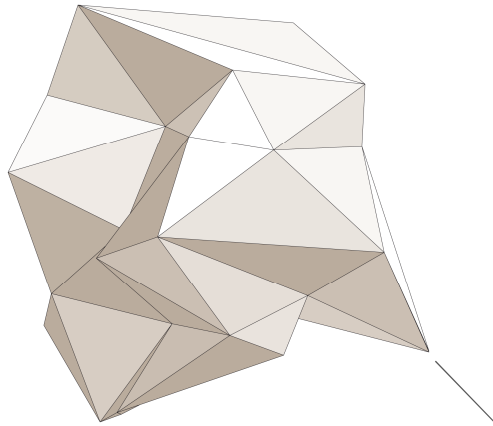


3D Neutronic Thermal Hydraulic coupling. The HTTR case.

Altran ELLiS



Reactor Physic

Nuclear Safety



Club Cast3M 2015

27 / 11 / 2015

Paris

Imed Limaiem

Xu Han

Jean Marc Ndombo

Fabien Boulland

Philippe Jacquet

altran

Agenda

Plan

27/11/2015 – 11h

Brève présentation du HTTR :

- *Le réacteur et ses systèmes de protection*
- *Le système de refroidissement du puits de cuve (VCS)*

Présentation de l'essai LOFC

- *Descriptif de l'essai : Evacuation de la puissance lors d'un d'accident de type LOFC non protégé ;*
- *Intérêts de l'étude de l'essai : Plusieurs points de vue (qualification des codes, mécanique, sureté, conception, comparaison / REP)*
- *Problématique de modélisation*
- *Capacité à simuler numériquement par la CFD les phénomènes physiques présents en particulier au niveau du puits de cuve*

Modélisation et simulation (aspect moyen terme)

- *Modélisation sous Cast3M*
 - *Thermo-hydraulique*
 - *Couplage neutronique avec DRAGON / DONJON*
- *Modélisation sous ANSYS CFX*
 - *Thermo-hydraulique*
 - *Couplage neutronique avec un model de cinétique point (MKP)*

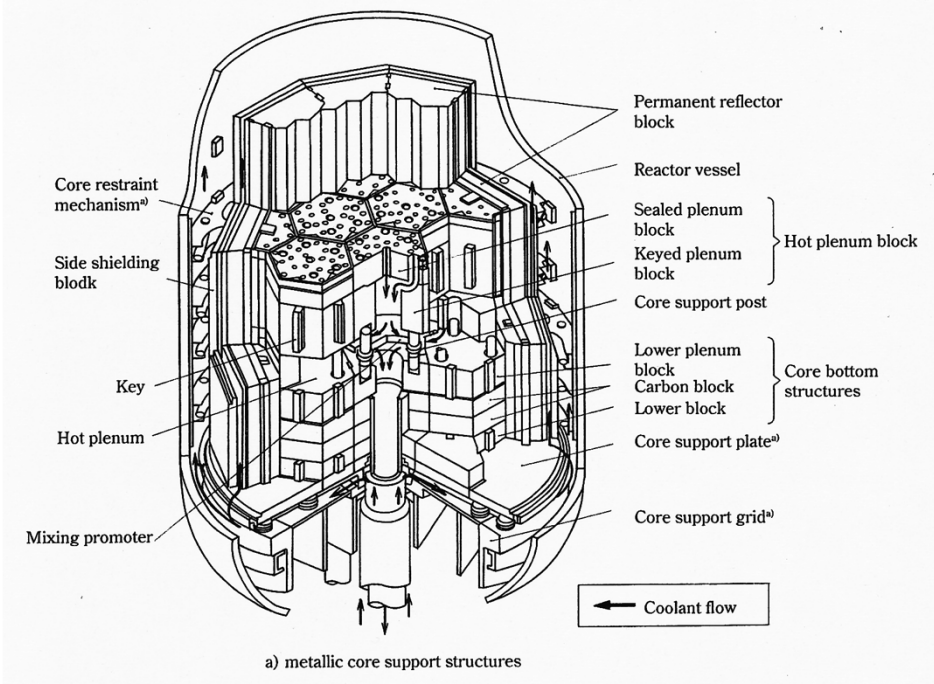
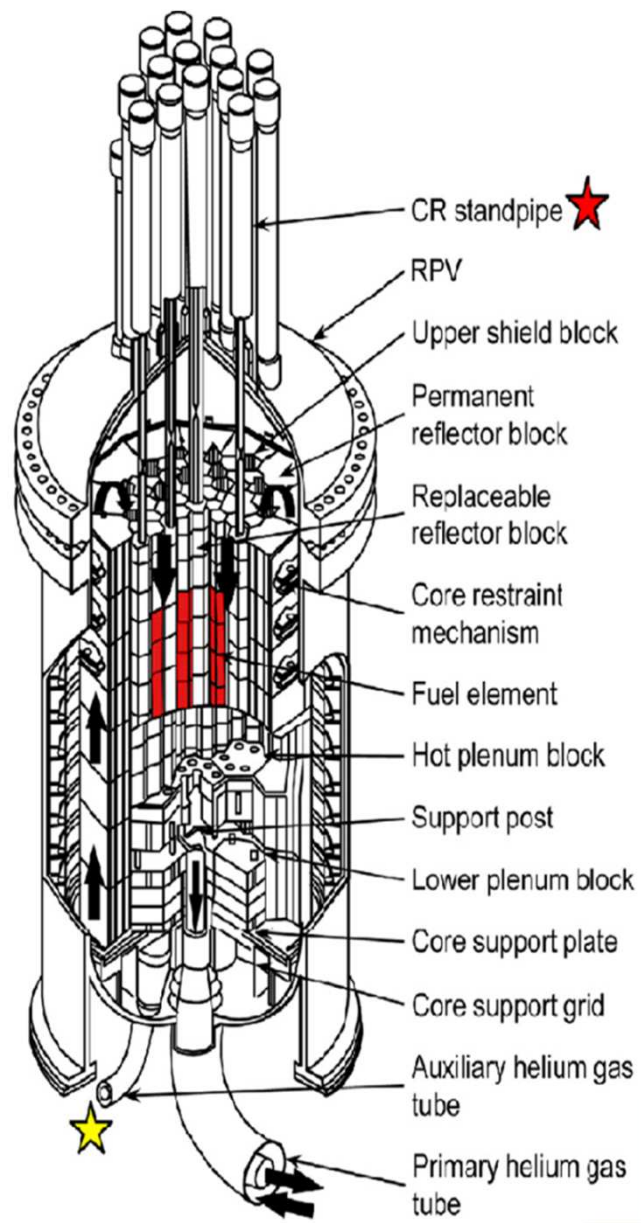
Résultats et analyses (comparaison avec les données expérimentales de JAEA).

- *Résultats obtenus avec Cast3M*
- *Résultats obtenus avec ANSYS CFX*

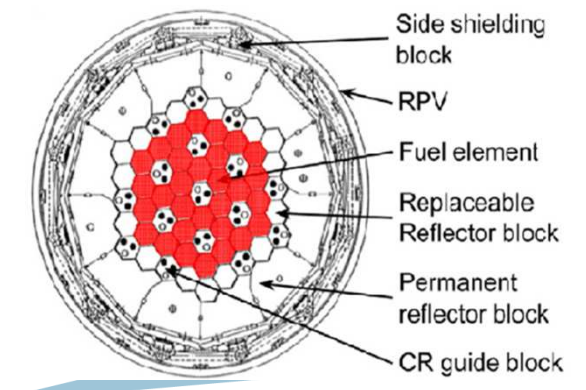
Synthèse et Conclusions

Questions / réponses

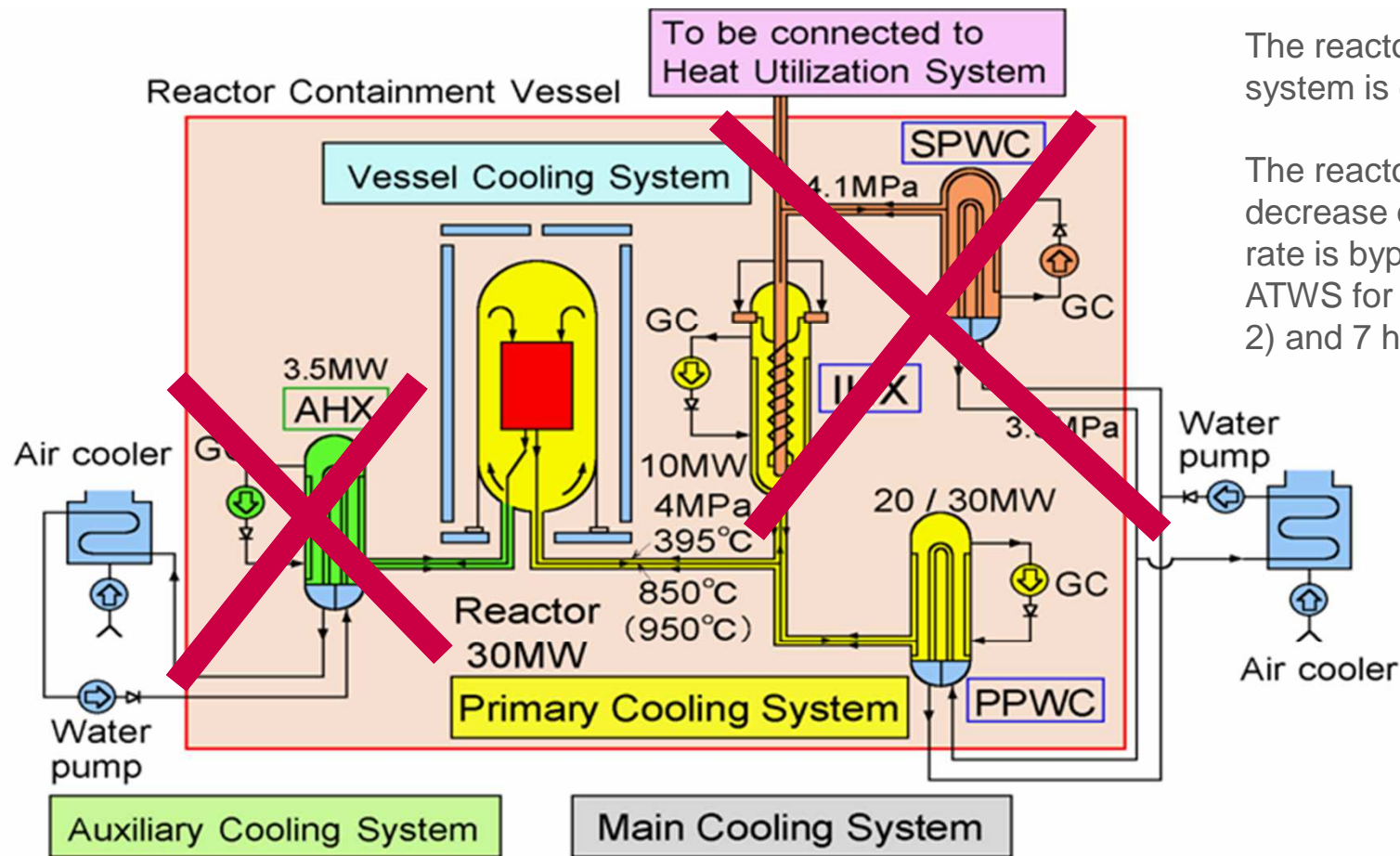
The High Temperature Test Reactor / Global View



