

Mécanique des fluides dans CAST3M

CEA - Direction de l'Energie Nucléaire

DEN/DANS/DM2S

Service Fluides Numériques, Modélisation et Etudes



Plan



- Démarche de R&D
- Modèles physiques et numériques
- Exemples d'applications
 - TONUS pour l'IRSN
 - NAUTILUS pour Technicatome
 - Etudes liées à la fusion
 - ARCTURUS pour la thermohydraulique des RCG
- MISTRA
- Perspectives

La mécanique des fluides dans CAST3M, c'est ...

- la consolidation du code TRIO_EF (incorporé progressivement dans CAST3M depuis 1993)



- de nouveaux développements depuis 1995 (Volumes Finis non-structurés, nouveaux algorithmes implicites, couplages avec la mécanique et la neutronique, ...)

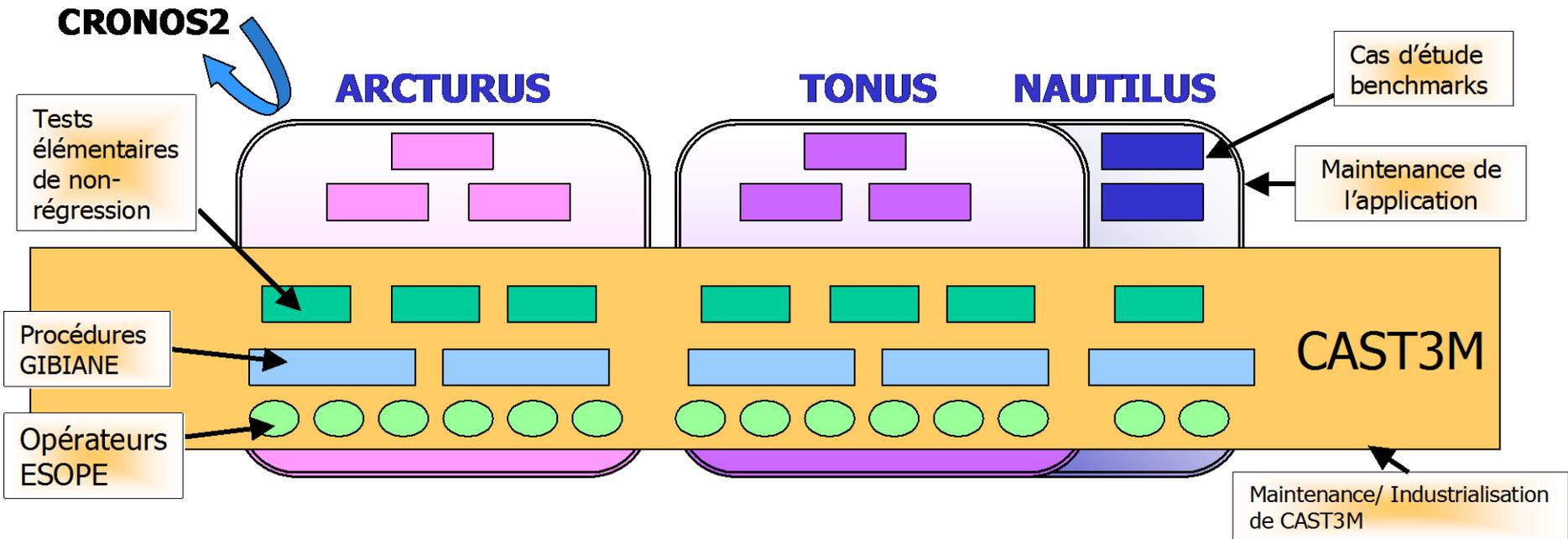
- de nombreux jeux de données (non-régression et études)

- une plateforme de R&D pour la modélisation physique et numérique

- la base d'applicatifs « industrialisés » comme TONUS (IRSN, DEN), NAUTILUS (TA) ou ARCTURUS (DEN)

- le support d'un cours de mécanique des fluides en 3ème année à l'ENSTA depuis 1997 (TPs, projets individuels)

Démarche de R&D



Les différentes formes des équations de Navier-Stokes

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Boussinesq

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p' + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \mathbf{g} + \frac{\mu_0}{\rho_0} \Delta \mathbf{u}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{\lambda_0}{\rho_0 c_p} \Delta T$$

- transferts thermiques forts

- pressurisation

**DISTRIBUTION ou
COMBUSTION LENTE**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

Bas Mach

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p' + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) + \frac{dP}{dt} = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T)$$

$$\rho = \frac{P(t)}{RT} \quad \mu = \mu(T), \lambda = \lambda(T)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

**Compressible
(plus général)**

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}} \cdot \mathbf{u})$$

$$P = \rho R T \quad \mu = \mu(T), \lambda = \lambda(T)$$

- ondes acoustiques

**DEFLAGRATIONS
RAPIDES or
DETONATIONS**

Les modèles physiques

Modèles d'écoulements

- ❑ écoulements incompressibles ou dilatables (NS approx. de Boussinesq)
- ❑ écoulements à faible nombre de Mach (solveur pression bas Mach et solveur compressible préconditionné)
- ❑ écoulements compressibles (Euler, NS)
- ❑ écoulements multi-espèces, réactifs ou non (H₂, He, N₂, O₂, H₂O, CO, CO₂)
- ❑ modèles de turbulence: algébrique, $k-\varepsilon$ ou SGE
- ❑ modèle diphasique homogène équilibré
- ❑ modèle diphasique bifluide (aspersion, combustion)
- ❑ équations d'état: gaz parfait ou réel

Modèles homogénéisés

- ❑ Navier-Stokes en milieu chargé
- ❑ Equations de l'énergie

Modèles de combustion (H₂)

- ❑ $C_v(T)$, $C_p(T)$ polynômes 4ème ordre
- ❑ cinétique Arrhénius (déflagrations laminaires ou détonation),
- ❑ modèles EBU ou corrélations (déflagrations turbulentes)
- ❑ modèle recombiner catalytique

