



Rapport de stage de fin d'études

---

# Unification des produits du logiciel FLICA 4

---

GIZARD Stanislas

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIE ALTERNATIVES

Tuteur : Anouar MEKKAS

## Remerciements

Je remercie avant tout mon tuteur Anouar MEKKAS qui m'a accueilli lors de mon arrivée au CEA et qui a été présent tout le long du stage. Je remercie aussi Florian ABEGUILE de la société CS (COMUNICATION&SYSTEME) pour son aide précieuse et pour m'avoir donné une formation sur Flica4.

Je remercie aussi les autres membres du LMEC notamment Olivier THOMINE, Antoine GERSCHENFELD, Yannick GORSSE, Mickael NDINJGA, Sandrine GYURAN, Edwige RICHEBOIS et Stéphane DELLACHERIE qui m'a aussi donné des cours à Sup Galilée pour leur bon accueil et leur bonne humeur.

Je remercie également mes deux collègues de bureau, Arthur TALPAERT et KIEU PHONG NGUYEN en thèse au CEA pour leur coopération ainsi que Hakim BOUMAZA mon tuteur à Sup Galilée.

Merci tout particulièrement à M. Olivier Laffitte directeur de ma formation et conseiller scientifique au CEA de m'avoir aidé et permis d'effectuer ce stage.

## Contexte du stage

J'ai réalisé mon stage de fin d'études au CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). Ce stage s'inscrit dans mon cursus scolaire au sein de la formation MACS de SupGalilée.

### Présentation du CEA

Le CEA a été créé en 1945 par le général de Gaulle et Frédéric Joliot-Curie dans le but de poursuivre des recherches scientifique et technique en vue de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans le domaine de la science de l'industrie et de la défense nationale. Historiquement dénommé Commissariat à l'énergie atomique, il a changé de nom en 2010 pour devenir le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Le commissariat à l'énergie atomique est dirigé par le haut commissaire à l'énergie atomique et l'administrateur général nommés par le président de la République. Les activités scientifiques et technologiques de l'entreprise sont partagées en quatre grands pôles :

- la direction des sciences de la matière (DSM),
- la direction des recherches technologiques (DRT),
- la direction de l'énergie nucléaire- (DEN),
- la direction des applications militaires (DAM),
- la direction des sciences du vivant (DSV).

Le CEA est composé de 10 centres d'étude dont les principaux sont implantés à Cadarache, Marcoule, Saclay, Fontenay aux roses et Grenoble, actuellement il est composé d'environ 16000 ingénieurs, chercheurs et collaborateurs (dont 5000 à Saclay).

J'ai effectué mon stage dans le centre de Saclay qui est le plus grand des 10 centres et un centre de recherche de premier plan au niveau européen au sein de la DEN, plus précisément au département de modélisation des systèmes et structures (DM2S), dans le service de thermohydraulique et mécanique des fluides (STMF) ; le laboratoire qui m'a accueilli est le LMEC (laboratoire de modélisation et de simulation à l'échelle composant) (DEN/DANS/DM2S/STMF/LMEC) .

Les activités du pôle nucléaire DEN du CEA se déploient principalement sur trois sites. Saclay où se trouvent la Direction déléguée aux Activités Nucléaires de Saclay (DANS) tournée plus particulièrement vers la recherche amont sur les matériaux, le calcul intensif et la simulation numérique Cadarache, orienté vers la recherche sur les réacteurs (physique des cœurs, conception, technologie, sûreté) et sur leurs combustibles (comportement en service et en situation accidentelle, nouveaux concepts ), Marcoule qui constitue un pôle scientifique de pointe sur le cycle du combustible, dans les domaines amont et aval avec des outils expérimentaux uniques (laboratoire Atalante) et des compétences reconnues en chimie des actinides.

Le Département de modélisation des systèmes et structures (DM2S) appartient à la Direction de l'Énergie Nucléaire de Saclay. Le domaine d'activité du DM2S est centré autour de la simulation, la conception et l'évaluation des systèmes nucléaires et plus largement des systèmes énergétiques.

Le service STMF a comme activité porte sur le développement, la qualification, l'exploitation de logiciels de simulation numérique en thermohydraulique dans le domaine des réacteurs nucléaires, ainsi que les développements et exploitations des installations expérimentales et d'instrumentations adaptées à la qualification. Ses outils d'études portent sur :

- Modélisation échelle système (circuit primaire...),
- Modélisation échelle composant (cœur et générateur de vapeur),
- Modélisation échelle locale.

Le LMEC s'intéresse à la modélisation à l'échelle composant et aux développements des codes de calcul de thermohydraulique FLICA4 et MC2 pour les cœurs de réacteurs et GENEPI pour les générateurs de vapeurs.

## Table des matières

I.	Introduction.....	7
II.	FLICA4.....	8
1	Généralités .....	8
2	Description fonctionnelle .....	8
3	Calcul FLICA4 .....	9
4	Description détaillée .....	10
	Équations physiques.....	10
	Modélisation physique – quelques lois de fermeture.....	11
	Méthode numérique .....	14
III.	Unification du code de calcul FLICA4 .....	16
1	Démarche .....	16
2	Phase d'intégration .....	17
3	Phase Vérification & Validation.....	18
4	Nouvel outil de compilation .....	19
IV.	Quelques résultats numériques .....	20
V.	Conclusion .....	22

## Tables des figures

Figure 1 Ecoulement d'eau entre deux parois chauffantes .....	12
Figure 2 Exemples de branches sous l'outil GIT .....	17
Figure 3 Interface graphique SmartGIT .....	18
Figure 4 Lancement des tests de non-régression.....	18
Figure 5 Résultats des tests de non-régression.....	19
Figure 6 Domaine de calcul du cœur RJH.....	20
Figure 7 Répartition de la température liquide RJH.....	20
Figure 8 Taux de vide RJH.....	21

## I. Introduction

Le code de calcul FLICA4 est un logiciel de simulation thermohydraulique diphasique, dédié à l'analyse des écoulements dans les cœurs de réacteurs nucléaires. FLICA4 se décline en 4 produits. Un produit PUB qui représente des sources communes à tous les autres produits (structures de données, schémas numériques,...) et trois autres produits LETR, STANDARD et PN constituent des sources spécifiques (modélisation,...) à nos clients et partenaires.

Dans le cadre de l'amélioration de la gestion informatique du logiciel FLICA4, le laboratoire de modélisation et de simulation à l'échelle composant (LMEC) souhaite unifier les 4 produits FLICA4 et supprimer la notion de produit dans FLICA4. Pour les spécificités (corrélations, modèles, ...) présentes dans les produits supprimés, un système de bibliothèques externes sera mis en place pour chaque client (propulsion navale,...). Cette unification permettra d'une part d'éviter les reports des développements (lignes de code) lors du cycle de vie du logiciel et d'autre part d'utiliser des systèmes de compilation standard tels que autotools ou Cmake.

