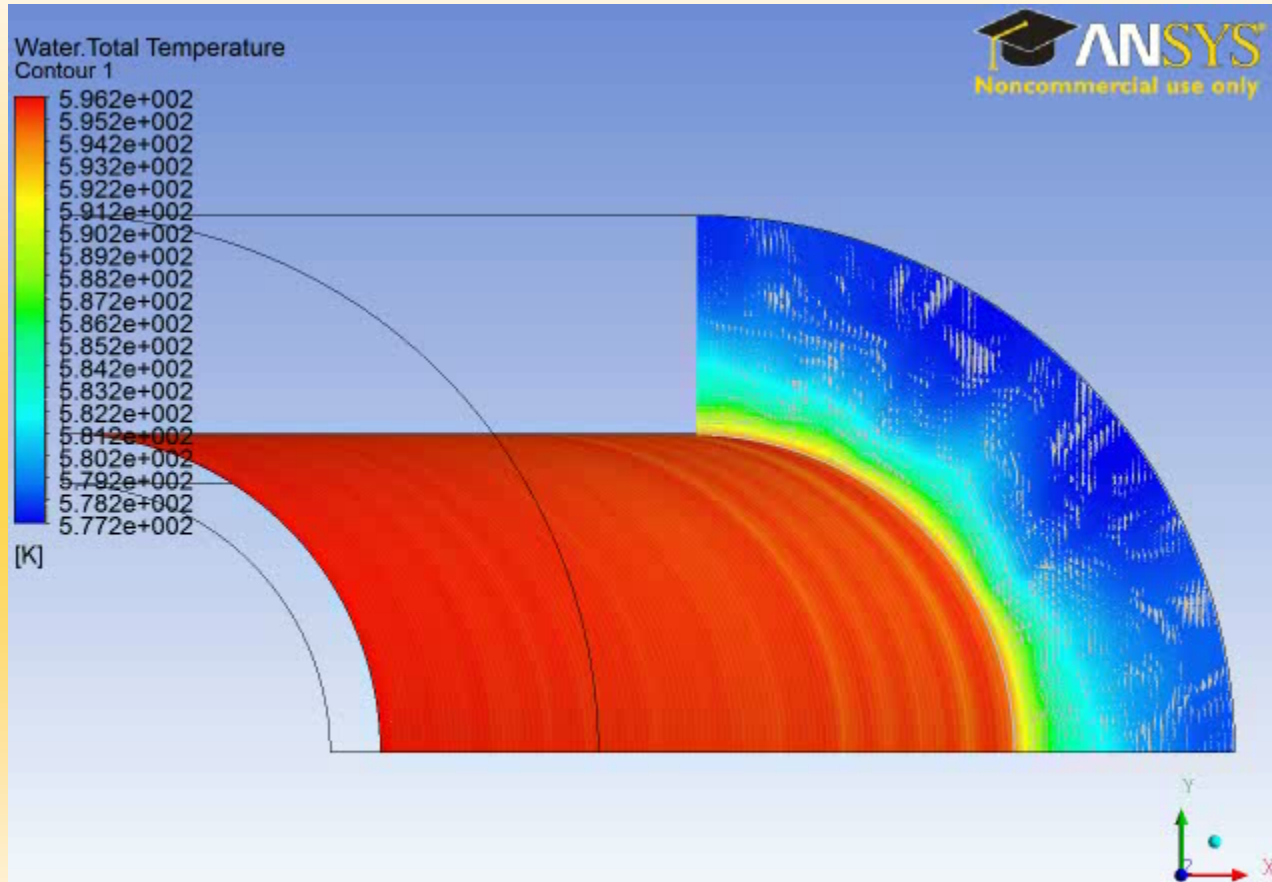
Contour de température à $Z=0,5$ en fonction du temps

Les températures maximales sont localisées au niveau de la couche limite. Sous l'effet du mouvement convectif, les bouffées chaudes du liquide sont envoyées loin de la gaine.



