

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



LE CODE TRIOCFD

Mathieu Peybernes

DEN/DANS/DM2S/STMF/LMSF

HPCDD, 7/04/2016

1. Le logiciel TrioCFD
2. Quelques Applications
3. Conclusion. Perspectives

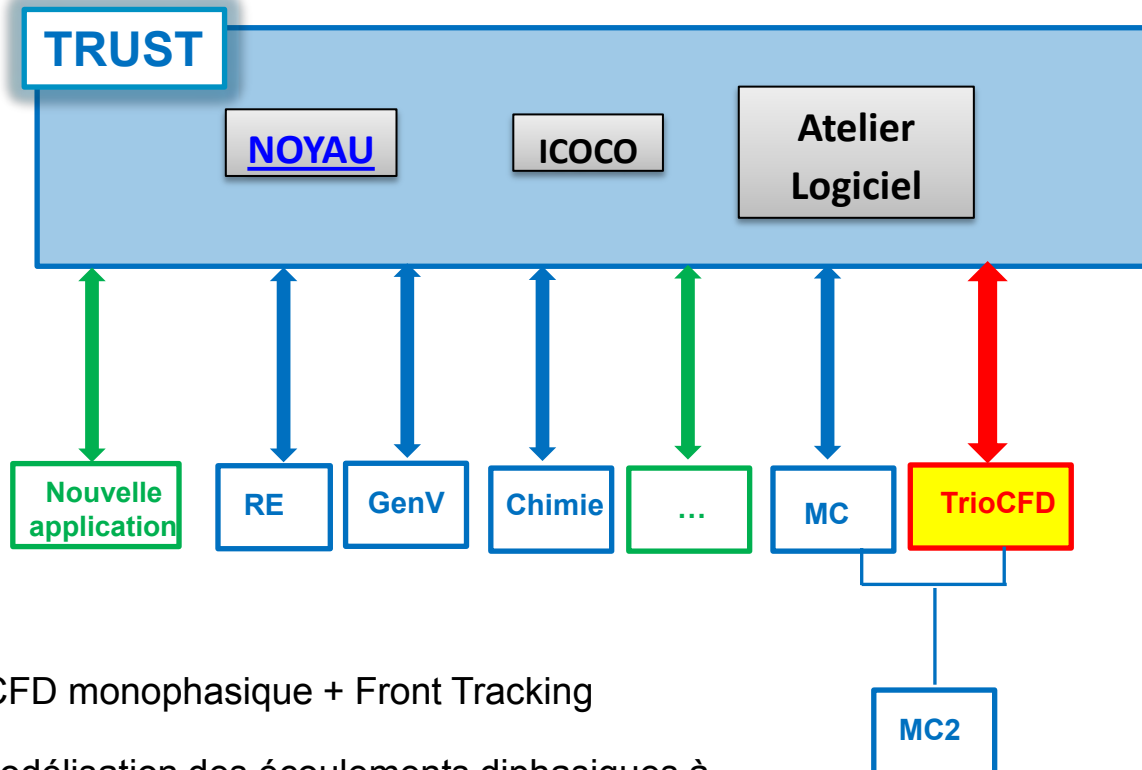
1. Le logiciel TrioCFD
2. Quelques Applications
3. Conclusion et perspectives

1. Le logiciel TrioCFD
 - Architecture du code
 - Modélisation physique
 - Méthodes numériques
 - Parallélisme
2. Quelques Applications
3. Conclusion et perspectives

- ❑ Développé depuis 1996 au sein de la DEN, passage en **OpenSource** en 2015 et découpage du projet **Trio_U** en **TRUST** et **TrioCFD**.
- ❑ TrioCFD est la partie « application » reposant sur la plateforme informatique TRUST
- ❑ Résout les équations aux dérivées partielles par la méthode des **volumes différences finis** ou **volumes éléments finis**
- ❑ Code multi-physique principalement orienté vers la **mécanique des fluides** et les applications liées au nucléaire civil
- ❑ Des interfaces à des produits de pré et post (Salomé, Paraview, VisIt...), à des bibliothèques (MPI, Metis, PETSc, MED...)
- ❑ Code 2D/3D développé en C++ (1200 classes)

- ❑ Le parallélisme est intrinsèque (découpage de domaines avec recouvrement). Communications MPI
- ❑ Des outils pour la [vérification/validation](#), **non régression/portage**
- ❑ un **outil de recherche « fondamentale »** utilisé pour mener des activités de recherche (réalisation de nombreux stages et thèses basés)
- ❑ Page web : <http://www-trio-u.cea.fr/>
- ❑ Installation **multi-plateforme** (préférence Linux)