L'objectif du stage consiste donc à unifier les quatre produits du logiciel Flica4 pour en faciliter l'utilisation et en améliorer la gestion informatique. Pour ce faire, une identification des fonctionnalités à rapatrier pour chaque produit est nécessaire. Une méthodologie d'unification des produits FLICA4 a été proposée par le CEA et suivie tout au long du stage. Dans les grandes lignes, cette méthodologie consiste à commencer l'unification du code FLICA4 par le produit LETR qui est le moins sensible (moins de contrainte clients). Enfin une fois l'unification faite le produit commun sera renommé Flica4 et il sera possible d'utiliser des logiciels de compilation standard comme Cmake.

Dans ce rapport, la deuxième section est consacrée à une description succincte du code de calcul FLICA4. Dans la troisième section, nous décrivons la démarche suivie pour l'unification du code FLICA4. La quatrième section montre quelques résultats numériques.

## II. FLICA4

### 1 Généralités

FLICA4 est un logiciel de simulation thermohydraulique diphasique dédié à l'analyse des écoulements dans les cœurs de réacteurs nucléaires. Il se décline en 4 produits PUB, LETR, PN, STANDARD :

- **PUB** représente les sources communes à tous les autres produits (schémas numériques, structure de données,...) et les autres des sources spécifique aux clients et partenaires du CEA (IRSN, AREVA,...). Ce produit est utilisé par le CEA et ces partenaires français et étranger dans le cadre des projets Européens.
- **PN** (propulsion navale) est utilisé par AREVA-TA pour la conception et la production des réacteurs nucléaires de propulsion navale des sous-marins de la flotte militaire française.
- **LETR** est utilisé par les membres du laboratoire LMEC, pour des calculs exploratoires.
- **STANDARD** est un produit qui reprend les corrélations et la validation physique du logiciel FLICA3.

FLICA4 est basé sur plusieurs langages :

- *GIBIANE* (langage propre au CEA) : le langage de commande interprété GIBIANE,
- *ESOPE* (langage propre au CEA) : est une extension du langage fortran 77. L'apport de ce langage par rapport au FORTRAN77 est de faciliter la gestion des données et de permettre la notion d'objet par la structuration des données.
- C,
- C++,
- FORTRAN77.

Le code est organisé en modules, composé d'au moins un fichier ESOPE, qui sont appelés par des procédures et réalisent des calculs spécifiques. Il reprend les principes d'un précédent code FLICA3.

Il existe aussi un **atelier logiciel** composé de scripts python [10] utile à l'évaluation de l'état du code (validation, non-régression, portabilité, couverture des tests). Cette évaluation consiste à s'assurer qu'une modification du code n'entraîne pas de différences trop importantes entre les nouvelles grandeurs calculées et les grandeurs de références (le seuil en dessous duquel il est considéré qu'il n'y a pas de régression est fixé à  $1.10^{-5}$  pour FLICA4).

### 2 Description fonctionnelle

- **Équations physiques**

Le modèle thermohydraulique diphasique utilisé est constitué par trois équations de bilan définies pour le mélange diphasique, complétées par une équation de bilan de masse pour la phase vapeur et deux lois de fermeture sur l'énergie et la vitesse de la phase vapeur (modèle dit « à quatre équations »). Des équations supplémentaires de transport de concentration peuvent également être prises en compte. Ces équations sont tridimensionnelles. Un modèle de thermique combustible unidimensionnel est utilisé pour



prendre en compte le couplage entre la thermique combustible et la thermohydraulique. Un modèle de cinétique neutronique point est également disponible.

- **Méthodes numériques**

Les équations du modèle décrit ci-dessus sont résolues sur des maillages semi-structurés (non structurés selon le plan radial du cœur, structuré suivant la hauteur) par une méthode numérique de type volumes finis : schéma de Roe étendu pour le système convectif à 4 équations et VF9 et diamant pour les termes de diffusion. Il est également possible de traiter des maillages axiaux non-conformes par couplage en sous-domaines. La méthode numérique donne lieu à la constitution d'un système d'équations non linéaires résolu par une méthode de Newton Raphson. Le couplage avec la thermique combustible est pris en compte de manière implicite.

- **Géométrie**

Le domaine simulé correspond généralement au cœur du réacteur. Mais les parties amont et aval du cœur peuvent également être modélisées en 3D. La partie cœur est caractérisée par des termes de porosité et de frottement avec les parties solides qui peuvent être absents dans les parties amont et aval. Divers termes sources (énergie et quantité de mouvement) permettent de modéliser les échanges avec les parties solides (combustible, frottement, etc.).

- **Grandeurs calculées**

Les variables principales calculées à chaque pas de temps sont la pression, la masse volumique du mélange diphasique, le taux de présence volumique de vapeur, la vitesse du mélange diphasique et l'enthalpie du mélange diphasique. Les autres grandeurs thermohydrauliques telles que la vitesse des phases et la température des phases sont calculées à partir des lois de fermeture considérées. La température du combustible est également calculée à chaque pas de temps (dans le cas d'un calcul transitoire).

### **3 Calcul FLICA4**

Dans FLICA4, il existe deux types de calcul pour FLICA4d :

- permanent : le calcul permanent a pour objectif de rechercher un régime stationnaire (ou permanent) des écoulements. Cette recherche se fait de manière itérative avec une initialisation d'un premier champ de variables thermohydrauliques puis des itérations avec des calculs successifs des variables thermohydrauliques et à chaque itération on teste si les variables au temps  $t-1$  et  $t$  sont suffisamment proches : si oui alors la convergence vers la solution permanente est atteinte.
- transitoire : le calcul transitoire a pour objectif de calculer un écoulement transitoire. L'initialisation s'effectue à l'aide du régime permanent convergé correspondant au temps de départ, les conditions aux limites et variables sont ensuite calculées à chaque itération en temps et un test de fin du transitoire permet d'arrêter le calcul.

La réalisation d'un calcul FLICA4 se fait via un jeu de données composé de 5 fichiers :

- **Entete** : description des options de modélisation physique, des schémas numériques et post-traitement standards.
- **Geometrie** : description de l'objet étudié, des éléments combustibles, des maillages axiaux et radiaux.
- **Cdlim** : spécification des conditions aux limites en entrée/sortie du domaine modélisé. La pression en sortie (c'est-à-dire en haut du cœur), la vitesse massique/débit, la température/enthalpie et la concentration en entrée (en bas du cœur).
- **Puissance** : spécification du flux thermique en présence de parois chauffantes et/ou de sources volumiques de puissance.
- **Test\_sequence.p** et/ou **test\_iteration.p** : spécifications de post-traitements « utilisateurs » en fin de calcul ou à chaque itération.