Condensation

- ❑ condensation en paroi (Chilton-Colburn)
- ❑ condensation en masse

Couplages / Chainages

- ❑ mécanique dans CAST3M
- ❑ thermique (conduction/rayonnement) dans CAST3M
- ❑ neutronique (CRONOS)

Les méthodes numériques

Discrétisations Eléments Finis

- ❑ Eléments Finis (linéaires ou quadratiques), 2D, 2Daxi ou 3D
- ❑ solveur pression (méthode projection ou directe)
- ❑ formulations semi-implicites ou implicites

Discrétisation Volumes Finis non-structurés

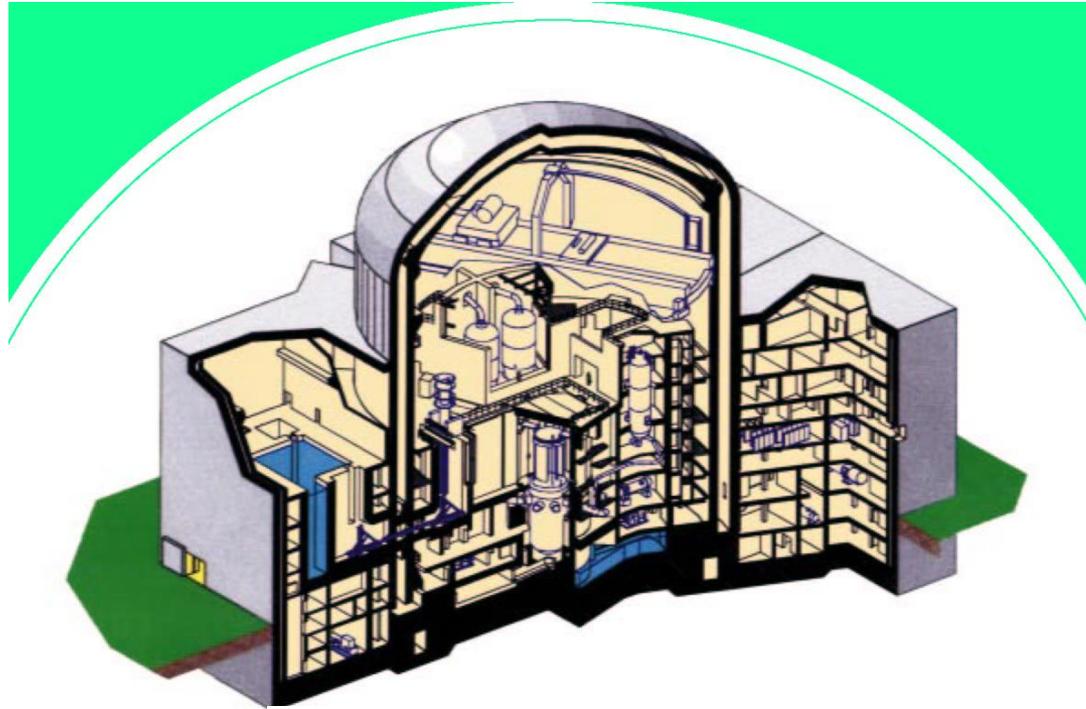
- ❑ Volumes Finis non-structurés, 2D ou 3D
- ❑ ordre 2 en espace (MUSCL) et en temps
- ❑ solveurs hyperboliques (solveur de Riemann approchés, y compris versions préconditionnées bas Mach): VLH, AUSM+, HUS
- ❑ formulations explicites ou implicites

Discrétisation 0D Multi-compartiments

- ❑ Volumes finis (bilan) masse & énergie reliés par éléments 1D (écoulement)
- ❑ formulation implicite

Solveurs systèmes

- ❑ solveurs directs (efficaces pour petits systèmes et matrices quasi-constantes)
- ❑ méthodes itératives: GMRES ou Gradients Conjugués (CG ou BiCGStab) avec préconditionneurs ILU ou MILU
- ❑ Méthode sans matrice (R&D)

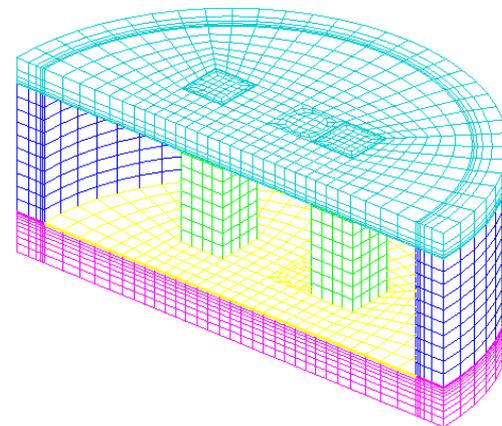
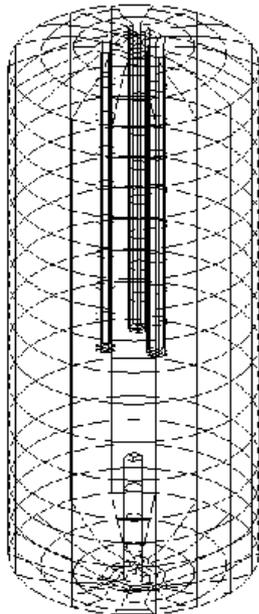
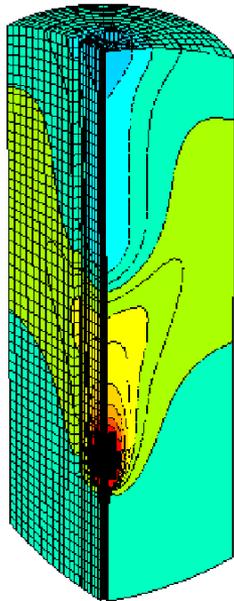
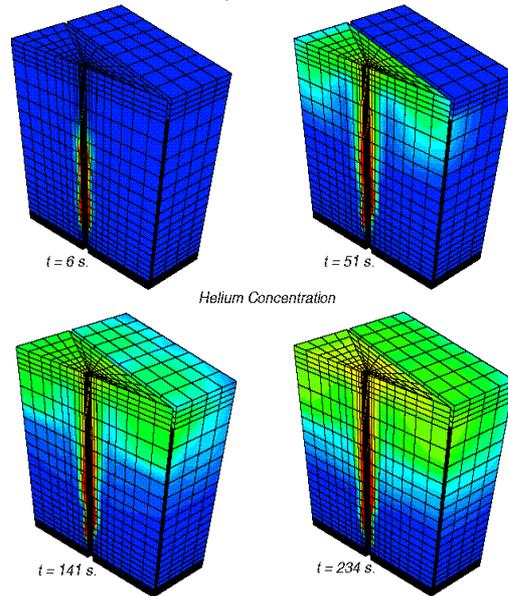
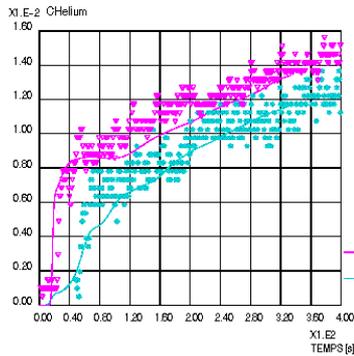