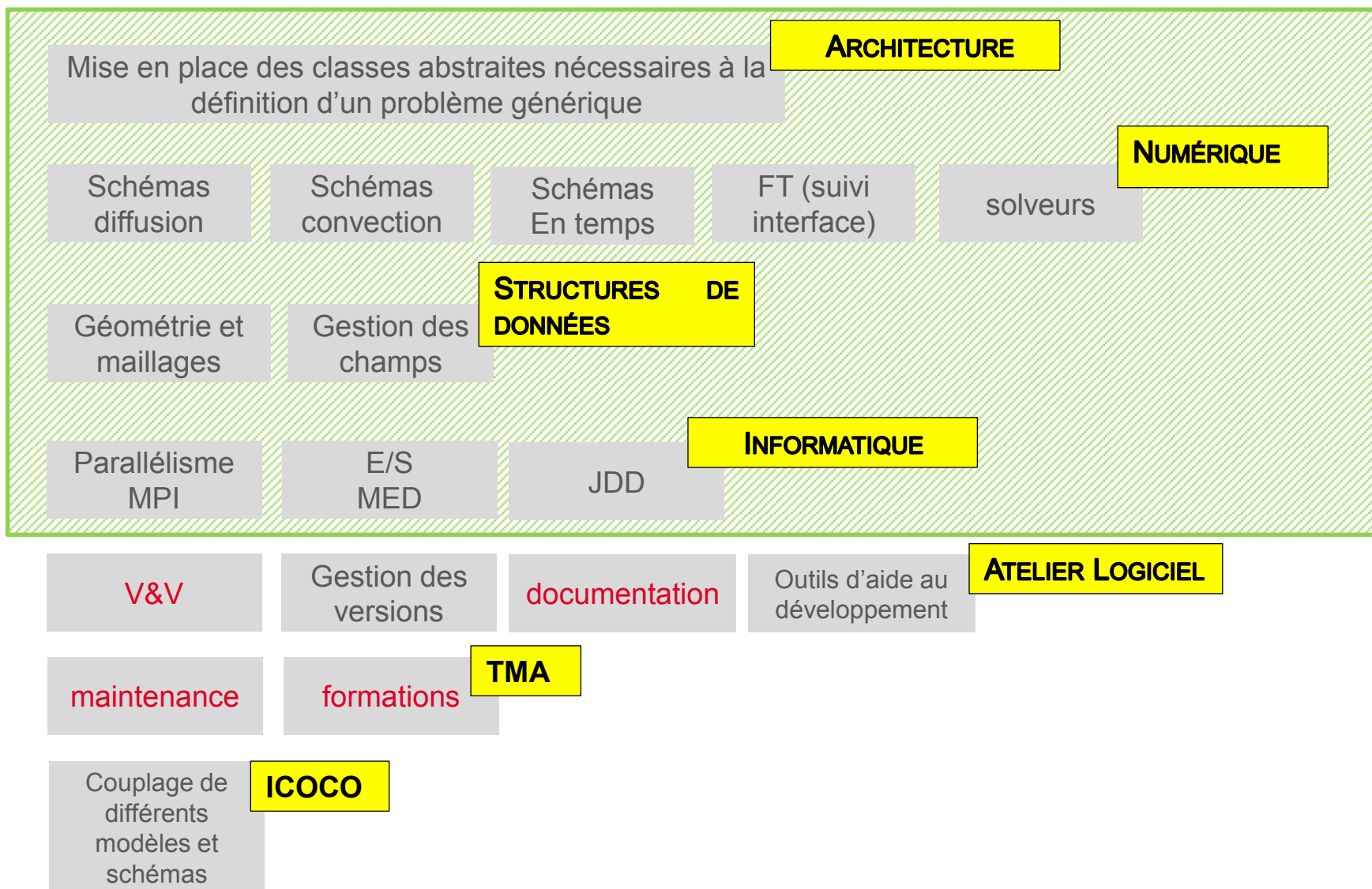
- ❑ Le code TrioCFD repose sur la plateforme informatique TRUST



- TrioCFD : CFD monophasique + Front Tracking
- DNS-ijk : modélisation des écoulements diphasiques à l'échelle locale instantanée
- MC2 : modélisation de la thermohydraulique du cœur des RNR
- MPCube : transport et diffusion en milieu poreux