## 4 Description détaillée

### Équations physiques

Dans FLICA4, le système d'équations en diphasique repose sur 3 équations de conservation pour le mélange diphasique, 1 équation de conservation de la masse vapeur et 2 lois de fermeture pour les déséquilibres cinématiques et thermodynamique entre phases [8]. Dans la suite du rapport on désigne par l'indice  $k = l$  les grandeurs relatives à la phase liquide et  $k=v$  celles relatives à la phase vapeur. Les variables principales  $(U_i)_{i=1,6}$  du code FLICA4d sont appelés les variables conservatives, ce sont :

- la masse volumique moyenne  $U_1 = \rho$
- la fraction massique de vapeur  $U_2 = \rho c$
- la vitesse massique  $\rho \vec{u}$  dans les directions X, Y, Z ( $U_3 = \rho u^Z, U_4 = \rho u^X, U_5 = \rho u^Y$ )
- l'énergie totale  $U_6 = \rho E$

Chaque variable peut se décomposer en fonction de valeurs phasiques pour le liquide et la vapeur :

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho c \\ \rho u^Z \\ \rho u^X \\ \rho u^Y \\ \rho E \end{pmatrix} = (1 - \alpha) \rho_l \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ u_l^Z \\ u_l^X \\ u_l^Y \\ E_l \end{pmatrix} + \alpha \rho_v \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ u_v^Z \\ u_v^X \\ u_v^Y \\ E_v \end{pmatrix}$$

$c$  désigne la concentration de la masse vapeur,  $\vec{u} = (u^X, u^Y, u^Z)$  le vecteur vitesse,  $\alpha$  est le taux de vide ou taux de présence de vapeur. La direction Z est la direction privilégiée de l'écoulement qui figure donc en premier dans le système d'équations. Dans la suite, on notera  $\alpha_k$  le taux de présence volumique de la phase k et  $\rho_k$  la masse volumique de la phase k. Les équations de bilan s'écrivent :

- Equation de conservation de masse du mélange

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{k=v,l} \rho_k \alpha_k \right) + \text{div} \left( \sum_{k=v,l} \rho_k \alpha_k \vec{u}_k \right) = 0$$

- Equation de masse de la phase vapeur

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha_v) + \text{div}(\rho_v \alpha_v \vec{u}_v) = \Gamma + \text{div}(K_{cv} \nabla c)$$

- Equation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial}{\partial t} (\sum_{k=l,v} \rho_k \alpha_k \vec{u}_k) + \text{div}(\sum_{k=l,v} (\rho_k \alpha_k \vec{u}_k \otimes \vec{u}_k + \alpha_k \sigma_k)) = \sum_{k=l,v} (\rho_k \alpha_k \vec{g} + \vec{\tau}^k)$$

- Equation d'énergie

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{k=l,v} \rho_k \alpha_k \left( e_k + \frac{\vec{u}_k^2}{2} \right) \right) + \text{div} \left( \sum_{k=l,v} \left( \rho_k \alpha_k \left( e_k + \frac{\vec{u}_k^2}{2} \right) \vec{u}_k + \alpha_k \sigma_k \cdot \vec{u}_k \right) \right) - q \\ = Q_{tot} + \sum_{k=l,v} \rho_k \alpha_k \vec{u}_k \vec{g} \end{aligned}$$

$\Gamma$  représente la vaporisation au contact des parois chauffantes et l'échange de masse à l'interface entre phases,  $K_{cv}$  le coefficient de diffusion turbulente,  $\sigma_k^{ij}$  est le tenseur des contraintes,  $\vec{g}$  le vecteur gravité,  $\vec{\tau}^k$  les forces de frottement,  $e_k$  l'énergie interne spécifique,  $q$  le flux de chaleur induit par la conduction thermique et le mélange turbulent et  $Q_{tot}$  la source de chaleur fournie au fluide.

Les deux lois de fermeture sont :

- une corrélation de vitesse entre phases :  

$$\vec{u}_v - \vec{u}_l = \vec{u}_r(\rho, c, P, \rho \vec{u}, \dots)$$
- une hypothèse sur l'énergie phase vapeur ( $h_{k,sat}$  désigne l'enthalpie spécifique à saturation) :

$$h_v = h_{v,sat}(P)$$

Il y a aussi une hypothèse d'isobarie du mélange  $P_v = P_l$

## Modélisation physique – quelques lois de fermeture

- **Echange thermique**

L'eau passant entre les crayons est chauffée par l'énergie produite par la réaction en chaîne, on représente l'échange thermique entre fluide et paroi par 3 zones. FLICA4 représente les 3 zones.

L'échange thermique entre une paroi et le fluide est défini à partir d'un coefficient d'échange thermique et des températures de paroi et du fluide

$$\varphi = \varphi_{pl} + \varphi_{pv}, \quad \varphi_{pk} = H_{pk}(T_p - T_k) \quad k = l, v$$

Mode d'échange thermique	Convection liquide	Ebullition nucléée	Ebullition en film
--------------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Nature du fluide	Liquide	Liquide et vapeur	Vapeur
Température du fluide en contact avec la paroi	$T_l < T_{sat}$	$T_l = T_{sat}$	$T_v > T_{sat}$

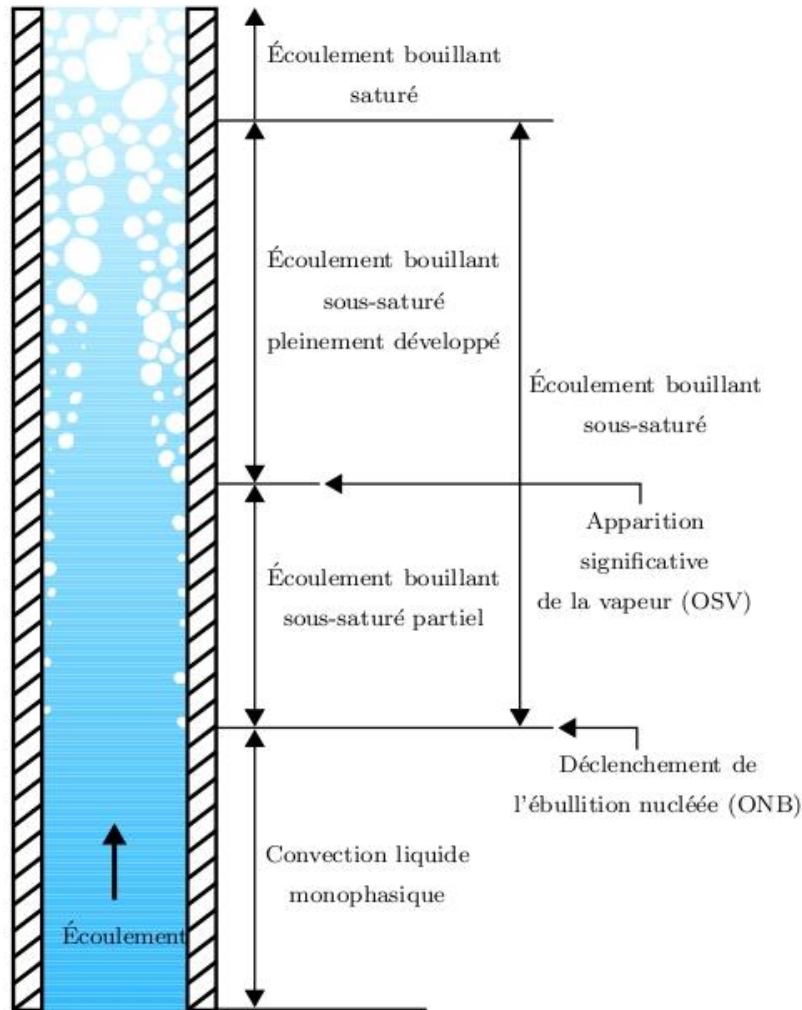


Figure 1 Écoulement d'eau entre deux parois chauffantes

Par exemple en mode **convection liquide** la corrélation de Dittus-Boelter donne

$$H_{DB} = \frac{Nu}{D_h^z} \lambda_l(P, \min\left(T_{sat}, \frac{T_p + T_l}{2}\right))$$