Fuel	Uranium-dioxide Coated fuel particle
Uranium-235 enrichment	3~10wt% (avg. 6wt%)
Fuel type	Pin-in-block type
Moderator	Graphite
Coolant	Helium gas
Reactor power	30MW
Reactor inlet coolant temp.	395°C
Reactor outlet coolant temp.	850°C / 950°C
Coolant flow rate	12.5kg/s or 10.2kg/s
Coolant press.	4.0MPa



LOFC Test presentation / scenario



The reactor power control system is disabled

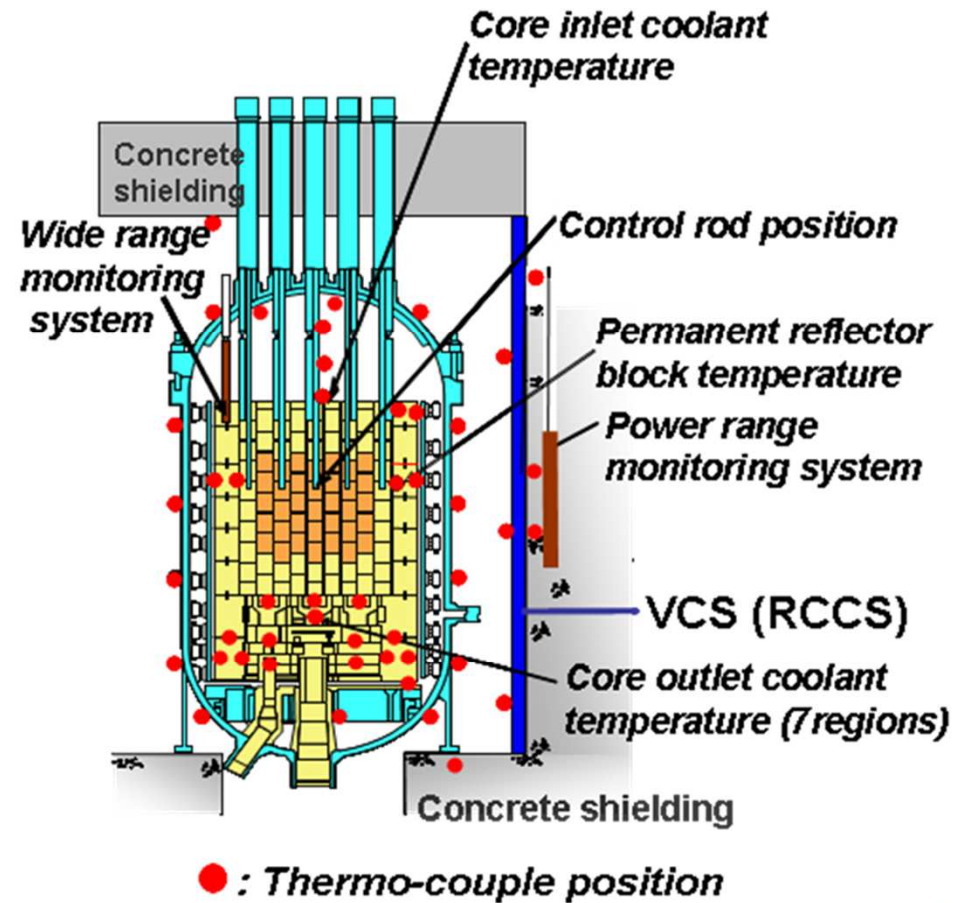
The reactor scram due to decrease of primary coolant flow rate is bypassed to simulate ATWS for 17 hours (Run 1 and 2) and 7 hours (Run 3).

IHX : Intermediate heat exchanger SPWC: Secondary pressurized water cooler
 PPWC: Primary pressurized water cooler AHX : Auxiliary heat exchanger

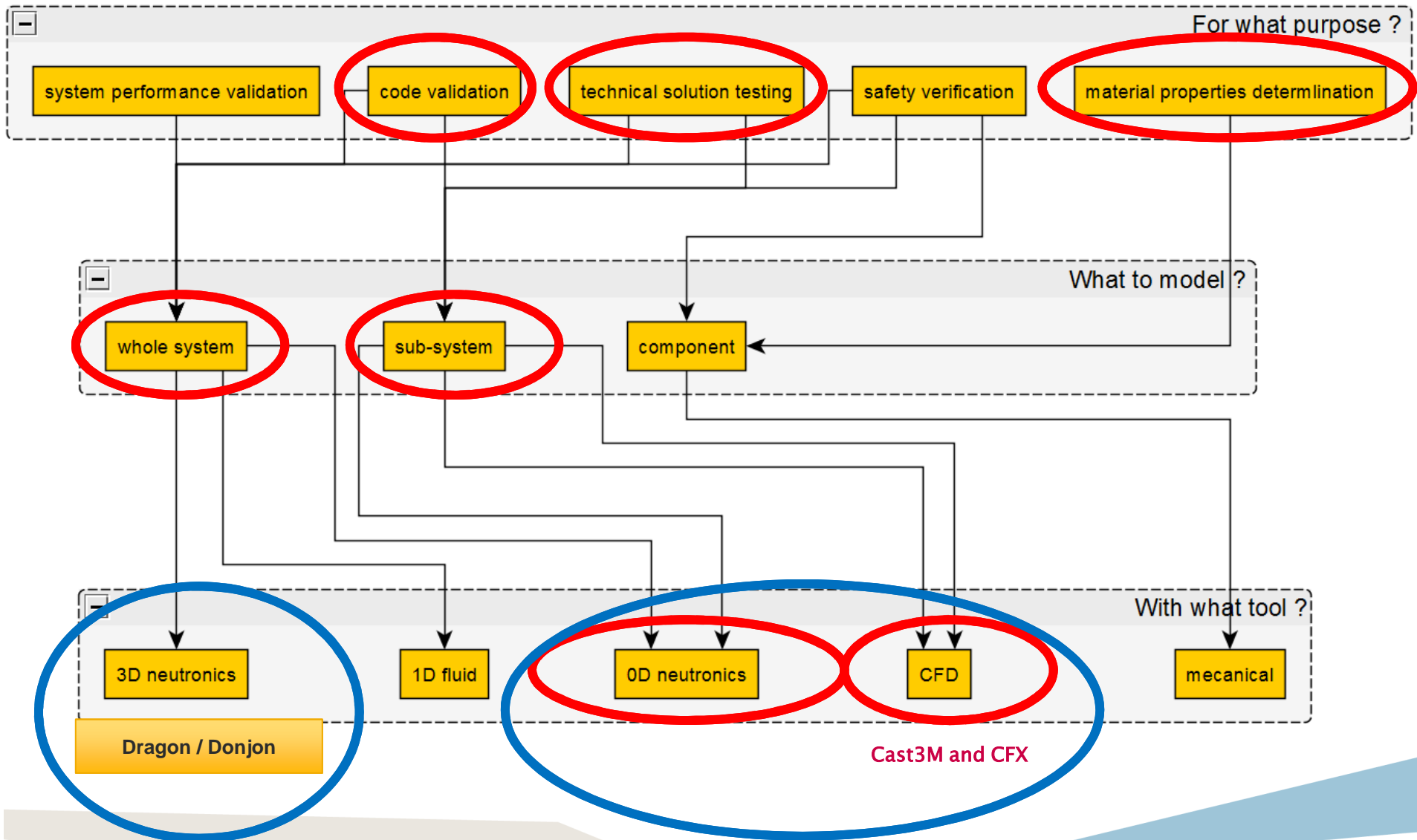
Case no.	Reactor power (MWt)	Reactor inlet/outlet temp. (°C)	Flow rate (ton/h)
Run 1	9	180 / 320	45(rated)
Run 2	30 (full power)	395 / 850	45(rated)
Run 3	9	180 / 320	45(rated)

LOFC Test presentation / Test instrumentations

	Measurement item	Detail
a	Wide range monitoring system	Range from $10^{-08}\%$ to 35% (fission counter, 3 channels)
	Power range monitoring system	Range from 0.1% to 120% (ionization chamber, 3 channels)
b	Control rod position	16 encoder sensors
f	Core inlet coolant temperature	9 K-type thermo-couples
g	Core outlet coolant temperature	21(=7x3) N-type thermo-couples
H	Permanent reflector block temperature	9 K-type thermo-couples
j, k, l, n	Temperature of RPV, VCS, concrete, etc.	Thermo-couples



For what purpose ? What to model ? With what tool ?



- **Task 1**: Code testing (*CFX*); Sub-system analysis (*VCS*);
- **Task 2**: System performance validation, calculation coupling scheme

Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

1. Principales hypothèses :

- La partie creuse au centre du compact combustible est remplie par hélium considéré sans transfert de masse ;
- Sans jeu entre : combustible/gaine ; inter-bloc ; bloc/réflecteur permanent ;
- Certaines structures (control rods, BP, RPV head, upper shield blocks, all lower blocks, support post, side shield block, side panels, water tubes, etc.) ne sont pas modélisées ;
- Les trous centraux de manutention et les trous d'insertion des BP dans les blocs combustibles ne sont pas modélisés ;
- Les blocs de graphite (control rod guide block, irradiation block et replaceable reflector block) sont considérés identiques, sans trou d'insertion des barres de contrôle ni trous centraux de manutention ;
- Extraction de la chaleur par le système de refroidissement du VCS (-0,2 MWth) est effectuée par une source froide imposée à la structure béton.

Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

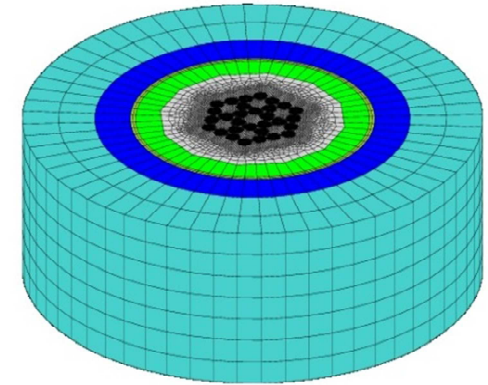
1. Modèle & types de transfert de chaleur :

- **Conduction** : entre tous les solides modélisés en contact, et entre compact combustible/hélium au milieu du compact ;
- **Convection** : entre gaine/hélium, hélium/bloc graphite, réflecteur permanent/hélium, hélium/cuve, cuve/air, air/béton ;
- **Advection** : entre gaine/hélium↓, hélium↓/bloc graphite, réflecteur permanent/hélium↑, hélium↑/cuve ;
- **Rayonnement** : entre gaine/bloc graphite, réflecteur permanent/cuve, cuve/béton, béton/milieu extérieur ;
- **Sources de chaleurs positives sur les combustibles et négatives sur le VCS.**

2. Modèles prêts à coupler :

Modèle crayon 2D R-Z
Modèle crayon 3D
Modèle assemblage combustible 3D
Modèle réacteur HTTR 3D

Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M



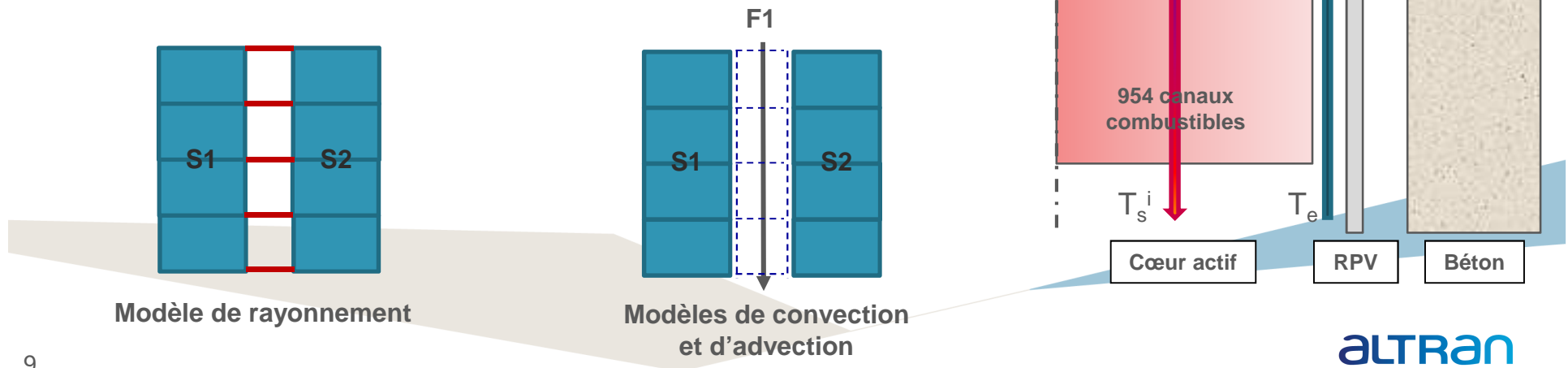
1. Contraintes liées à l'utilisation du code Cast3M :

- Modèle de rayonnement 'FAC_A_FAC' :

Problème dans le modèle → Forts impacts sur les températures des structures ;

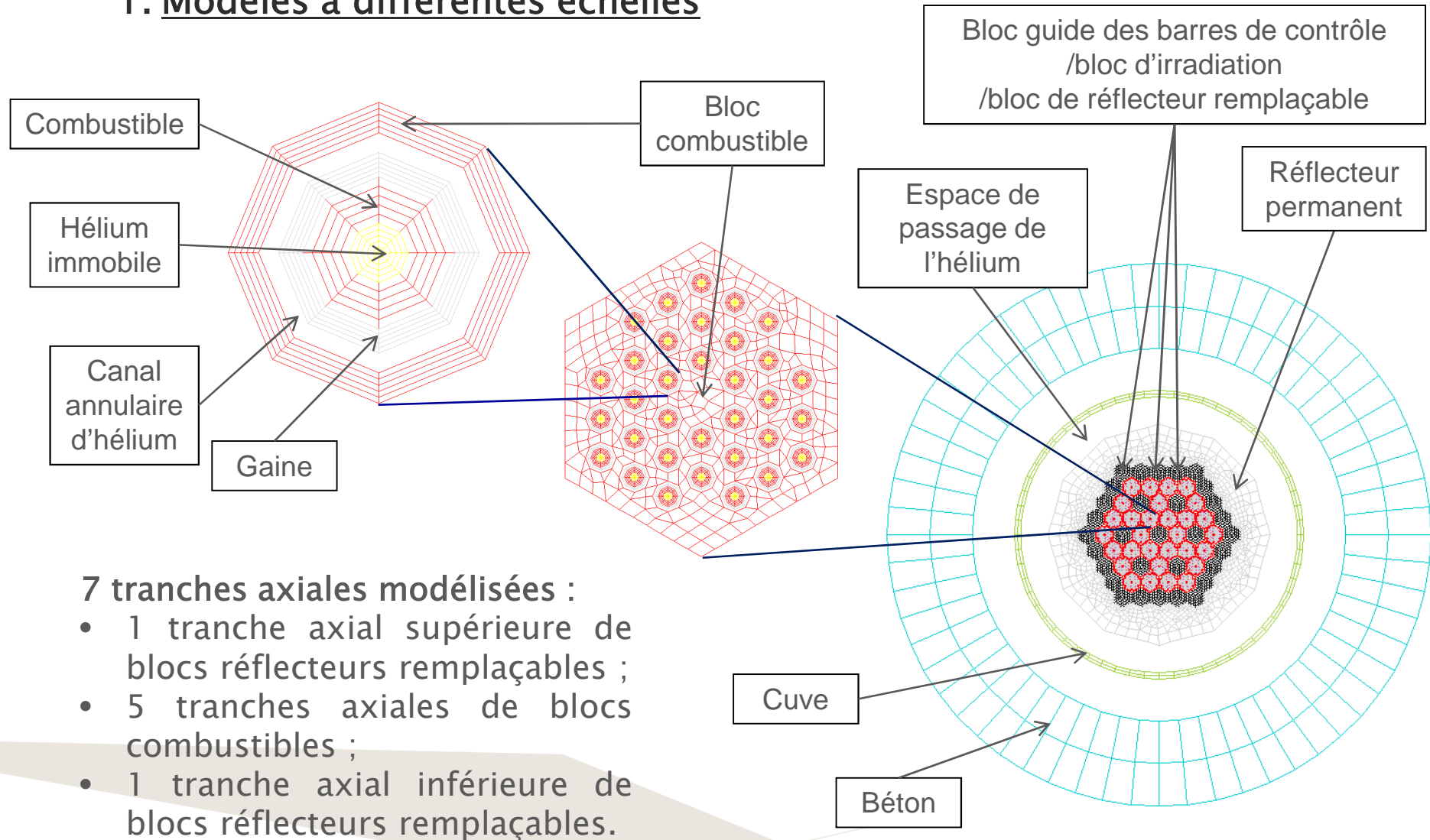
Problème confirmé par le CEA, et remonté au support Cast3M. (2013)

- Modèles de convection et d'advection :
 - Modèle de convection ne permet pas de modéliser le phénomène de convection naturelle ;



Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

1. Modèles à différentes échelles



7 tranches axiales modélisées :

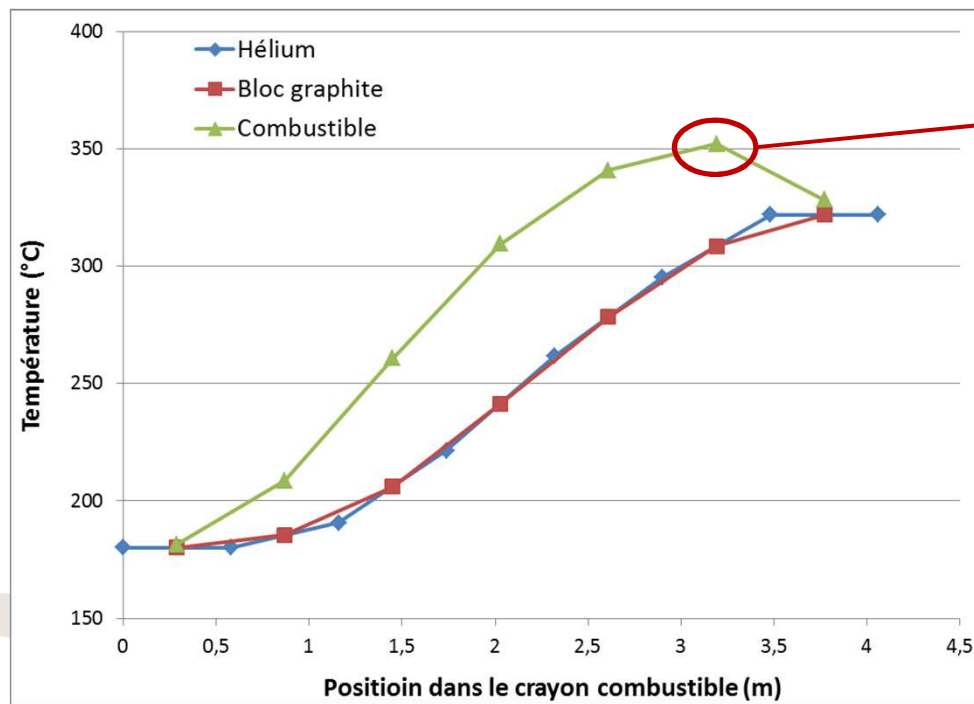
- 1 tranche axial supérieure de blocs réflecteurs remplaçables ;
- 5 tranches axiales de blocs combustibles ;
- 1 tranche axial inférieure de blocs réflecteurs remplaçables.

Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

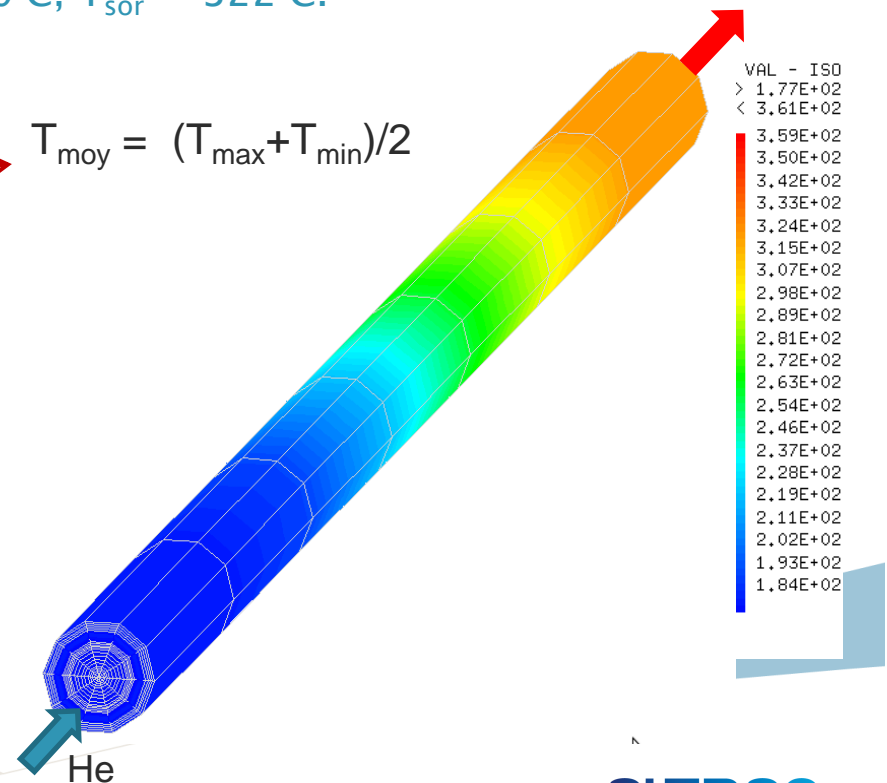
- Modèle **crayon 3D** (sans source froide contournant le bloc, **sans rayonnement**, coefficient d'échange **H constant**) :

1. en stationnaire :

2. → Températures du combustible : $T_{\max} = 361^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 185^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{moy}} \approx 295^{\circ}\text{C}$;
3. → Températures du bloc graphite : $T_{\max} = 322^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 180^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{moy}} \approx 244^{\circ}\text{C}$;
4. → Températures de l'hélium : $T_{\text{ent}} = 180^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{sor}} = 322^{\circ}\text{C}$.



$$T_{\text{moy}} = (T_{\max} + T_{\min}) / 2$$

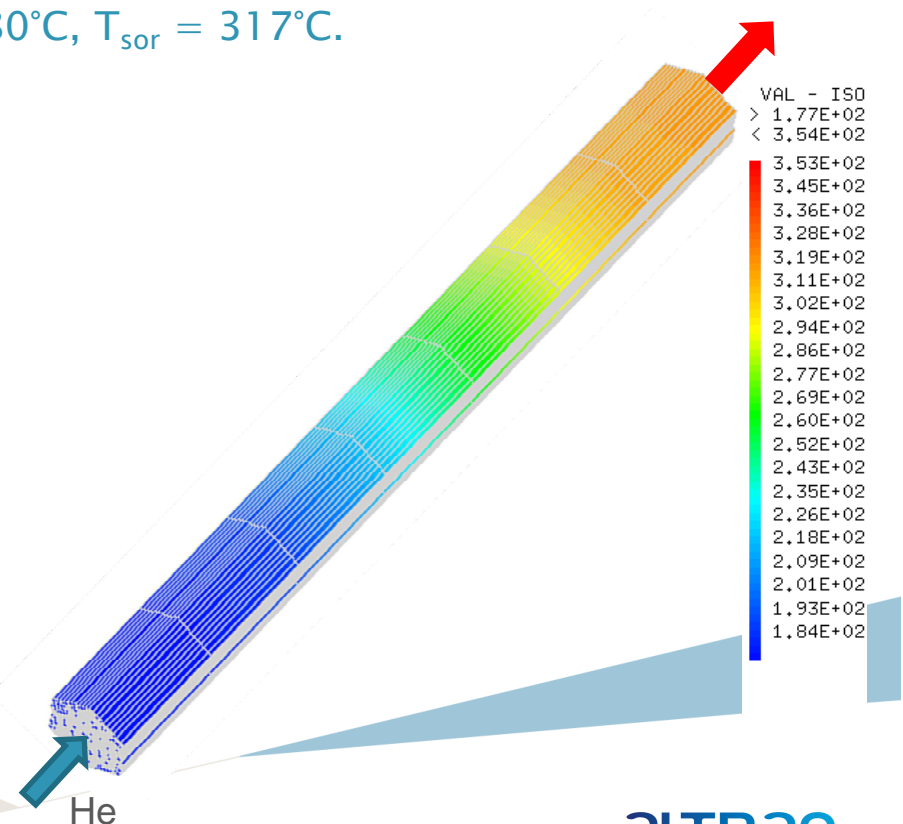
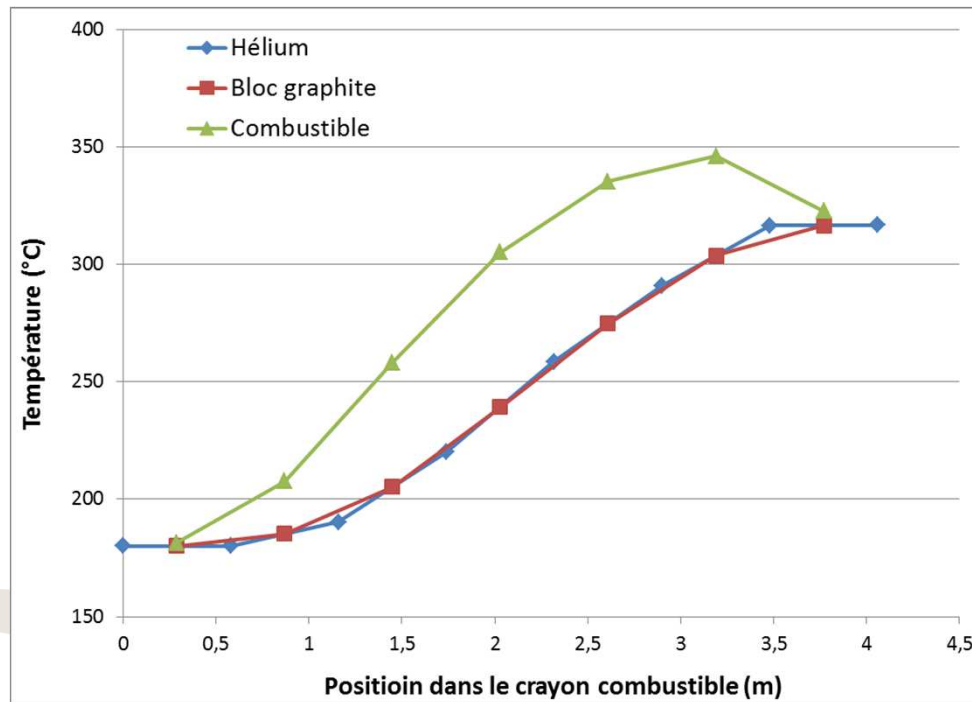


Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

- Modèle assemblage **combustible 3D** (sans source froide contournant le bloc, **sans rayonnement, H constant**) :

1. en stationnaire :

2. → Températures du combustible : $T_{\max} = 354^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 185^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{moy}} \approx 291^{\circ}\text{C}$;
3. → Températures du bloc graphite : $T_{\max} = 317^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 180^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{moy}} \approx 242^{\circ}\text{C}$;
4. → Températures de l'hélium : $T_{\text{ent}} = 180^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{sor}} = 317^{\circ}\text{C}$.

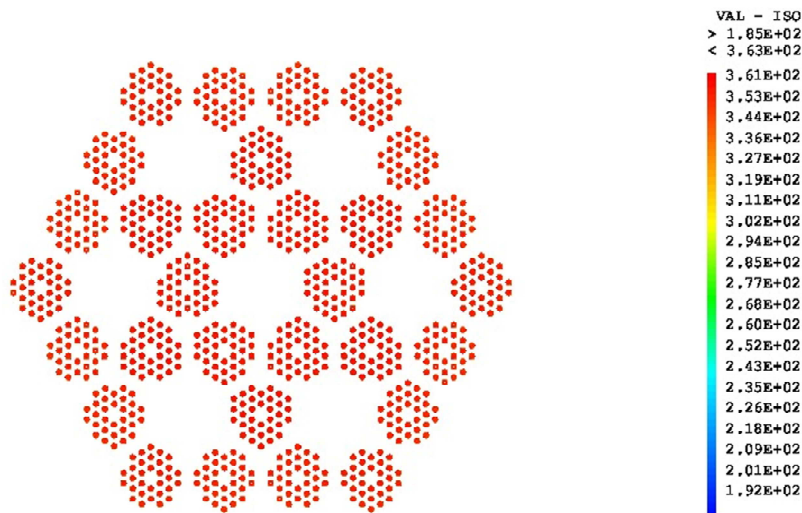


Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

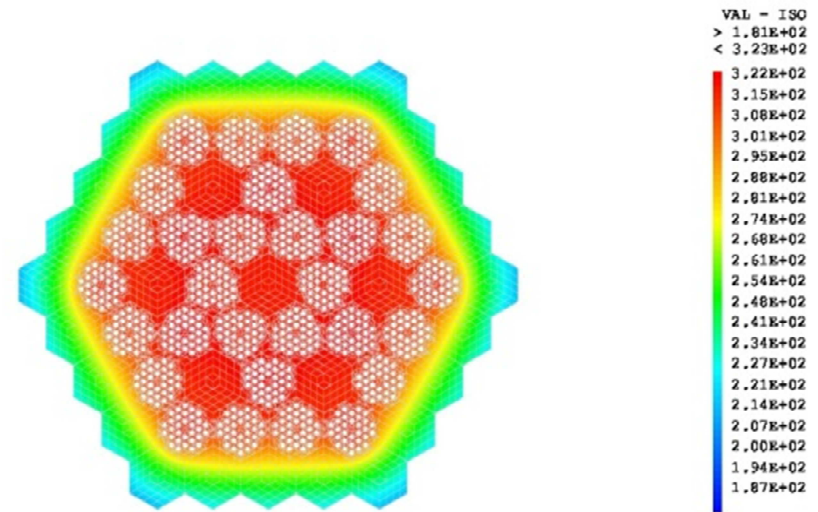
- Modèle **réacteur 3D** (avec source froide contournant le bloc, **sans rayonnement**, coefficient d'échange H constant) :

1. en stationnaire :

2. → Températures des combustibles : $T_{\max} = 363^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 185^{\circ}\text{C}$;
3. → Températures des blocs graphite : $T_{\max} = 323^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 181^{\circ}\text{C}$;
4. → Températures des réflecteurs permanents : $T_{\max} = 240^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 182^{\circ}\text{C}$;
5. → Températures de l'hélium (montée) : $T_{\text{ent}} = 180^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{sor}} = 182^{\circ}\text{C}$.