Applications actuelles
Applications futures

NOYAU



❑ Ecoulement incompressible ou faiblement compressible

- *Hypothèse de Boussinesq*

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

- *Modèle quasi-compressible*

$$\rho = \rho(P, T) \text{ for low mach numbers}$$

❑ Ecoulement Laminaire ou turbulent (DNS/RANS/LES)

❑ Navier Stokes avec ou sans équation d'énergie

❑ Ecoulement monophasique ou diphasique

$$\text{Div}(\vec{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \nabla \vec{u} = -\nabla P^* + \text{Div}(\nu \nabla \vec{u})$$

$$P^* = \frac{P}{\rho} + gz$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \nabla T = \text{Div}(\alpha \nabla T)$$

**Problème de
thermohydraulique
monophasique pour un
écoulement
incompressible laminaire**

MODÈLE QUASI-COMPRESSIBLE

- Prise en compte des variations spatiales et temporelles de densités dues à de fortes variations de température:

$$\text{Gaz parfait: } \rho(\vec{x}, t) = \frac{P_0(t)}{RT(\vec{x}, t)}$$

- Filtrage des ondes acoustiques pour éviter petits pas de temps:

$P(x, t) = P_1(\mathbf{x}, t) + P_0(t)$ avec P_1 la pression hydrodynamique
et P_0 la pression thermodynamique

Domaine de validité:

$$P_1 \approx M^2 P_0 \text{ et } M = \text{Mach} \ll 1$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \text{div}(\rho u u_i) - \sum_{j=1}^N \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial P_1}{\partial x_i} = -\rho g_i$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} - \sum_{j=1}^N \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = Q + \frac{dP_0}{dt} \quad P_0 = \rho RT$$

Problème de thermohydraulique monophasique pour un écoulement quasi-compressible laminaire

- **Description locale (Mécanique des fluides continus)**

- Navier-Stokes equations :

$$\frac{\partial \rho_k \mathbf{u}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k) = -\nabla p_k + \rho_k \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_k \quad \text{with } \boldsymbol{\tau}_k \hat{=} \mu_k (\nabla \mathbf{u}_k + \nabla^T \mathbf{u}_k)$$

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

- Conditions de saut à l'interface:

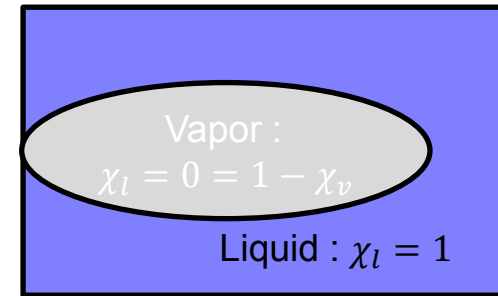
- Continuité de la vitesse : $u_1^n = u_2^n$ and $u_1^t = u_2^t$
- Conditions d'équilibre des efforts à l'interface : $\sum_k (p_k \mathbf{n}_k - \boldsymbol{\tau}_k \cdot \mathbf{n}_k) = -\sigma \kappa \mathbf{n}$

- **Extension au domaine complet**

- Fonction indicatrice de phase χ_k : 1 pour la phase k, 0 sinon.

$$\frac{\partial \chi_k \rho_k \mathbf{u}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\chi_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k)$$

$$= -\nabla (\chi_k p_k) + \chi_k \rho_k \mathbf{g} + \nabla \cdot [\chi_k \mu_k (\nabla \mathbf{u}_k + \nabla^T \mathbf{u}_k)] - (p_k \mathbf{n}_k - \boldsymbol{\tau}_k \cdot \mathbf{n}_k) \cdot \nabla \chi_k$$



- **Formulation mono-fluide**

- Définition des champs mono-fluides : $\phi \hat{=} \sum_k \chi_k \phi_k$

- En sommant et en utilisant les conditions de saut :

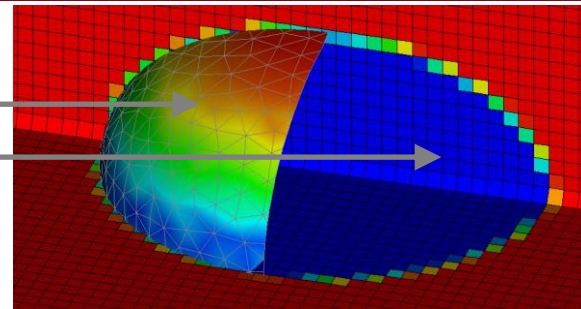
$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u})] + \sigma \kappa \mathbf{n} \delta^i$$

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

- La fonction indicatrice de phase χ_k est advectée par le champ de vitesse local (algorithme VOF/FT)

■ Méthode Front-Tracking/VOF implémentée dans TrioCFD :

- Taux de changement de phase et courbure sur le maillage lagrangien;
- Propriétés physiques, vitesse, pression et température sur le maillage eulérien.