Avec  $D_h^z$  diamètre de la conduite,  $\lambda_l$  la conductivité thermique et Nu nombre de Nusselt qui s'exprime par :

- a) Pour un écoulement laminaire ( $Re < Re_{lam}$ ) :

$$Nu_{lam} = cste = 4.36$$

- b) Pour un écoulement turbulent ( $Re > Re_{turb}$ ) :

$$Nu_{turb} = (Nu_0 + a \cdot Re^b \cdot Pr_l^c) \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_{Tp}}\right)^d$$

- c) Pour un écoulement transitoire ou semi-turbulent ( $Re_{lam} \leq Re \leq Re_{turb}$ )

$$Nu_{tran} = \left(Nu_{lam} * \frac{Re_{turb} - Re}{Re_{turb} - Re_{lam}}\right) + \left(Nu_{turb} * \frac{Re - Re_{lam}}{Re_{turb} - Re_{lam}}\right)$$

Avec  $\mu_l$  la viscosité dynamique,  $\mu_{T_p}$  la viscosité de la phase liquide pour la température de paroi  $T_p$ ,  $Pr_l$  nombre de Prandtl,  $Re$  le nombre de Reynolds et les valeurs :

$$Nu_{lam} = 4.36, Nu_0 = 0; a = 0.023; b = 0.8; c = 0.4; d = 0; Re_{lam} = 2000; Re_{turb} = 5000$$

$$T_{p,DB} = T_l + \frac{\varphi}{H_{DB}}$$

Dans le cas de l'**ébullition nucléée**, on a par exemple la corrélation de Jens et Lottes qui donne la température de paroi correspondant à un flux thermique en ébullition nucléée :

$$T_{p,en} = T_{sat} + \Delta T_{JL}$$

$$\Delta T_{JL} = \left( \frac{\varphi}{10^4} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot (7.91 \times e^{-\frac{P}{62.10^5}})$$

Cette corrélation est valable pour des écoulements parallèles aux structures chauffantes et une pression supérieure à 1 MPa.

Il existe aussi la corrélation de Forster et Grief valable dans le même cas mais pour une pression inférieure à 1 MPa :

$$T_{p,en} = T_{sat} + \Delta T_{FG}$$

$$\Delta T_{FG} = \left( \frac{\varphi}{10^4} \right)^{0.385} \cdot 4.44 \cdot \left( \frac{P}{10^5} \right)^{-0.23}$$

Le modèle Flica3 suppose que le flux thermique total est soit celui correspondant à la convection liquide soit celui correspondant à l'ébullition nucléée. Le mode thermique choisi est généralement celui qui minimise la température de paroi  $T_p = \min(T_{p,DB}; T_{p,en})$ .

On a également le flux critique qui est le flux thermique maximum possible en ébullition nucléée, au-delà la paroi s'assèche de manière continue et un film de vapeur recouvre la paroi. C'est un paramètre important dans la sûreté nucléaire et son calcul sert à estimer la marge à l'ébullition. Les mécanismes déterminant la crise d'ébullition sont complexes et encore mal expliqué et la prédiction de ce flux repose sur des mesures expérimentales, ce qui donnent naissance à de nombreuses corrélations [8] comme celle de Sudo [9]. On définit également le Rapport d'échauffement critique (REC) ou Rapport de Flux thermique critique (RFTC) pour une certaine cote z par :

$$RFTC = \frac{\varphi_c}{\varphi_{local}}$$

$\varphi_c$  représente le flux critique et  $\varphi_{local}$  le flux local. Le déclenchement de l'assèchement est basé sur un critère de seuil du REC.

- **Vitesse relative entre phases**

Le modèle de vitesse relative entre phases exprime l'écart de vitesse entre phase vapeur et phase liquide alors qu'on a 1 équation de conservation de quantité de mouvement pour le mélange diphasique. Deux méthodes existent dans FLICA4 :

- écart de vitesse déduit du glissement

Le glissement permet d'exprimer le rapport de la vitesse de la phase vapeur par rapport à celle de la phase liquide dans une direction  $i$ .

$$\gamma^i = \frac{u_v^i}{u_l^i} \quad i = X, Y, Z$$

$$u_r^i = u_v^i - u_l^i = u^i \frac{\gamma^i - 1}{1 + c \cdot (\gamma^i - 1)}$$

Avec  $u_v^i = u^i + (1 - c)u_r^i$  et  $u_l^i = u^i - cu_r^i$

- écart de vitesse déduit d'un modèle de dérive

$$\vec{u}_v = C_0 \vec{J} + \vec{u}_{v,lim}$$

$$\vec{J} = \alpha \vec{u}_v + (1 - \alpha) \vec{u}_l$$

$$\vec{u}_r = \vec{u}_v - \vec{u}_l = \frac{(C_0 - 1) \cdot \vec{u} + \vec{u}_{v,lim}}{1 - c + C_0(c - \alpha)}$$

$\vec{J}$  est la vitesse superficielle du mélange ;  $u_{v,lim}$  est la vitesse limite vapeur et  $C_0$  un paramètre de distribution donnés par des modèles ou des corrélations.

## • Diffusion et turbulence

Le coefficient de diffusion turbulente  $K_{cv}$  et de viscosité turbulente  $M^t$  sont utilisés dans les équations. Quand la viscosité est nulle on note  $M^t = -1$

Pour la phase liquide et un écoulement laminaire ( $Re < 3000$ ) on a  $M^t = 0$ , et pour un écoulement turbulent  $M^t = M_0 \cdot (Re - 3000)$  avec  $M_0$  coefficient défini par l'utilisateur. La viscosité est nulle pour la phase vapeur.

Le coefficient de diffusion turbulente est aussi défini en fonction du nombre de Reynolds. Pour  $Re < 3000$   $K_{cv} = 0$  et pour  $Re > 3000$   $K_{cv} = K_0 \cdot (Re - 3000)$  avec  $K_0$  également défini par l'utilisateur.

## Méthode numérique

Comme dit plus haut la méthode numérique utilisée par FLICA4 est la méthode des volumes finis qui est très utilisée en mécanique des fluides numérique. Le système d'équation vu dans la section précédente peut se réécrire sous la forme du système de conservation ci-dessous :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div } F(U) = S(U) \quad (E),$$

avec  $U$  vecteur des variables conservatives,  $F$  le flux et  $S(U)$  vecteurs des termes sources.