Application TONUS pour l'étude du risque H₂ dans les enceintes de REP

Thermohydraulique enceinte, distribution hydrogène

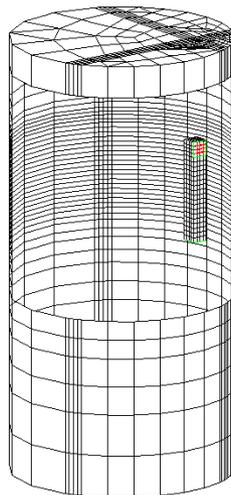
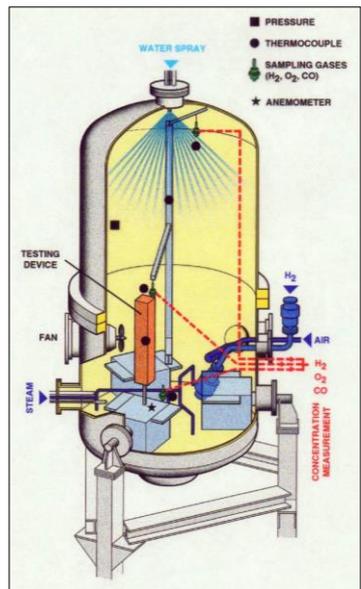


LSGMF - AECL experiment - Helium injection
Bottom Injection - 5 cm diameter

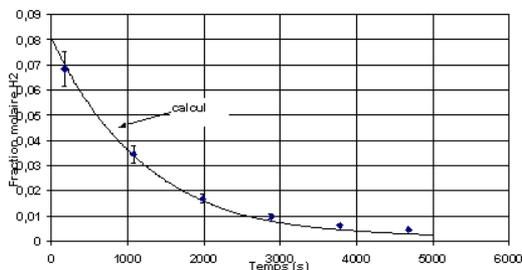
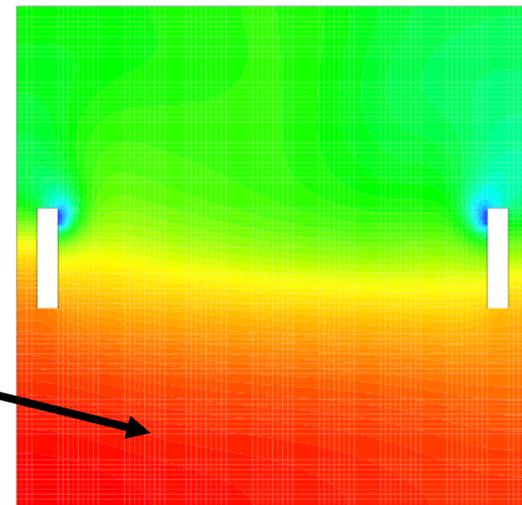


- géométries 2Daxi, 3D
- maillages ~ 10000 - 50000 éléments
- transitoires longs (plusieurs heures)
- condensation en paroi / couplage thermique murs, systèmes de mitigation (aspersion, recombineur)
- modèle 0D et modèle multiD (discrétisation EF, solveur pression – méthode de projection)
- implicite
- validation sur expériences **MISTRA**, PHEBUS, LSGMF, TOSQAN, KALI, MAEVA
- benchmarks avec codes dédiés (GOTHIC, GASFLOW) ou CFD

Mitigation du risque H2 (TONUS), Récombineurs H2

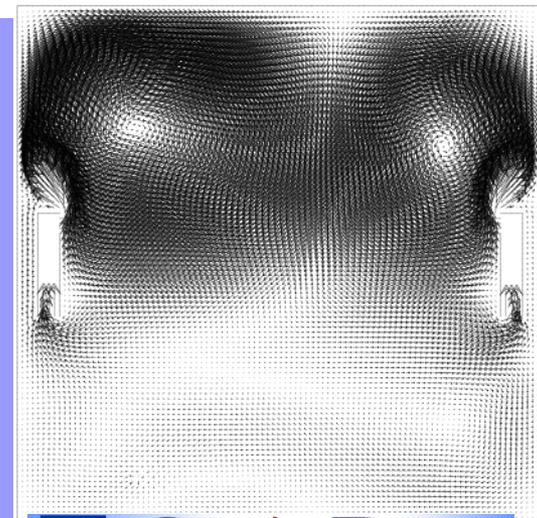


Conc. H2 plus riche en bas (effet thermique domine flottabilité)