Crayons combustibles,
niveau réflecteur du bas



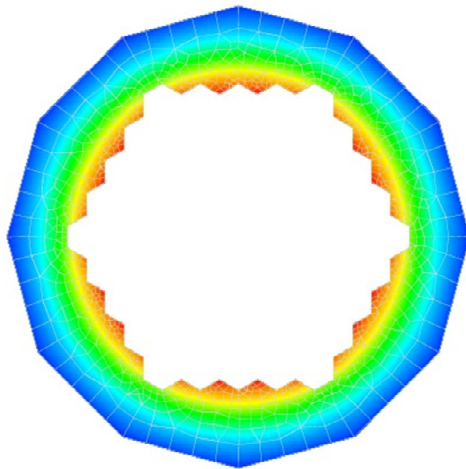
Tout type de blocs en graphite,
niveau réflecteur du bas

Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

- Modèle **réacteur 3D** (avec source froide contournant le bloc, **sans rayonnement**, coefficient d'échange **H constant**) :

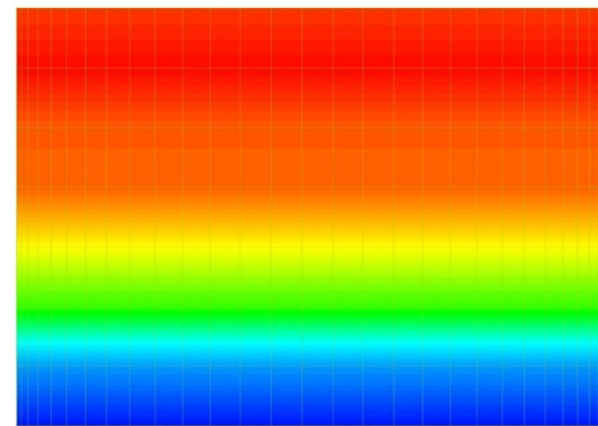
1. en stationnaire :

2. → Températures des combustibles : $T_{\max} = 363^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 185^{\circ}\text{C}$;
3. → Températures des blocs graphite : $T_{\max} = 323^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 181^{\circ}\text{C}$;
4. → Températures des réflecteurs permanents : $T_{\max} = 240^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 182^{\circ}\text{C}$;
5. → Températures de l'hélium (montée) : $T_{\text{ent}} = 180^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{sor}} = 182^{\circ}\text{C}$.



Réflecteurs permanents,
niveau réflecteur du bas

VAL - ISO
> 1.82E+02
< 2.40E+02
2.40E+02
2.37E+02
2.34E+02
2.31E+02
2.29E+02
2.26E+02
2.23E+02
2.20E+02
2.17E+02
2.15E+02
2.12E+02
2.09E+02
2.06E+02
2.03E+02
2.01E+02
1.98E+02
1.95E+02
1.92E+02
1.90E+02
1.87E+02
1.84E+02



Cuve,
vue de côté

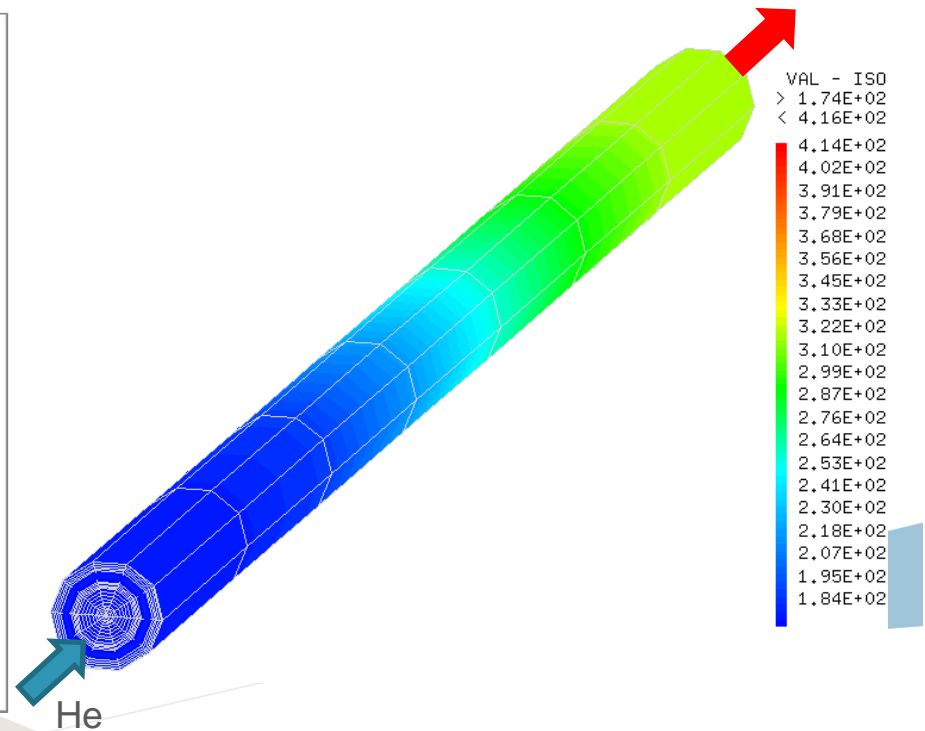
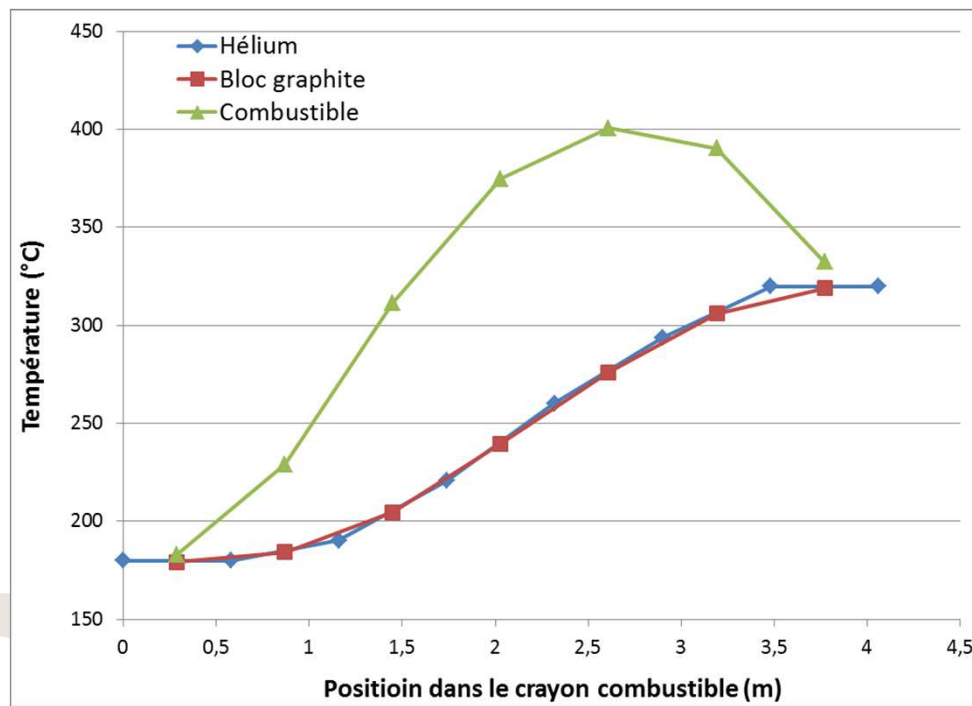
VAL - ISO
> 1.80E+02
< 1.82E+02
1.82E+02
1.82E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.81E+02
1.80E+02
1.80E+02
1.80E+02
1.80E+02
1.80E+02
1.80E+02

Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

- **Modèle crayon 3D (avec source froide contournant le bloc, sans rayonnement, coefficient d'échange H adapté) :**

1. en stationnaire :

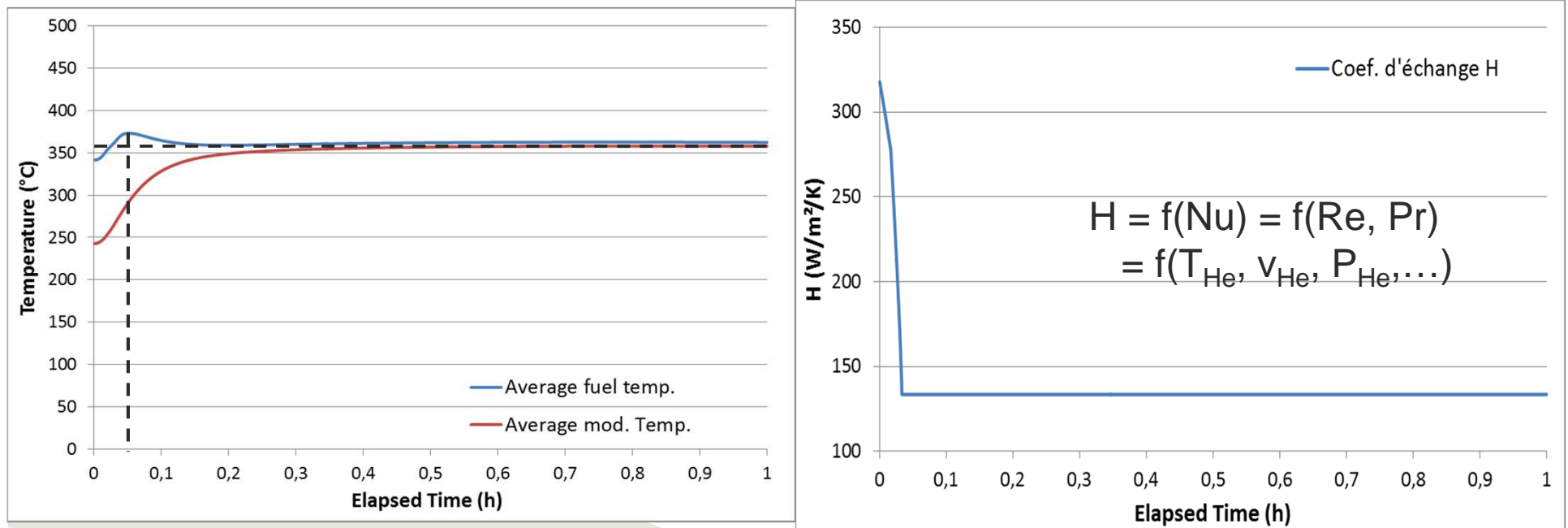
2. → Températures du combustible : $T_{\max} = 416^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 191^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{moy}} \approx 342^{\circ}\text{C}$;
3. → Températures du bloc graphite : $T_{\max} = 319^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 179^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{moy}} \approx 243^{\circ}\text{C}$;
4. → Températures de l'hélium : $T_{\text{ent}} = 180^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{sor}} = 320^{\circ}\text{C}$.



Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

- Modèle **crayon 3D** (avec source froide contournant le bloc, sans rayonnement, coefficient d'échange **H corrélé**) :

1. en transitoire :
2. – $P_{\text{nuclé}}$ et débit d'hélium issus des données expérimentales JAEA ;
3. – Pic de température : écarts de temps et de température vis-à-vis des résultats expérimentaux japonais.

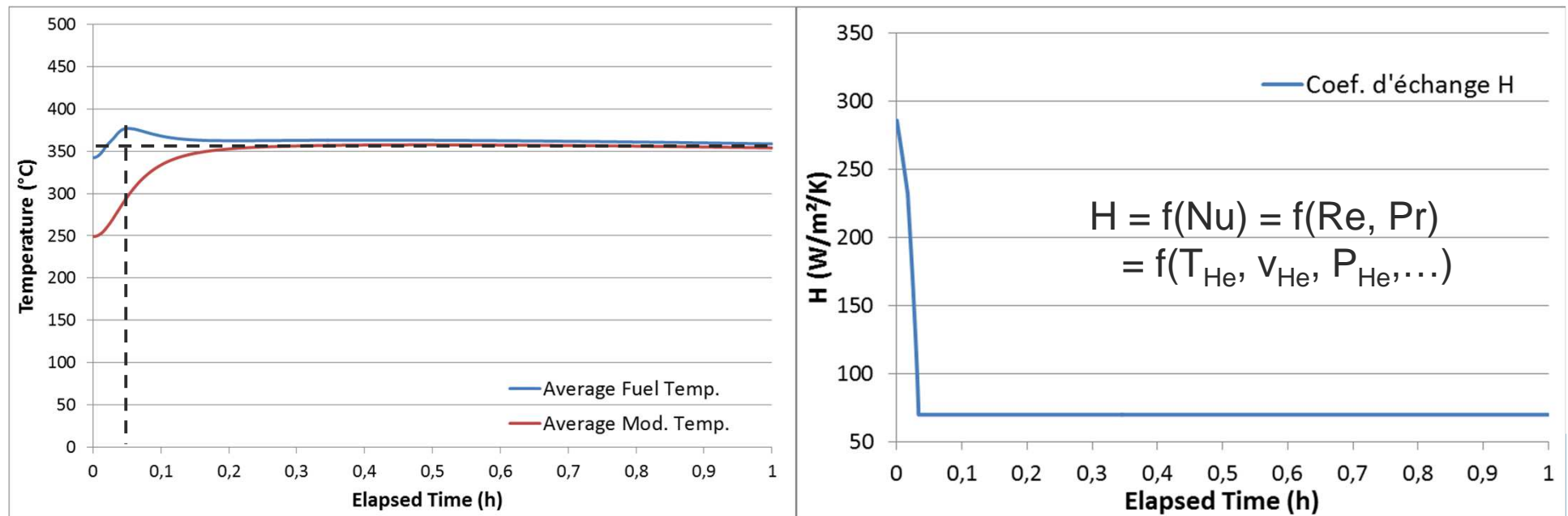


Modèle Thermo-hydraulique sous Cast3M

- Modèle crayon 3D (**avec source froide contournant le bloc**, avec **rayonnement**, coefficient d'échange **H corrélé**) :

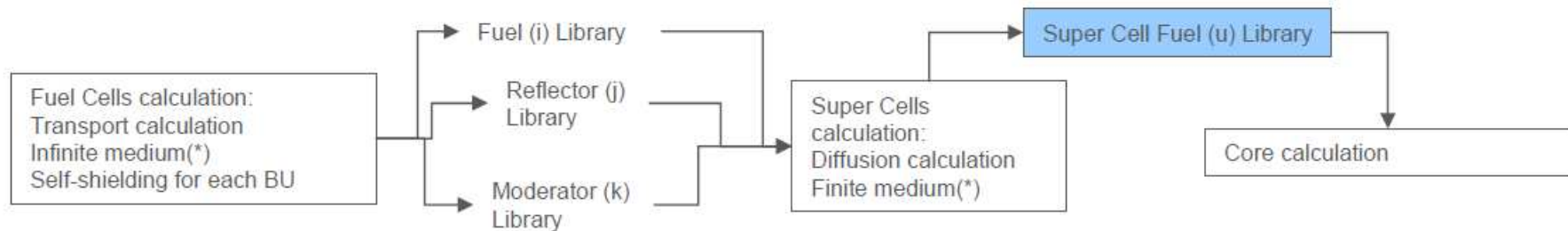
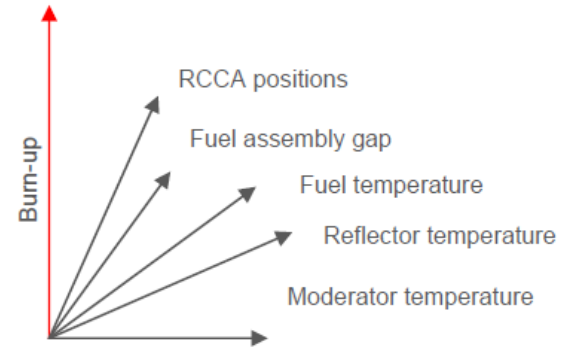
1. en transitoire :

2. – Echange radiatif ne joue pas un rôle important dans le modèle canal.

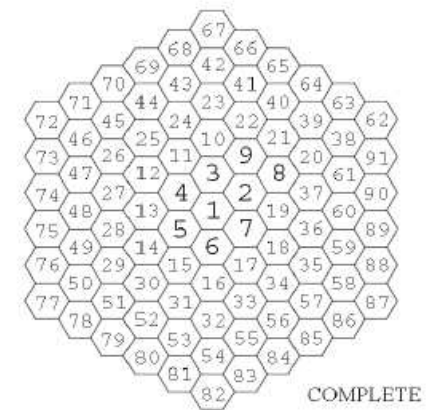
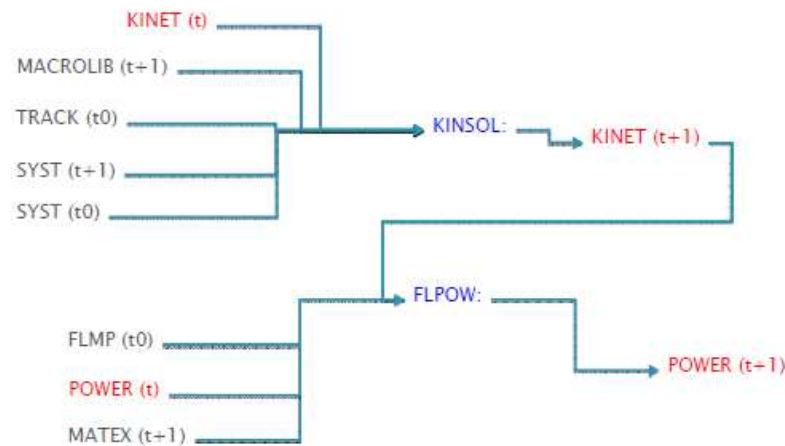


Modèle neutronique

- Fuel Cell, Fuel Super-Cell calculations and databank computation (DRAGON): Core calculation Model (DONJON/TRIVAC)
 - ✓ 30 fuel assembly types (different geometries, enrichments, and poison fractions)
 - ✓ 10 dimensions half-Microscopic Cross-Sections databanks (Macro Lib + some particular Cross-Sections, ie. XENON calculation): Not empty CS matrix