Cette méthode consiste à intégrer l'équation sur chaque cellule du maillage  $C_i$  en appliquant le théorème de Green-Ostrogradski pour le terme divergence ( $|C_i|$  désigne le volume de la cellule correspondante). Dans FLICA4, la formulation volumes finis associe une valeur constante  $U_i$  pour le vecteur des variables conservatives sur chaque cellule  $C_i$  :

$$|C_i| \frac{\partial U_i}{\partial t} + \int_{\partial C_i} F(U) \cdot n \, d\sigma = \int_{C_i} S(U) \, dv$$

Le flux peut se décomposer en flux convectifs et visqueux (où le terme  $\nabla U$  apparaît)  $F(U) = F_c(U) + G(U, \nabla U)$  [1]. Dans FLICA4 le problème est linéarisé localement à une interface entre 2 cellules sous la forme :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div } (A \cdot U) = S(U)$$

Pour les flux convectifs on décompose le terme du flux sur les cellules voisines  $C_j$  ayant une surface commune avec  $C_i$  ( $\partial C_{ij} = \partial C_i \cap \partial C_j$  est une surface et  $|\partial C_{ij}|$  est l'aire de cette surface) :

$$\int_{\partial C_i} F_c(U) \cdot n \, d\sigma = \sum_j \int_{\partial C_{ij}} F_c(U) \cdot n \, d\sigma + \int_{\partial C_i \cap \partial \Omega} F_c(U) \cdot n \, d\sigma.$$

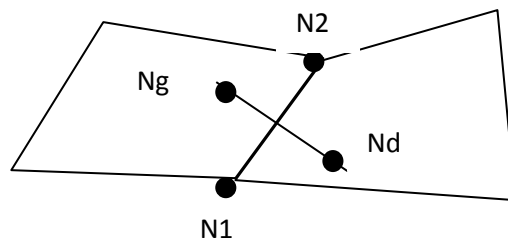
Le terme de droite correspond à l'intégration des termes de bord,  $\partial \Omega$  étant la frontière du domaine de calcul.

Le flux utilisé dans FLICA4 est celui de Roe ( $A$  est une matrice jacobienne linéarisée, appelée matrice de Roe) :

$$\int_{\partial C_{ij}} F_c(U) \cdot n \approx |\partial C_{ij}| \varphi(U_i, U_j, \vec{n}_{ij}),$$

$$\varphi(U_i, U_j) = \frac{1}{2} (F(U_i) + F(U_j)) - \frac{1}{2} |A(U_i, U_j)| (U_j - U_i).$$

L'évaluation des flux visqueux requiert une connaissance du gradient des variables, l'évaluation de ce gradient se fait avec un schéma de type différences finie [1] pour un maillage structuré. Pour un maillage non structuré l'évaluation des dérivées partielles (normales et tangentielles) de  $U$  sur une interface se fait à l'aide de points situés sur la normale à cette interface passant par son milieu et de deux points appartenant à l'interface.



Les dérivées normales et tangentiels sont alors définies par :

$$\frac{U_{N2}-U_{N1}}{\|N1N2\|} \text{ et } \frac{U_{Nd}-U_{Ng}}{\|NgNd\|}.$$

Le calcul des termes sources se fait avec un schéma centré :

$$\int_{C_i} S(U)dv = |C_i| S(U_i).$$

La discrétisation en temps peut donner un schéma explicite ou implicite, la plupart du temps de type Euler. Dans le cas explicite on a :

$$\frac{|C_i|}{\Delta t} (U_i^{n+1} - U_i^n) + \sum_j |\partial C_{ij}| \varphi(U_i^n, U_j^n) = S(U_i^n)$$

Lorsque le schéma est implicite on a :

$$\frac{|C_i|}{\Delta t} (U_i^{n+1} - U_i^n) + \sum_j |\partial C_{ij}| \varphi(U_i^{n+1}, U_j^{n+1}) = S(U_i^{n+1})$$

Dans ce cas il y a résolution d'un système linéaire du type  $Mx=b$ . Les méthodes directes et itératives sont disponibles dans FLICA4 pour la résolution de système linéaire notamment la décomposition LU et les méthodes du gradient CGS, Bi-CGStab et de minimisation du résidu GMRES.

### III. Unification du code de calcul FLICA4

#### 1 Démarche

Dans le cadre de mon stage, j'ai utilisé le système linux avec la distribution FEDORA 18 64 bits. Avant de procéder à l'unification, j'ai lancé chaque produit indépendamment et exécuter les tests de non-régression pour m'assurer qu'il n'y avait pas de régression par rapport à des résultats de référence. L'absence de bug dans le logiciel m'a permis de commencer mon travail de développement d'unification du code FLICA4.

L'unification des 4 produits s'est faite d'abord avec le produit LETR, notamment en rapatriant des modèles présents uniquement dans le produit LETR dans le produit PUB. Quand un modèle était commun aux deux produits, il fallait voir les différences en détail en utilisant par exemple les logiciels *meld* et *tkdiff* qui permettent de comparer 2 fichiers texte et de montrer les différences.

Après analyse du code, il a été constaté que les différents modèles sont présents dans les procédures GIBIANE *def\_modele.p*, *modelisation.p*, *init\_param.p*. Ces procédures ont été modifiées pour prendre en compte les modèles du produit LETR dans le produit PUB. La liste des modèles ainsi que leurs utilisations est disponible dans la documentation de FLICA4.



## 2 Phase d'intégration

Le produit PUB modifié était ainsi régulièrement recompilé, exécuté et testé après chaque modification pour assurer la non-régression. L'unification des produits FLICA4 s'est poursuivie ensuite avec le produit STANDARD et enfin le produit PN avec la même méthodologie.

Il est à noter que les tests des produits LETR, STANDARD et PN sont rapatriés dans le produit unifié PUB.

Au cours des développements, l'outil de gestion de configuration *GIT* a été utilisé via l'interface graphique *SmartGIT*. Cet outil a permis :

- une intégration en continue des développements,
- une trace des modifications apportées au code FLICA4,
- une aisance d'un retour en arrière en cas de besoin,
- fusion/merge avec d'autre développement,
- ....