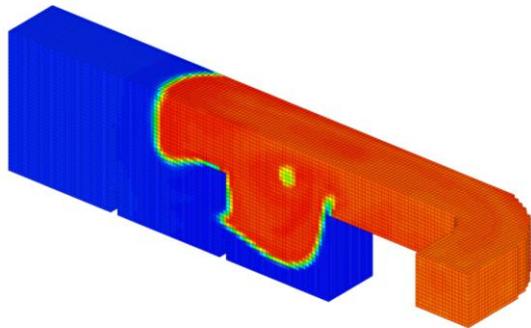


Lumped-Parameter approach

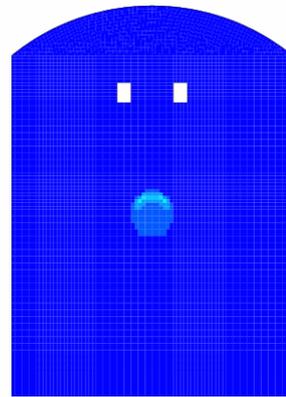
- Validation du modèle recombiner de TONUS à partir d'essais KALI & H2PAR
- Etude de l'effet du positionnement des recombiners sur l'efficacité globale (calculs multi-D) dans le cadre du projet SARNET



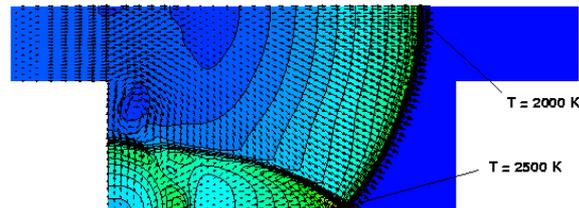
Combustion / Détonation H2



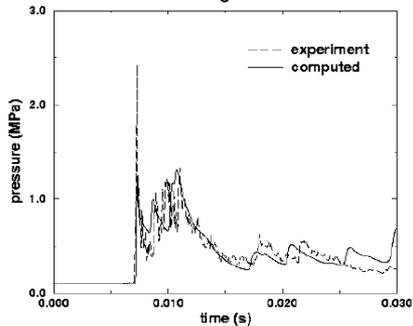
Calculs IRSN RUT HYC01



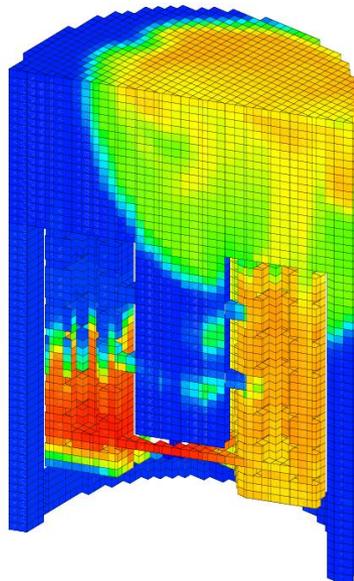
Calculs DEN Détonation 2D



Pressure (Pa) at $t = 7$ ms: min = $0.10E+6$ max = $2.32E+6$
 VLH, SO=TO=2, DX=DY= 0.05 m
 3D isolinee: min = $0.136E+6$ max = $2.29E+6$
 Gauge P5

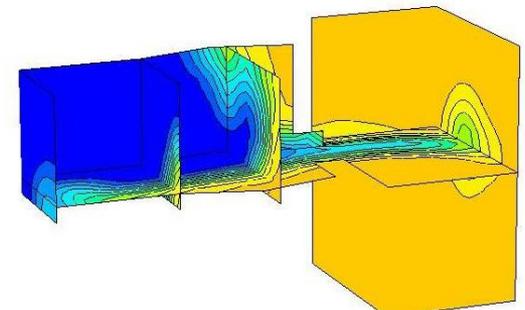


Calculs DEN RUT Stm4



Calculs IRSN modèle EPR

- Géométries de grande taille (plusieurs milliers de m³)
- Volumes Finis non-structurés (maillages hexahédres, tétrahédres, prismes)
- 25000 – 50000 éléments
- 2nd ordre en espace et en temps
- cinétique globale ou modèle vitesse de flamme (CREBCOM)
- validation sur expériences RUT, DRIVER, Bourges, Orléans