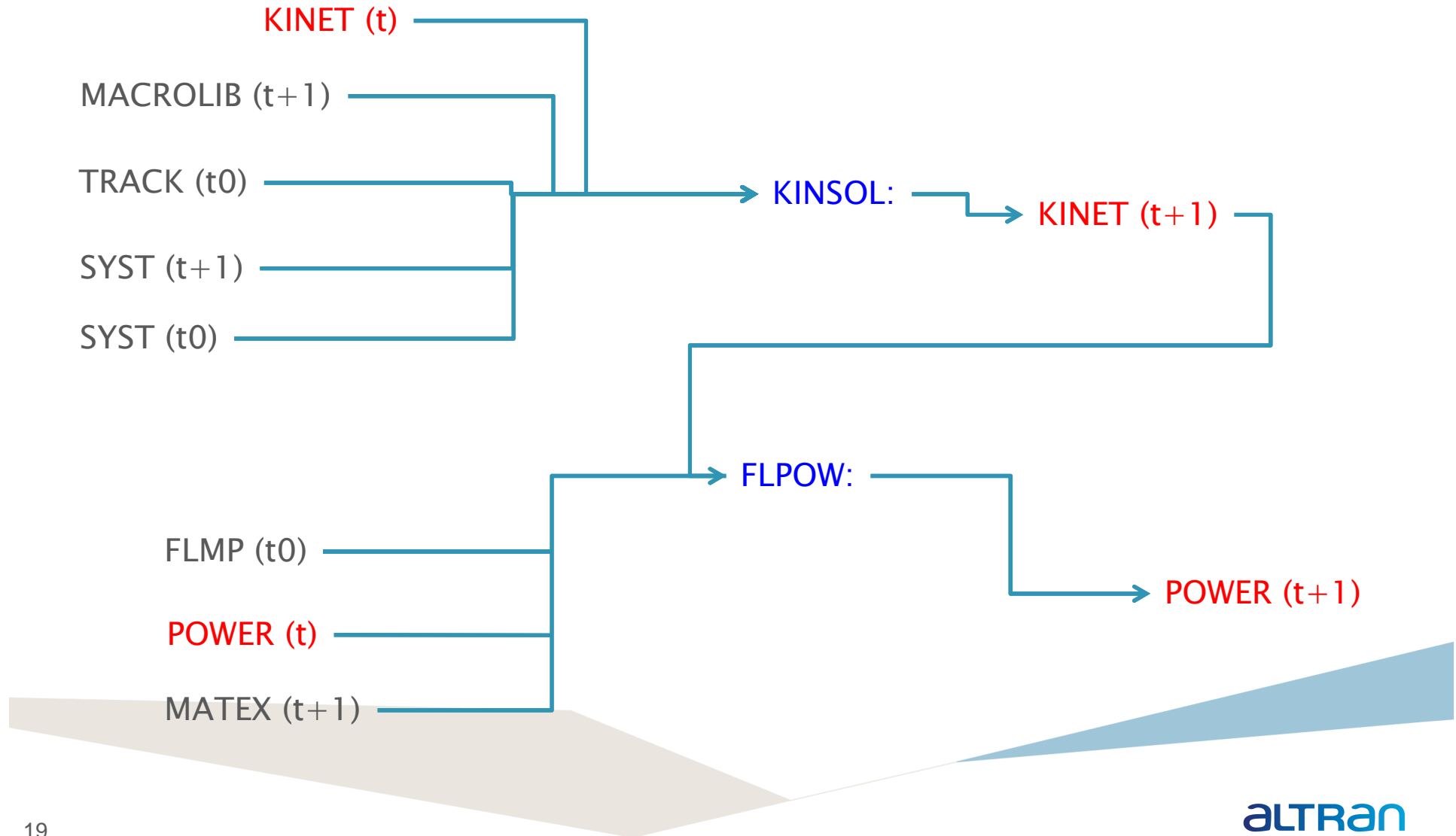


- KINETIC MODEL
 - ✓ Full implicit Model



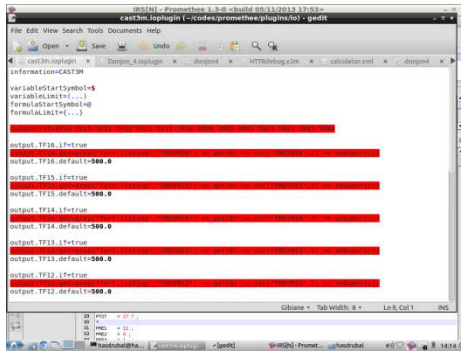
Modèle neutronique sous Dragon/Donjon

- Nouveau schéma de calcul pour les calculs cinétiques :

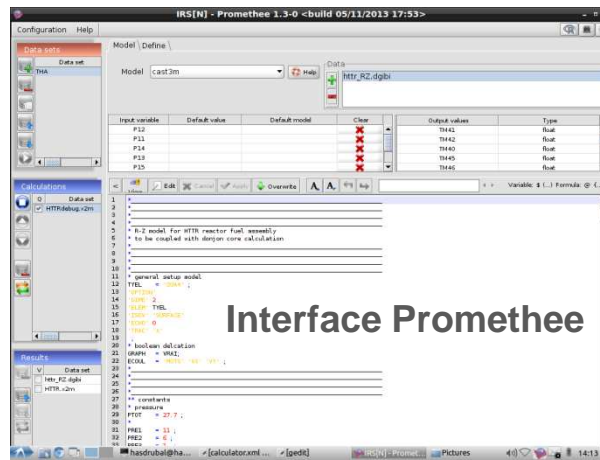


Couplage aux codes de calcul

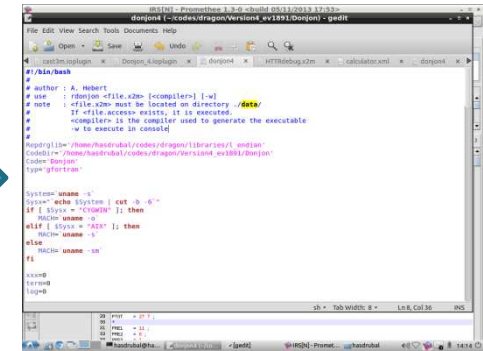
- Gestion des JDD d'entrée et de sortie dans Donjon et dans Cast3M ;
- Gestion automatique des critères de convergence et des pas de temps : Time step management.
- Modification dans « Promethee.R » : `#runshell$trap("INT") # to not allow ctrl-c to stop whole JVM, just this runshell`



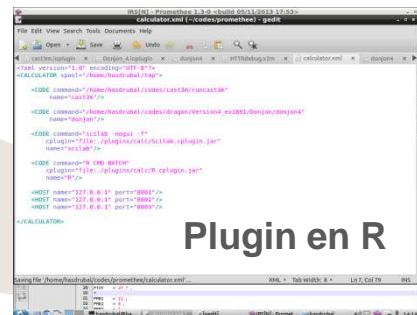
JDD Cast3M



Interface Promethee



JDD Donjon



Plugin en R

LOFC Test modeling / Geometry and mesh modeling (CFD)

Global definition of the mesh

- The mesh contains 2 055 968 cells
- Number of Tetra cells: 1 802 957
 - ✓ In the solid and fluid zone
- Number of Hexa cells: 246 593
 - ✓ In the fluid zone
- Height of the domain: 24,1943 m

Methodologies used to the mesh generation

Some region where there is helium flow is made using the hexahedral cells.

- Bloc, surface projection. This method can be very expensive regarding the time.
- But refinement of the mesh is more mastered.

Some region are meshed using the tetrahedral cells, especially in the solid region.

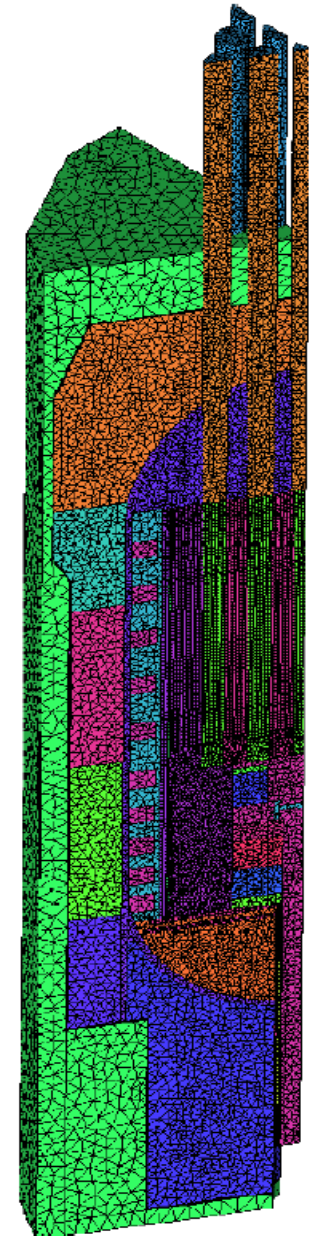
- Generation of the mesh using **Delanauy** processing or a Robust/Tetra processing.
 - This process is very quick.
 - But there is a very bad master of the mesh (number per direction for example)

Interfaces definition

It is recommended to minimize the number of **users** interface definition

CFX is able to properly create default interface domain in the **same** grid

- The model contains 16 independent grids
- Interface number: 63



LOFC Test modeling / Radiation modeling (CDF)

The transport equation of the Radiation intensity is given by:

$$\frac{dI_v(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = \left(- (K_{av} + K_{sv}) I_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + K_{av} I_b(\nu, T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{4\pi} dI_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}') d\Omega' + S \right)$$

$\nu = \text{frequency}$

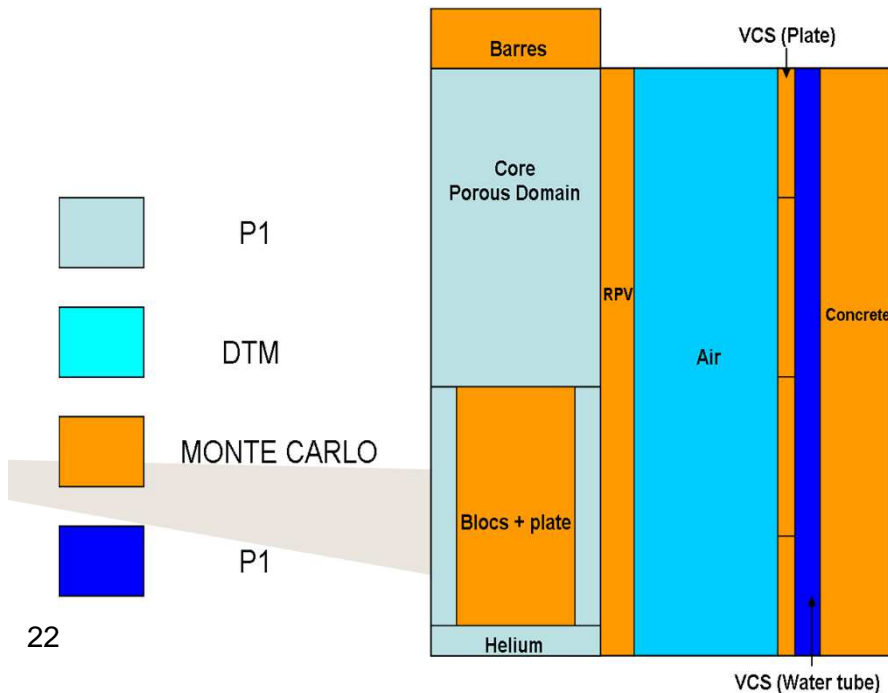
\mathbf{r} = position vector I_b = Blackbody emission intensity

\mathbf{s} = direction vector I_v = Spectral radiation intensity which depends on position (\mathbf{r}) and direction (\mathbf{s})

s = path length T = local absolute temperature

K_a = absorption coefficient Ω = solid angle

K_s = scattering coefficient Φ = in-scattering phase function



P1: Isotropical radiation

$$-\nabla \cdot \left(\frac{1}{3(K_{av} - K_{sv}) - A K_{sv}} \nabla G_v \right) = K_{av} (G_v - 4E_{bv})$$