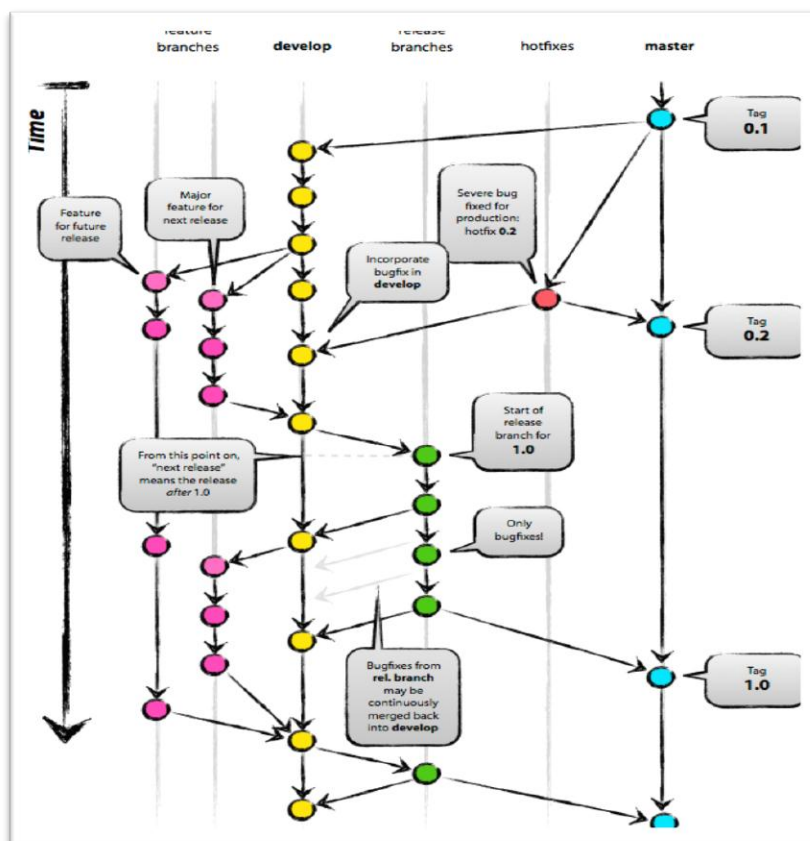


Figure 2 Exemples de branches sous l'outil GIT

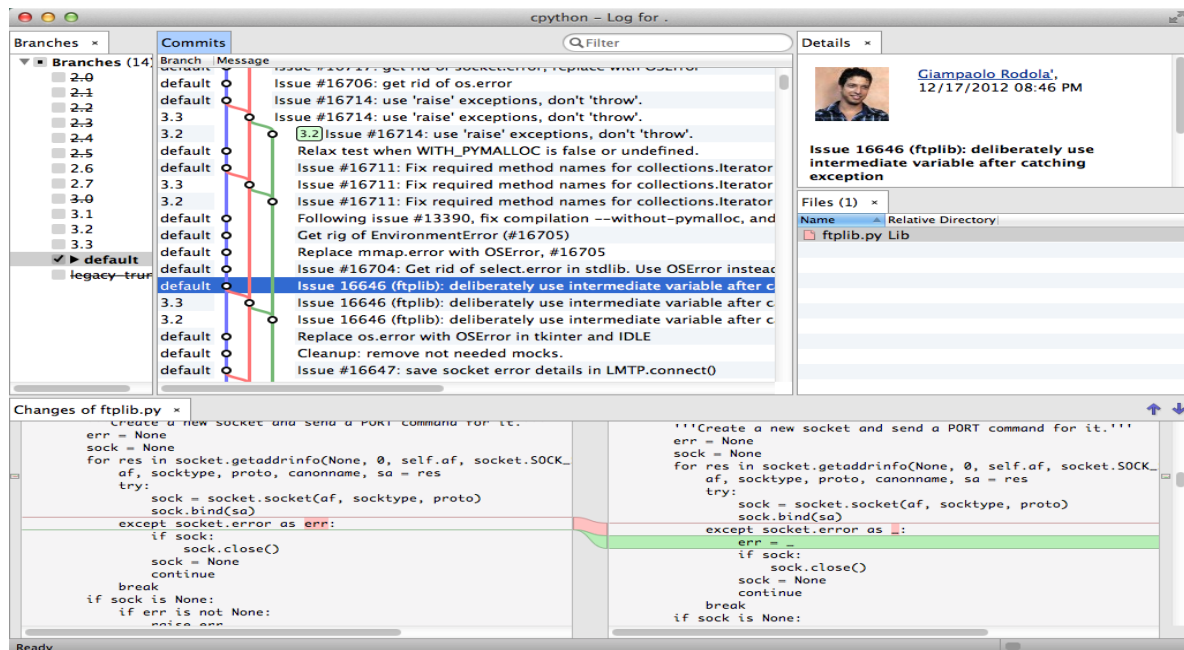


Figure 3 Interface graphique SmartGIT

### 3 Phase Vérification & Validation

Cette phase de V&V consiste à compiler, exécuter et tester le produit modifié au cours des développements. Dans cette phase, plusieurs scripts python de l'atelier logiciel ont été utilisés :

- CompilFli.py : compilation du produit,
- RunnerFli.py : lancement des tests de non-régression,
- LaunchTNR.py : vérification de la non-régression et la portabilité.

Cette phase a été effectuée de manière continue.