Calculs DEN HDR E12.3.2

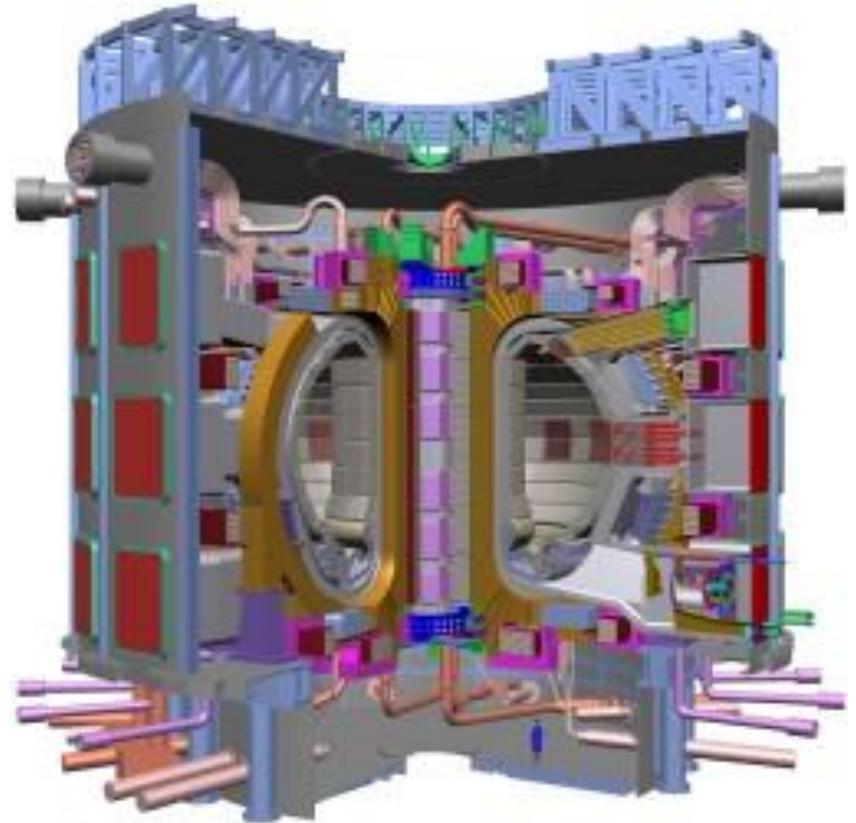


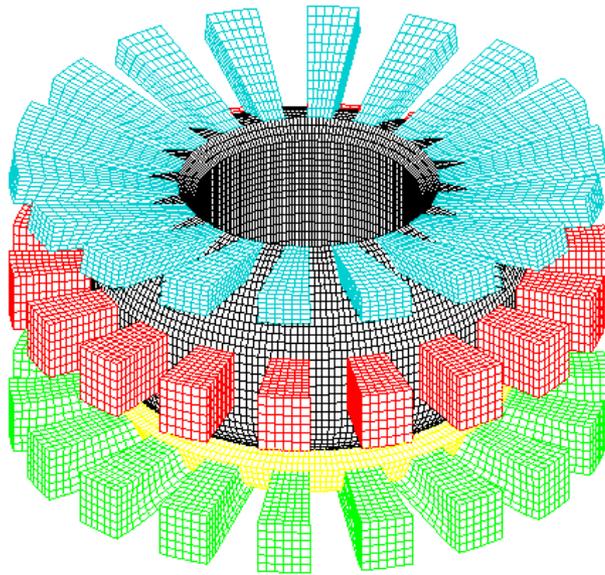
Application NAUTILUS pour l'étude du risque H₂ pour les réacteurs PN



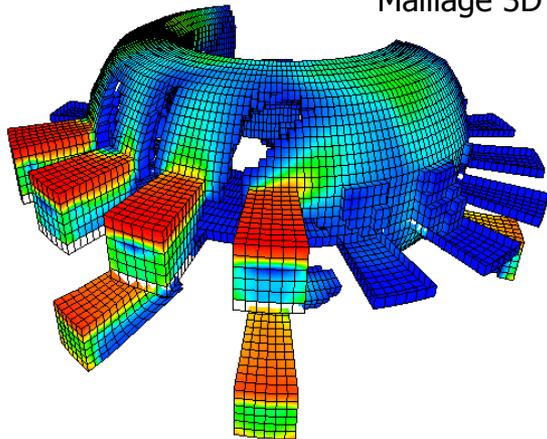
EFDA

Applications à la fusion

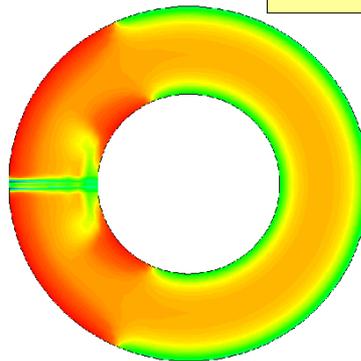




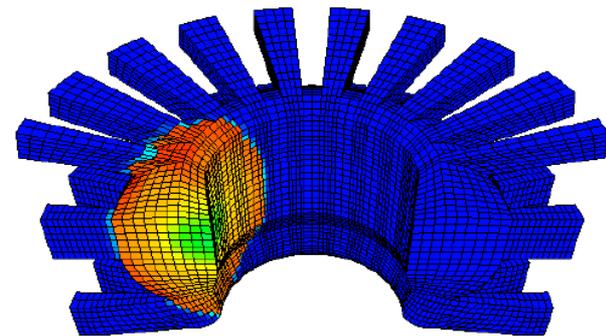
Maillage 3D avec ports



Dispersion H2 suite à fuites pompes cryogéniques



Brèche vapeur impactant paroi

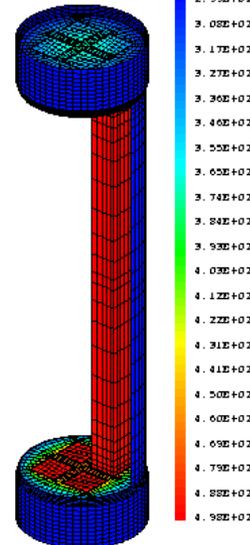
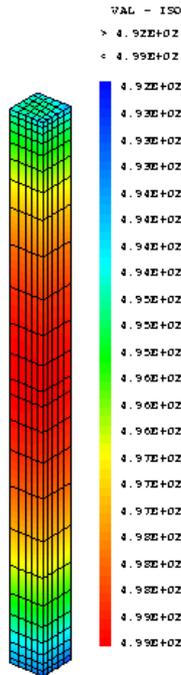
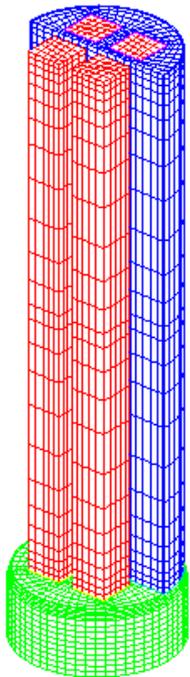
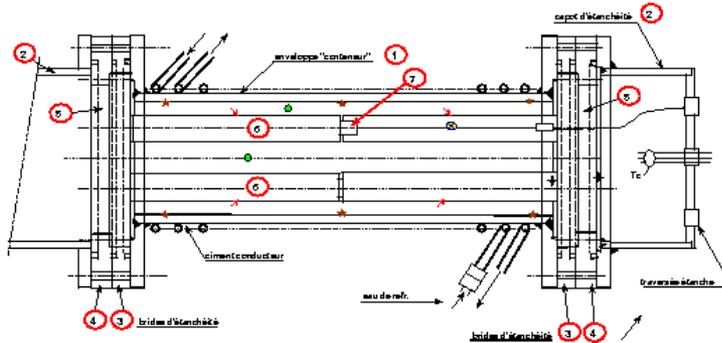