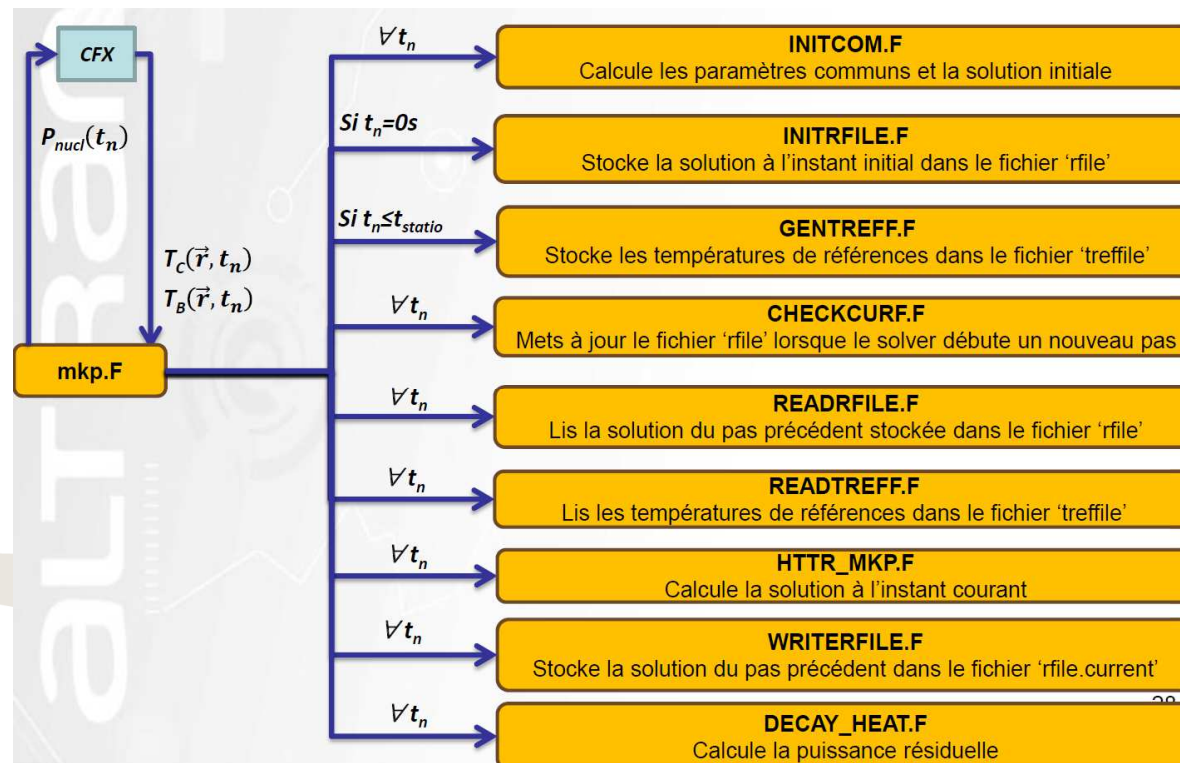
DTM: Isotropical scattering

$$\frac{dI_v(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = - (K_{av} + K_{sv}) I_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + K_a I_b(\nu, T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{4\pi} I_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}') d\Omega' + S$$

$$I_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = I_{vo} \exp(- (K_{av} + K_{sv}) s) + I_{bv} (1 - \exp(-K_a s)) + K_{sv} T_v$$

LOFC Test modeling / Methodology of the coupling KPM / CFD

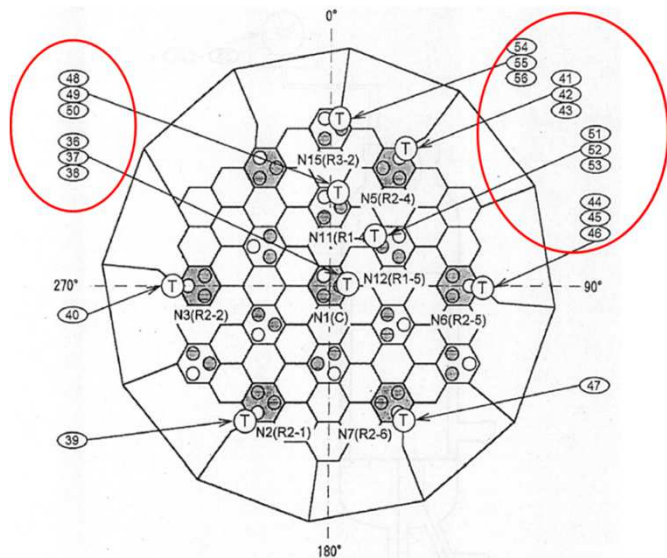
- **USER-Cell** FORTRAN 77 type routine
- Thermal feed-back (Doppler & Moderator);
- Iodine and Xenon modeling;
- 6 precursors groups;
- Decay heat calculation;
- Reactor Source level modelling;
- Time-depending P(z) emulation;
- Porous Media/ Heterogeneous Linear Temperature de-homogenization



- Neutronics feed-back coefficients are \rightarrow NEA data;

Results Steady state (run 1) / CR Temperature discrepancy (CFD)

Surface temperature on the control rod



Surface temperature on the CR are in Good agreement with the experiment Data of JAEA. The relative difference does not exceed 6%.

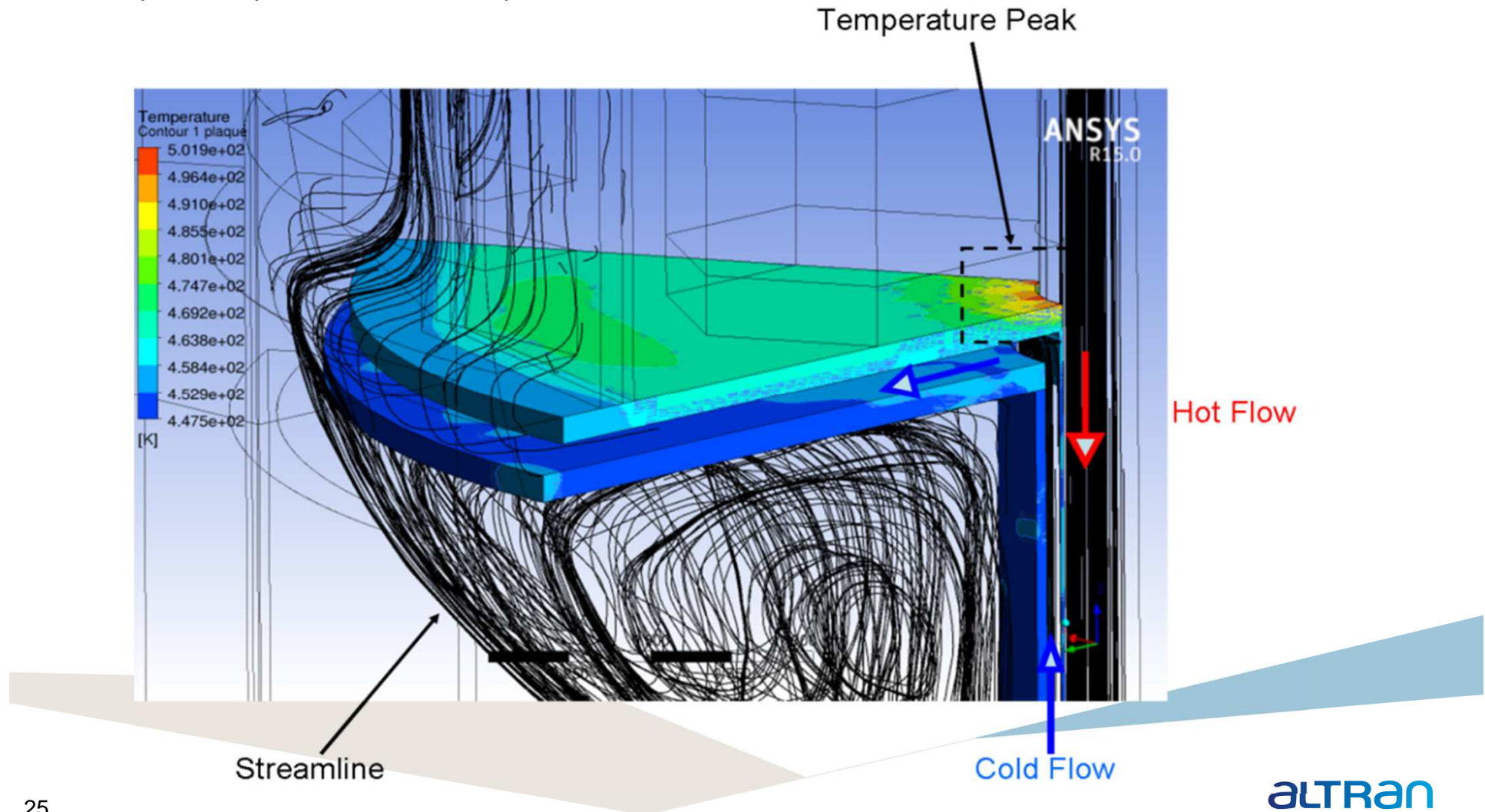
Nom du capteur dans le modèle CFX	Monitor position	Mesures (°C)	$v_{CFX} - v_{JAEA}$	$\frac{v_{CFX} - v_{JAEA}}{v_{JAEA}} * 100$ 0%
s36	CR guide tube surface temperature 1	180	-7	-4%
s37	CR guide tube surface temperature 2	181	-8	-5%
s38	CR guide tube surface temperature 3	180	-7	-4%
s41	CR guide tube surface temperature 6	180	-7	-4%
s42	CR guide tube surface temperature 7	183	-10	-5%

Nom du capteur dans le modèle CFX	Monitor position temperature	Mesures (°C)	$v_{CFX} - v_{JAEA}$	$\frac{v_{CFX} - v_{JAEA}}{v_{JAEA}} * 100$ %
s43	CR guide tube surface 8	183	-8	-5%
s44	CR guide tube surface 9	181	-11	-6%
s45	CR guide tube surface 10	183	-10	-6%
s46	CR guide tube surface temperature 11	183	-4	-2%
s48	CR guide tube surface 13	181	-7	-4%
s49	CR guide tube surface 14	181	-7	-4%
s50	CR guide tube surface 15	181	-8	-4%
s51	CR guide tube surface 16	179	-6	-3%
s52	CR guide tube surface 17	181	-9	-5%
s53	CR guide tube surface 18	181	-9	-5%
s54	CR guide tube surface 19	178	-7	-4%
s55	CR guide tube surface 20	182	-8	-4%
s57	Hot plenum 1A	335	-16	-5%

Results Steady state (run 1) / Plate behavior (CFD)

Complex helium flow around the reactor core support plate.

- Helium streamline around the plate
- Temperature peak due to the simplification of the model



Conclusion and future works

- ❖ Numerical simulation of thermal hydraulic and neutronic coupling of a Loss of forced coolant accident has been done in the HTTR case.
- ❖ Numerical results was compared with the experimental data provide by the JAEA (Japan Atomic Energy Agency)
- ❖ The study was performed using two codes
 - ❖ Cast3M and ANSYS CFX
- ❖ For Cast3M
 - ❖ The core is completely modeled
 - ❖ There is a problem in the radiation module development (2013)
 - ❖ Natural convection it is not modeled
 - ❖ Steady and transient simulation are made.
- ❖ For ANSYS CFX
 - ❖ The mesh contains 2 millions cells.
 - ❖ The VCS is modeled using a thermal circuit (conduction, natural convection and radiation)
 - ❖ For the permanent calculation, simulation are in good agreement with the experimental data.