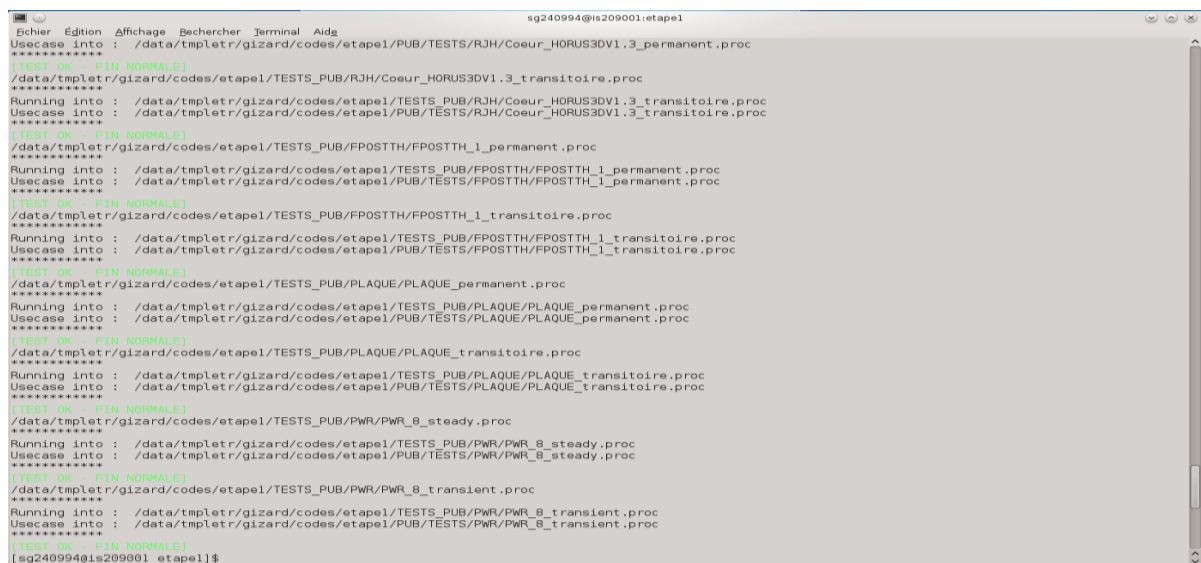


Figure 4 Lancement des tests de non-régression

```

TNR.log - KWrite
Fichier  Edition  Affichage  Outils  Configuration  Aide
Nouveau  Ouvrir  Enregistrer  Enregistrer sous  Fermer  Annuler  Refaire

Test Permanent : AUTRES_COEURS/Agate_BwFC_4
- Status Global : OK
- VITESSE_X_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 7.26678992319e-12
  - Seuil : 1e-05
- VITESSE_Y_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 5.90829894631e-12
  - Seuil : 1e-05
- VITESSE_Z_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 2.8076038867e-12
  - Seuil : 1e-05
- PRESSION_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 1.77549632417e-13
  - Seuil : 1e-05
- ENTHALPIE_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 1.21304930408e-14
  - Seuil : 1e-05
- MASSE_VOLUMIQUE_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 7.01576596269e-16
  - Seuil : 1e-05
- TEMPERATURE_LIQUIDE : OK
  - Erreur relative : 2.7359684153e-15
  - Seuil : 1e-05
- TEMPERATURE_VAPEUR : OK
  - Erreur relative : 1.793228091e-14
  - Seuil : 1e-05
- TAUX_DE_VIDE : OK
  - Erreur absolue : 0.0
  - Seuil : 1e-05
- CONCENTRATION : OK
  - Erreur absolue : 0.0
  - Seuil : 1e-05
- Temps : 1.732
- Temps Ref : 2.89
- Ecart Temps : -40.1 %
-----
Test Permanent : AUTRES_COEURS/bwr_3D_ishii_strat
- Status Global : OK
- VITESSE_X_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 1.34032310463e-09
  - Seuil : 1e-05
- VITESSE_Y_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 9.4738632442e-10
  - Seuil : 1e-05
- VITESSE_Z_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 6.25278119947e-12
  - Seuil : 1e-05
- PRESSION_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 5.43209973277e-15
  - Seuil : 1e-05
- ENTHALPIE_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 6.61578622064e-15
  - Seuil : 1e-05
- MASSE_VOLUMIQUE_MELANGE : OK
  - Erreur relative : 3.445520225e-15
  - Seuil : 1e-05
- TEMPERATURE_LIQUIDE : OK
  - Erreur relative : 2.7088167904e-15
  - Seuil : 1e-05
-----
Ligne : 1 Col : 1    INS  LIGNE    TNR.log

```

Figure 5 Résultats des tests de non-régression

## 4 Nouvel outil de compilation

Après l'unification des produits et l'obtention d'un produit PUB unique, des premiers tests de l'outil CMake ([www.cmake.org](http://www.cmake.org)) pour la compilation du code FLICA4 ont été réalisés avec succès. Néanmoins, il reste des tests complémentaires pour remplacer le système de compilation actuelle de FLICA4.

#### IV. Quelques résultats numériques

La figure ci-dessous représente le domaine de calcul qui représente un cœur du réacteur expérimental RJH (Réacteur Jules Horowitz en construction à Cadarache). Les mailles ici sont des hexagones réguliers et le maillage est régulier.

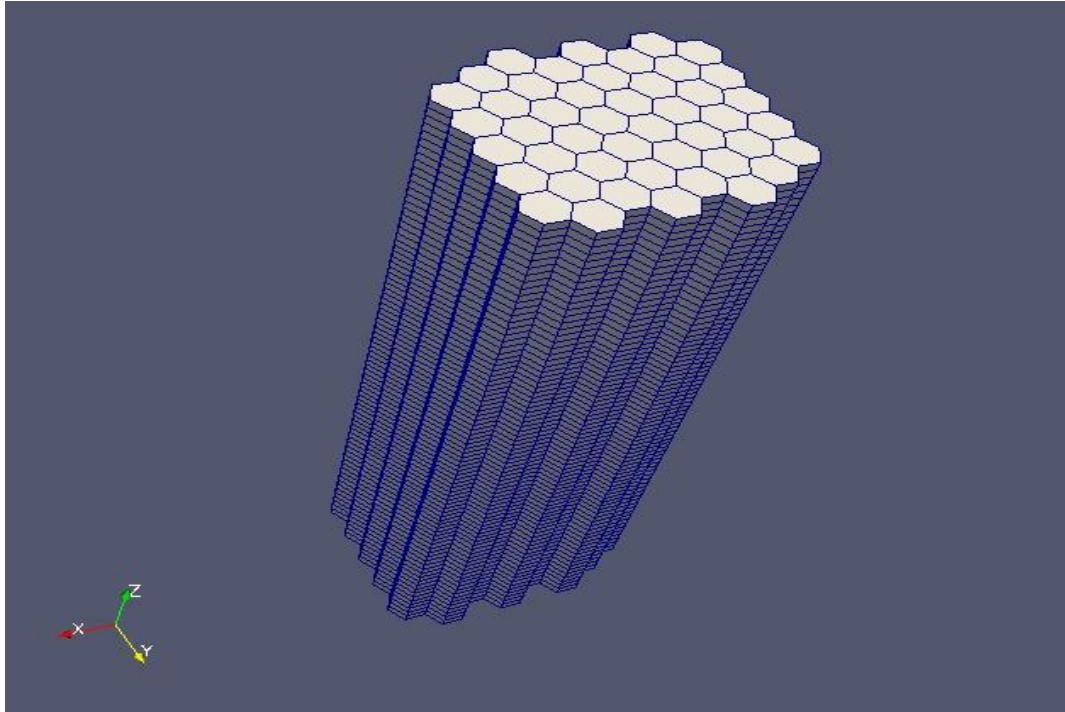


Figure 6 Domaine de calcul du cœur RJH

La figure ci-dessous représente la répartition de la température liquide dans le cœur du réacteur expérimental RJH.

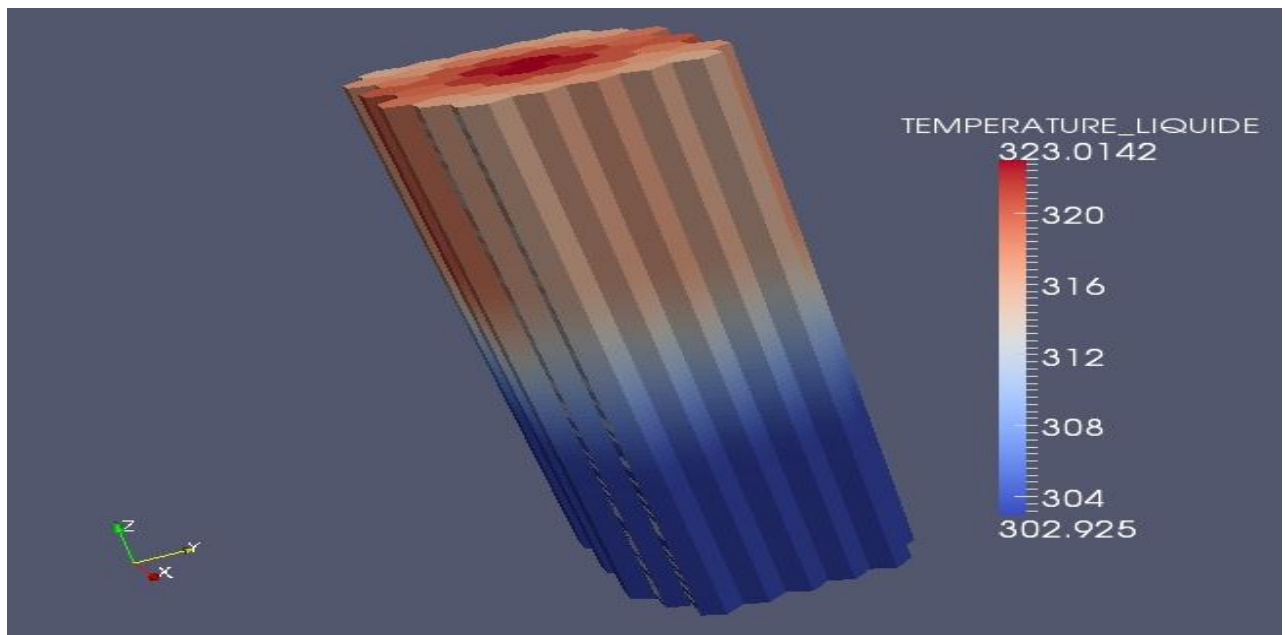


Figure 7 Répartition de la température liquide RJH

La figure ci-dessous représente le taux de vide dans le cœur du réacteur expérimental RJH.