Détonation H2

- Modélisation de plusieurs scénarios d'accidents (2002-2004):
 - brèche vapeur avec production H2 par réaction H2O/Be en paroi
 - fuites d'H2 pompes cryogéniques (petites quantités d'H2)
- Modélisation de la fuite, distribution d'H2 dans géométrie 3D et explosion
- Comparaisons CAST3M / codes FZK
- 2005:2006: Etude de l'inertage comme moyen de mitigation du risque

Application ARCTURUS pour l'étude de la thermohydraulique des RCG

TH RCG: Prise en compte du rayonnement (ARCTURUS)



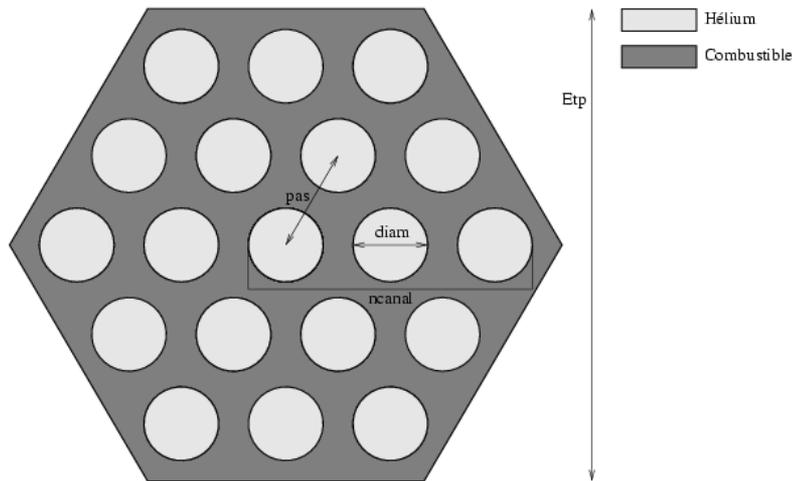
- Transferts radiatifs sont souvent prépondérants dans TH RCG (EPR)
- Opérateur « RAYE » de CAST3M (Rayonnement en cavité, en milieu transparent)

$R = (I - \epsilon) (I - (I - \epsilon)F)^{-1}$ matrice de rayonnement, avec F matrice des facteurs de forme et ϵ champ d'émissivité.

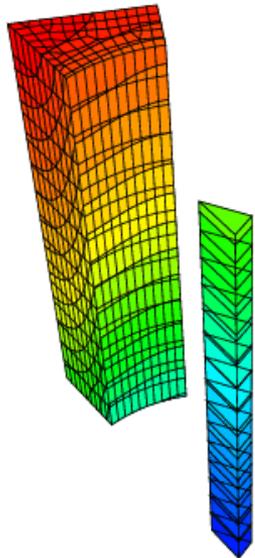
Puissance rayonnée: $\phi = R \cdot \epsilon \sigma T^4$, σ constante de Stefan

- Grand coût mémoire et CPU
- Travail en cours: validation sur expérience THERCE et amélioration algorithmes conv. nat. / cond / ray.
- Améliorations physique futures: prise en compte d'un milieu absorbant (CO₂, H₂O) ou diffusant (particules)
- Améliorations numériques futures: décomposition matrice, méthode double grille

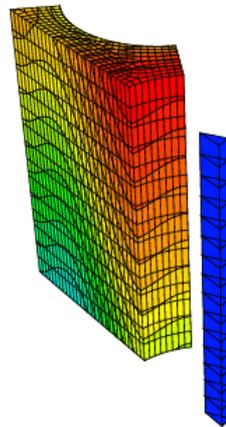
TH RCG: Etude du bouchage d'un canal He (ARCTURUS)



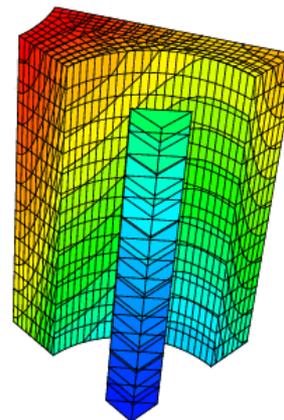
- Objectif: déterminer la température max. de combustible
- Couplage thermique 3D (conduction, rayonnement) avec un modèle TH 1D
- Discrétisation par EF
- Calculs permanents (2003)
- Couplage avec neutronique (CRONOS2) en 2004-05