Chapitre VI: Résultats et discussion

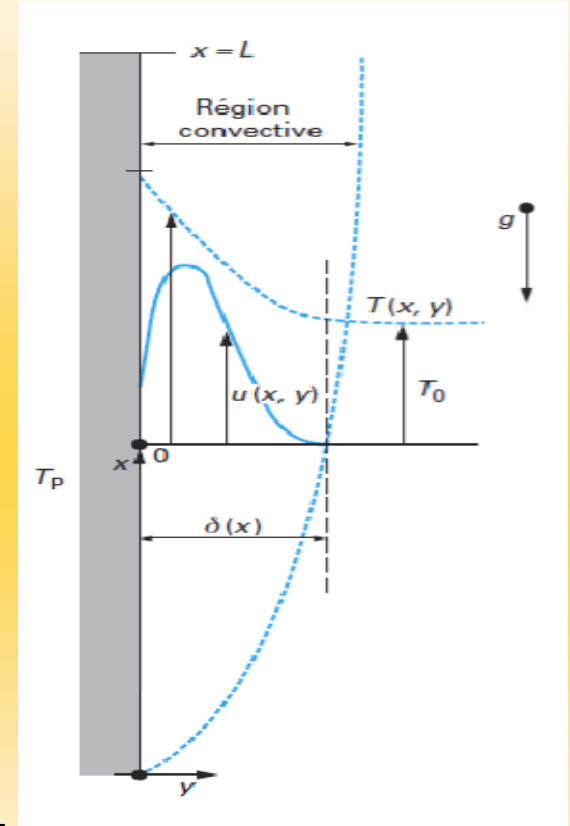
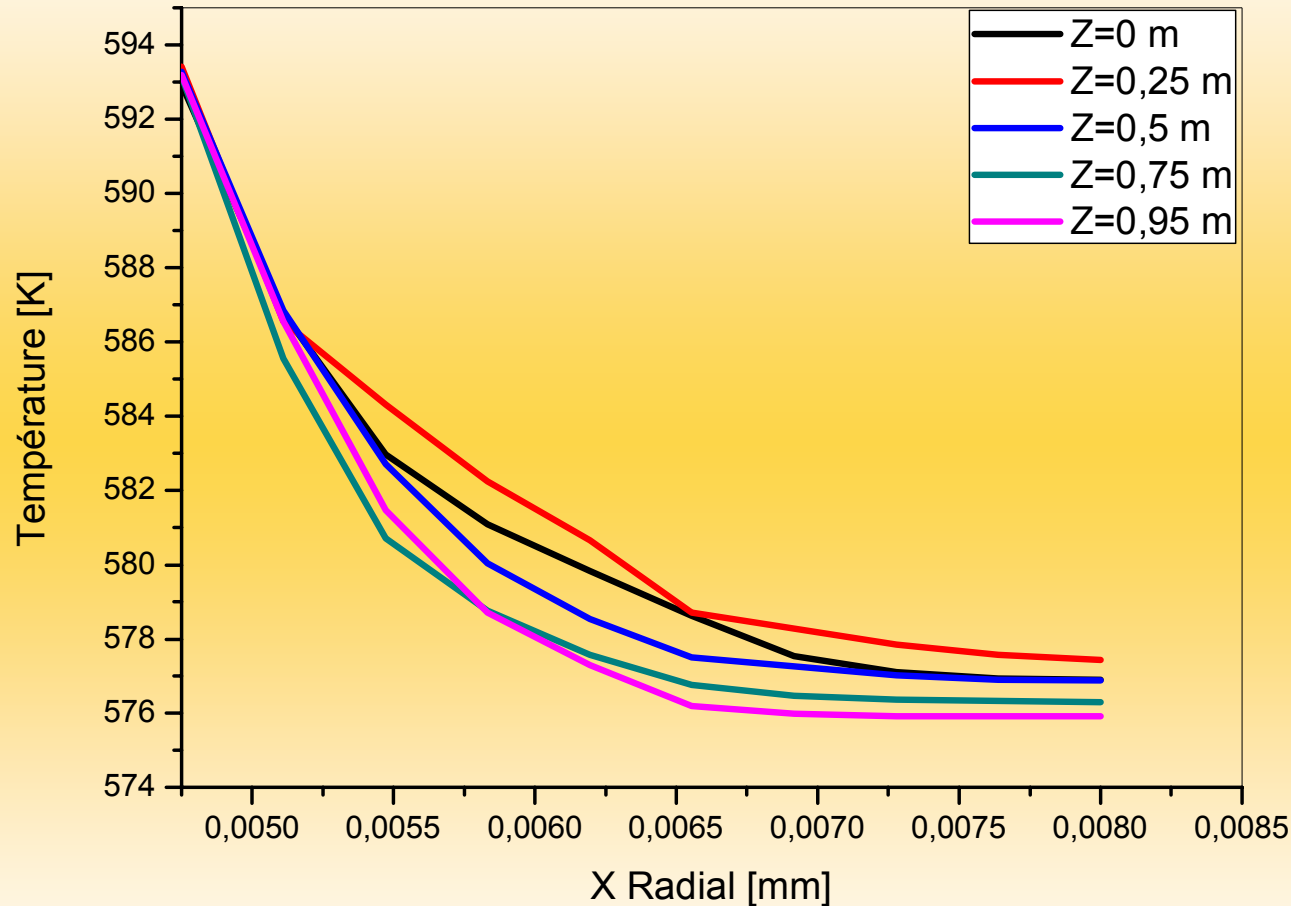
Contour de température à $t=5$ s selon Z



Contour de température à $t=5$ s selon Z

Chapitre VI: Résultats et discussion

Variation radiale de la température de l'eau



Variation radiale de la température de l'eau

Conclusion générale

Modélisation CFD de la convection naturelle dans un canal expérimental d'une boucle pressurisée sous solveur CFD

- Dans ce mémoire, nous avons étudiés numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle au sein d'un canal de réfrigération d'une boucle expérimentale suite à un accident d'arrêt des pompes primaire. L'écoulement du fluide est dû essentiellement à la différence de température entre la gaine et le réfrigérant.
- La configuration géométrique du modèle physique est un canal cylindrique contient un élément combustible entouré du fluide caloporteur de type eau, soumis à un gradient de température radial. Les conditions aux frontières sont imposées par une densité de flux de chaleur à la surface de la gaine.
- Notre problème se situe en régime instationnaire, c'est-à-dire, que l'on prend en compte l'évolution du phénomène au cours du temps. Nous avons également considéré que le seul échange était le transfert convectif.

Conclusion générale

suite

- En se basant sur l'approximation de Boussinesq, nous avons réalisés un modèle sous ANSYS-CFX décrivant le phénomène de convection naturelle en régime laminaire. La discrétisation des équations de quantité de mouvement et d'énergie a été effectuée avec la méthode des volumes finis qui nous a permis de présenter les champs thermique et dynamique, les profils de vitesse et de la température dans le canal.

- La détermination du champ d'écoulement nous a permis d'analyser le comportement du fluide à l'intérieur du canal.

Conclusion générale

Perspectives

- Afin de continuer les recherches dans ce domaine d'étude, qui concerne le transfert de chaleur par convection naturelle dans des canaux de réfrigération, nous recommandons :
- D'étendre cette étude à d'autres formes et configurations plus complexes ;
- L'étude du problème dans le cas de l'écoulement en régime turbulent ;
- Introduire le mode de transfert de chaleur par rayonnement.

Merci pour votre attention