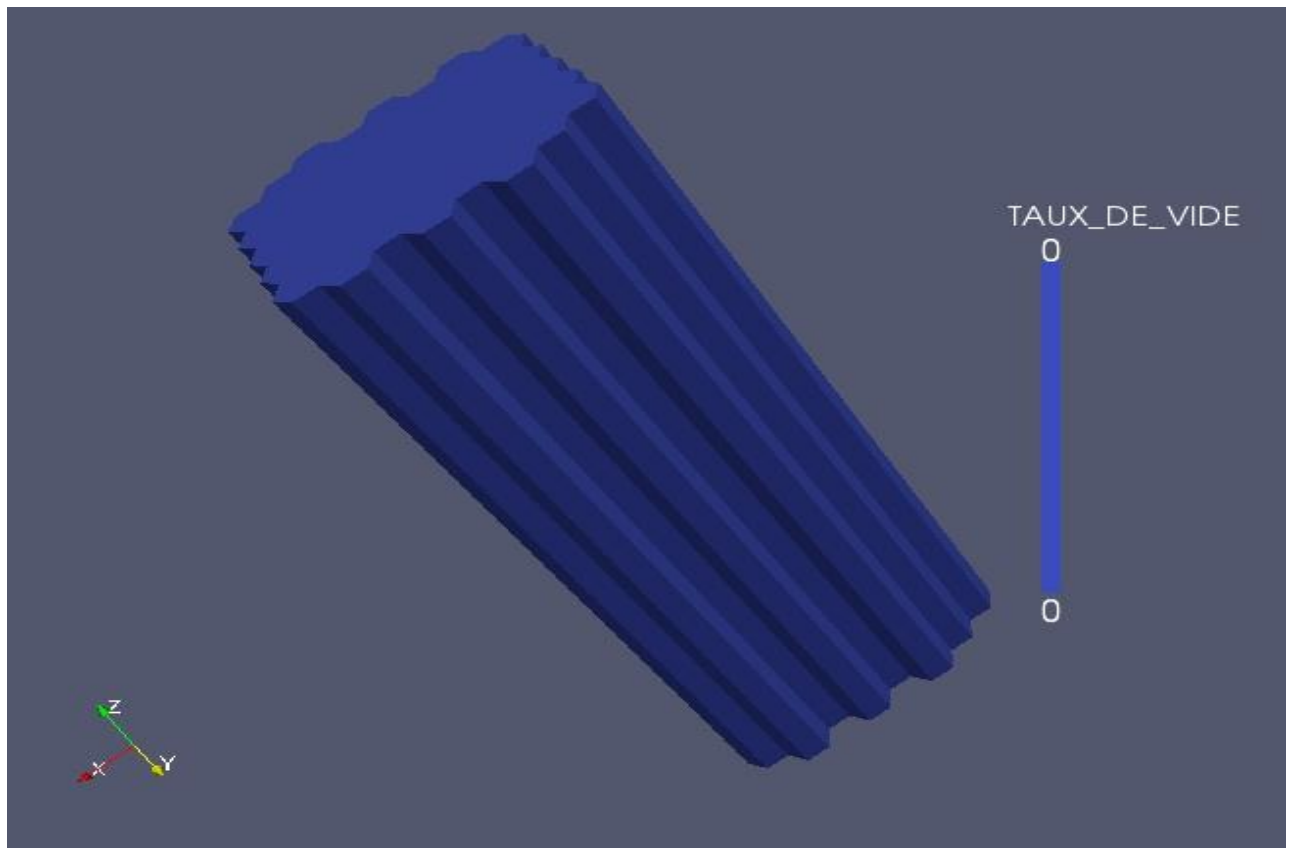


Figure 8 Taux de vide RJH

On remarque que le taux de vide est nul partout ce qui signifie que le fluide est uniquement présent à l'état liquide et la température du fluide augmente en haut du cœur, l'eau qui sort du cœur est donc chauffée. Le réchauffement de l'eau est cependant ici assez faible car le réacteur en question est un réacteur de recherche de faible puissance. Il existe évidemment des cas où l'échauffement est plus important avec la présence d'une phase vapeur.

## **V. Conclusion**

Au début de mon stage, j'ai suivi une formation sur le code FLICA4 dispensé par le support FLICA4. La prise en main de ce code calcul a été difficile vu les nombreux langages utilisés et le nombre important de ligne ce code. Néanmoins, une fois le code et les langages compris la suite du stage s'est bien déroulée.

L'unification du logiciel FLICA4 a été réalisée avec succès sans qu'aucune régression.

Ce stage m'a permis d'appréhender un code de calcul industriel avec des nouveaux langages informatiques ; j'ai aussi pu voir l'importance du nucléaire aujourd'hui en France et les enjeux derrière.

La formation MACS m'a aussi permis d'acquérir les bases pour réaliser des projets de développement avec des différents langages de programmation.

## Références

- [1] Flica-4: a three dimensional two-phase flow computer code with advanced numerical methods for nuclear applications. I.Toumi, A. Bergeron, D. Gallo, E. Royer, D. Caruge, 2000
- [2] [www.cea.fr/energie/astrid-une-option-pour-la-quatrieme-generation](http://www.cea.fr/energie/astrid-une-option-pour-la-quatrieme-generation)
- [3] [www.sfen.org](http://www.sfen.org)
- [4] Rapport de stage Simulation d'écoulement en milieux poreux, E. Mocket 2013
- [5] livret CEA, Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire, Collection De la fission à la réaction en chaîne
- [6] Thèse Y. Gorsse, 2012, Approximation numérique sur maillage cartésien de lois de conservation : écoulements compressibles et élasticité non linéaire.
- [7] [www.cea.fr/jeunes/themes/l-energie-nucleaire](http://www.cea.fr/jeunes/themes/l-energie-nucleaire)
- [8] FLICA4 v1.8. Modèles physiques, Rapport DM2S, CEA,2005. A. Bergeron, Ph. Fillion, D. Gallo, E. Royer.
- [9] Y. Sudo & M. Kaminaga, A new CHF Correlation scheme proposed for vertical rectangular channels heated from both sides in nuclear research reactors, Journal of Heat Transfer, May 1993.
- [10] Rapport technique DEN, Nouvel atelier de génie logiciel de FLICA4, A.GEAY, A.MEKKAS, 2012
- [11] Note technique DEN, Notices de maintenance FLICA4, Florian ABEGUILE (CS), 2013
- [12] [www.defense.gouv.fr/marine/decouverte/equipements-moyens-materiel-militaire/sous-marins](http://www.defense.gouv.fr/marine/decouverte/equipements-moyens-materiel-militaire/sous-marins)