Régime nominal:
 $492K < T < 1090K$

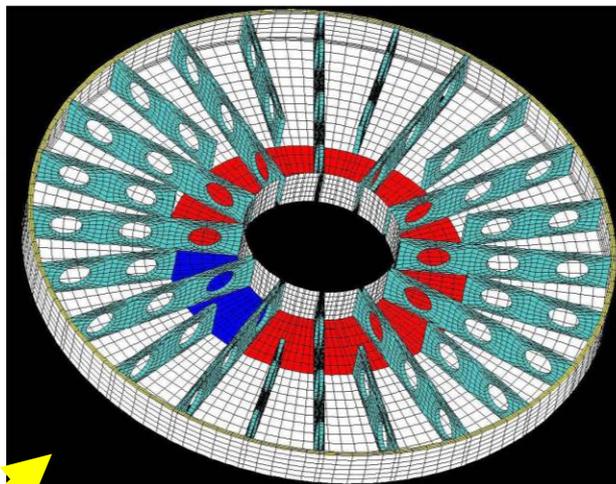
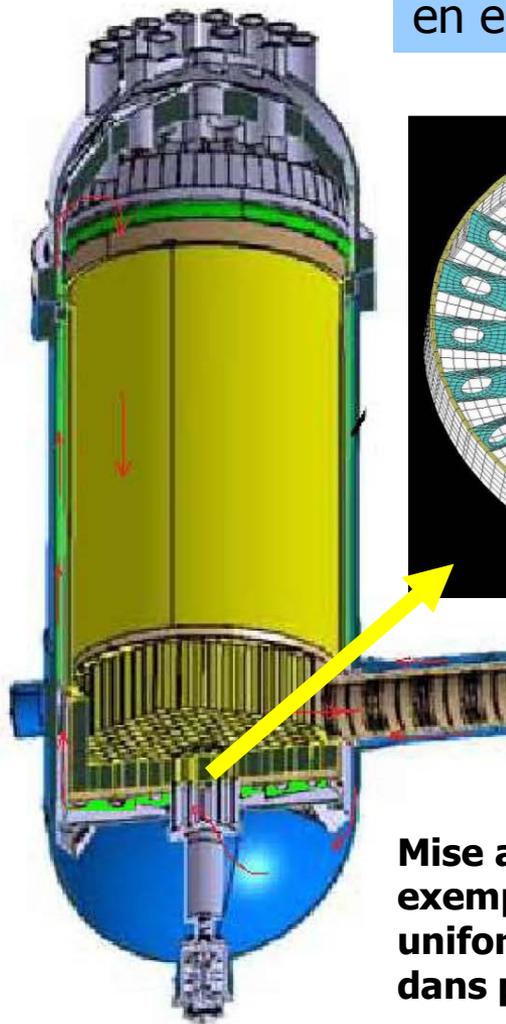
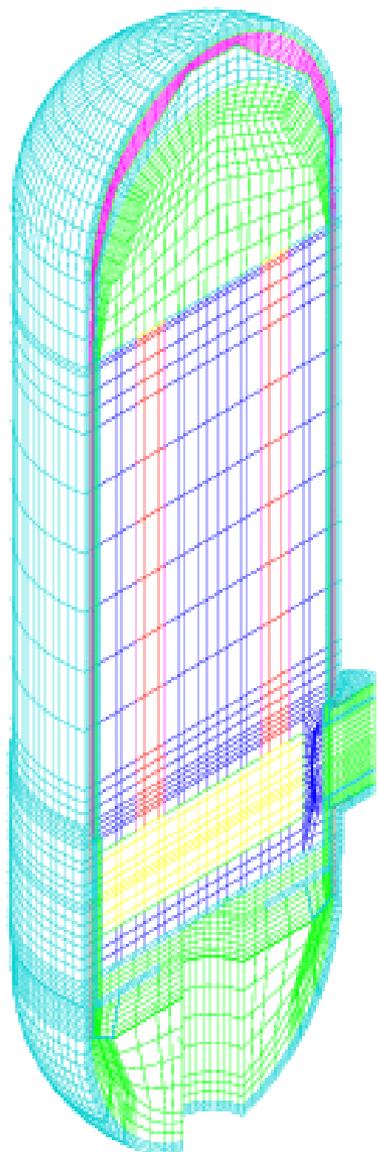


Régime accidentel:
 $496K < T < 1260K$

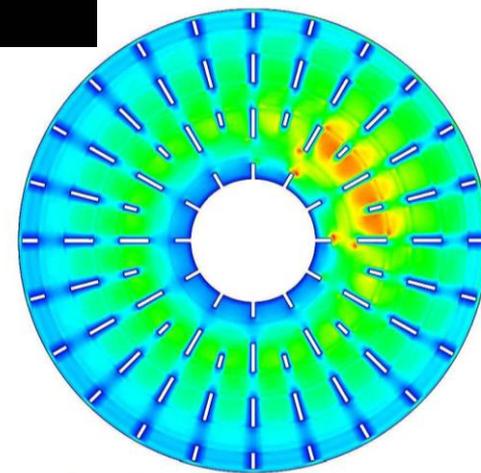


TH RCG: Modélisation 3D du HTGR (en cours)

Objectif: Etude de la dissymétrie d'écoulement en entrée de coeur (nécessité d'un modèle 3D)



Mise au point du modèle 3D: exemple, plaque pour uniformiser l'écoulement dans plenum inférieur



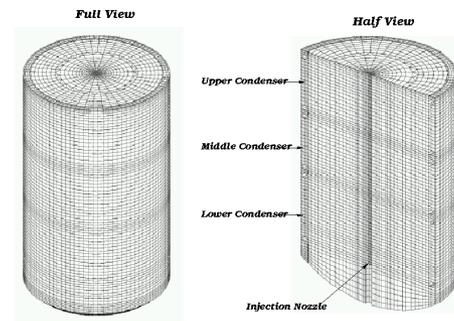
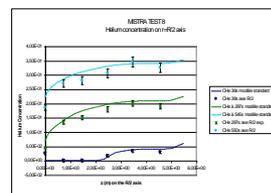
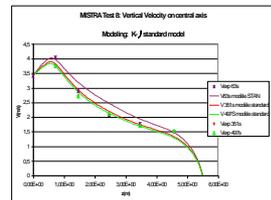
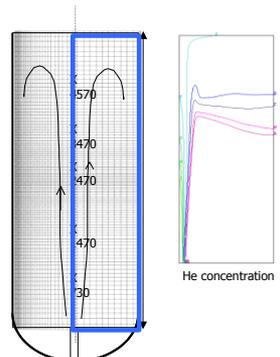
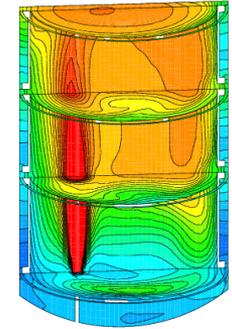
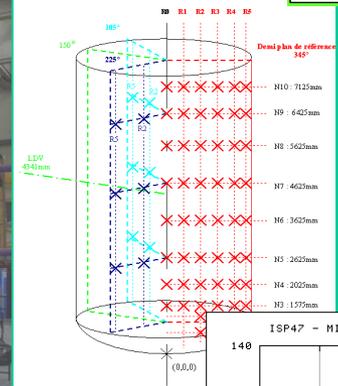
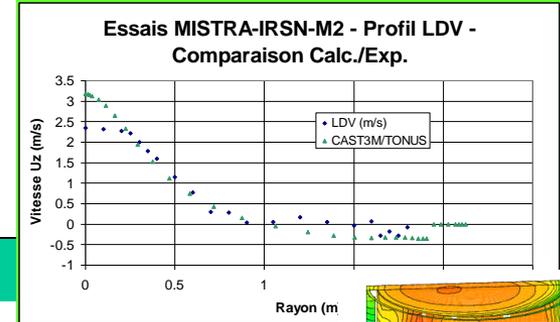
Norme de vitesse

MISTRA et la validation des modèles de distribution en présence de vapeur d'eau dans un grand volume

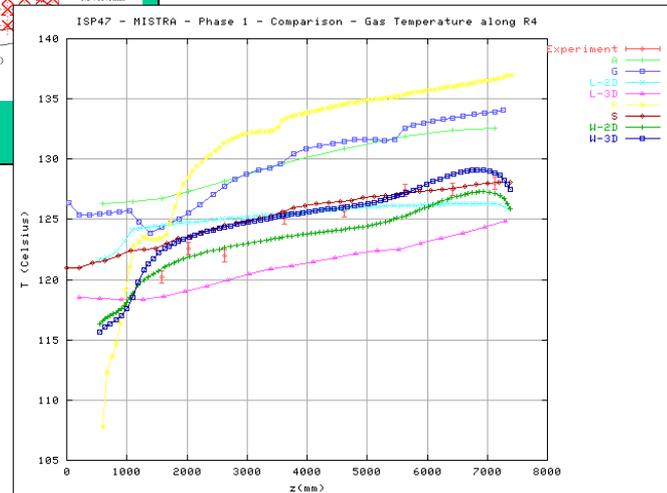
Validation sur base d'essais MISTRA



	MICOCO	IRSN-M1	IRSN-M2
Pression (bar)	3,6+/-0,1/3,73	3,13/3,14	2,64/2,83
T gaz (°C)	130+/-1/127,2	124,5/123,6	113,7/112,8
Qcond haut (g/s)	39,2+/-0,6/37,1	0,65+/-0,35/0,0	51,0/45,2
Qcond med. (g/s)	34,0+/-1,1/31,7	65+/-1/64,5	34,6/37,8
Qcond bas (g/s)	33,5+/-1,2/33,3	1,95+/-0,05/0,0	38,0/41,6
Qcond Par. (g/s)	16,0+/-0,3/17,8	14,2+/-0,5/15,6	14,7/15,4

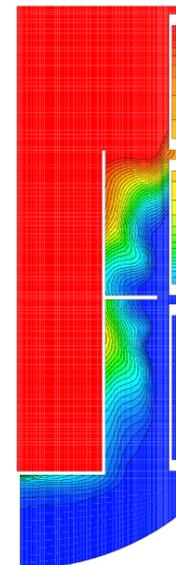
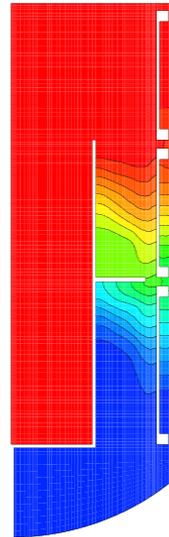
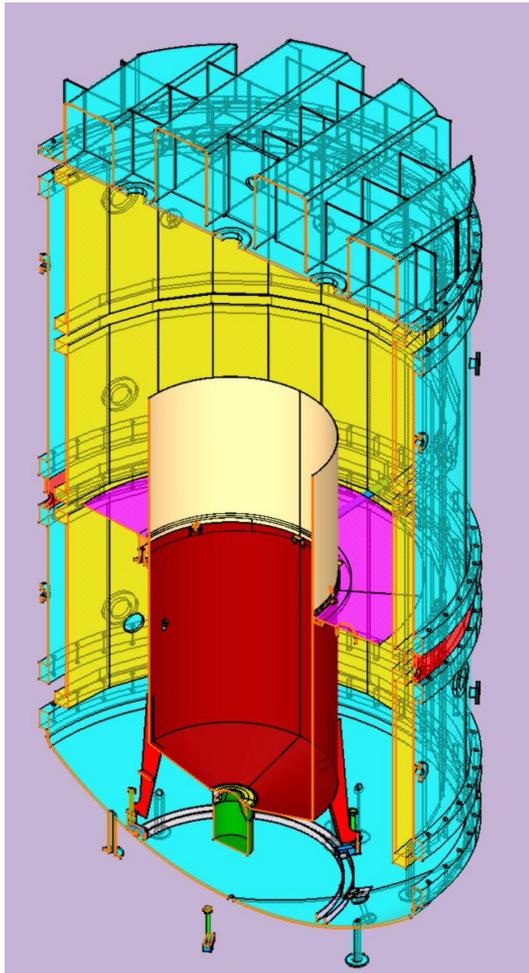


85123 elements in FLUID and 34779 elements in SOL



ISP47: Exp, GOTHIC, GASFLOW, DEFINE, CFX, TONUS

Futurs essais MISTRA en présence de compartiments



Essais M6 pour IRSN (TONUS)
Essais TA3 pour TA (NAUTILUS)
Essais d'inertage ITER (?)



La fin de l'histoire ?



Distribution

- La dispersion des résultats de l'ISP47 montrent qu'il reste des marges de progrès
- Pour l'évaluation du risque h₂, grande précision spatiale requise
- Effet d'échelle (extrapolation au cas réacteur)
- Modélisation de la turbulence

Combustion

- Caractère peu prédictif des modèles dans le cas des flammes lentes
- Modélisation de l'allumage et de l'extinction d'une flamme
- Interaction avec la turbulence

Validation

- Propriétés macroscopiques de n gaz
- Précision des mesures de concentration

**A dans 10 ans ...
si nos sponsors nous prêtent vie**