1. Transport de l'interface : $\frac{\partial \chi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \chi = 0$

2. Masse : $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

3. QDM : $\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla P^* + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + S^i$

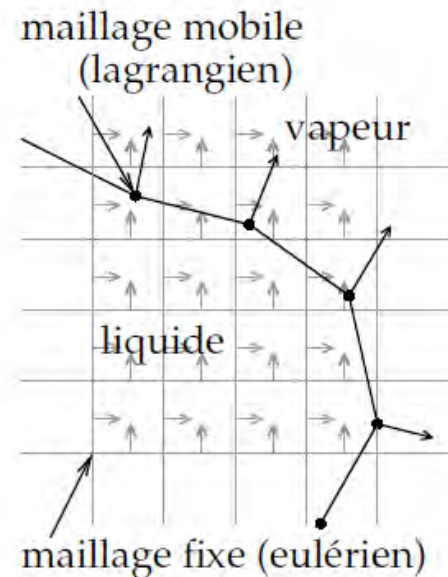
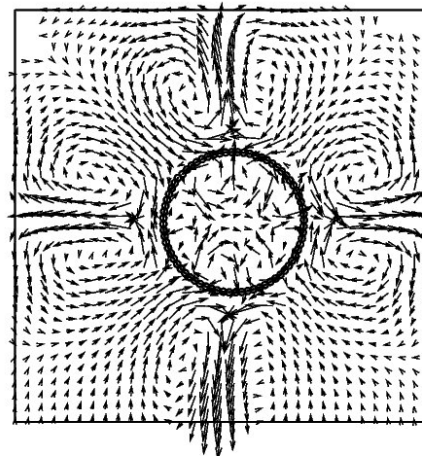
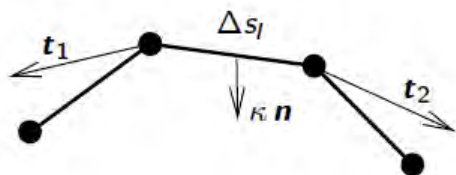
avec $P^* = P - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ et $S^i = (\Delta \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} + \sigma \kappa + \phi^r) \nabla \chi$

où ϕ^r est une force artificielle pour éviter les collisions.

■ Termes sources à l'interface :

- La méthode CSF (Continuous Surface Force) n'a pas été introduite à cause des courants parasites;

$$\delta \mathbf{F}_\sigma = \sigma (\mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1)$$

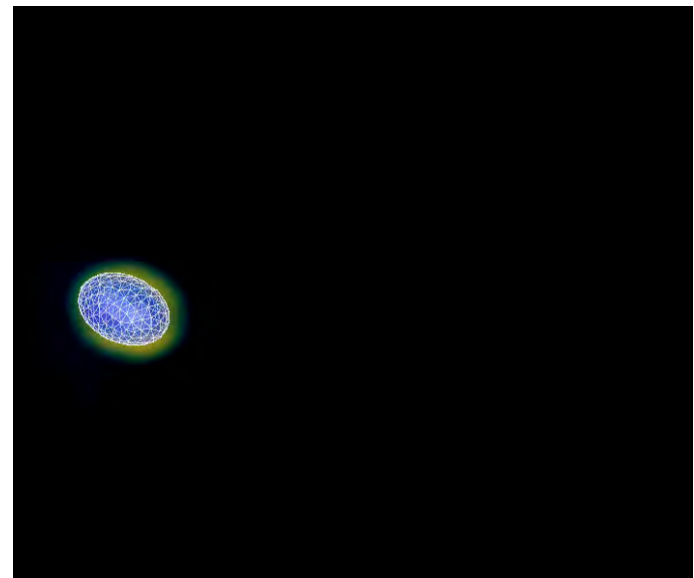


- Concession : La discrétisation de la tension de surface n'est plus conservative (l'erreur reste relativement petite).

□ Corps mobiles

Le modèle de “Front Tracking” peut être dégénéré pour utiliser la méthode IBM (Immersed Boundary Method) qui utilise des Immersed Boundary Condition, c'est à dire mettre des frontières solides (immobiles ou en déplacement) à l'intérieur du domaine fluide et modéliser les conditions limites sur ces frontières solides avec des termes sources dans l'équation de quantité de mouvement du fluide.

Example of a flow around a rotating body defined by an IBC

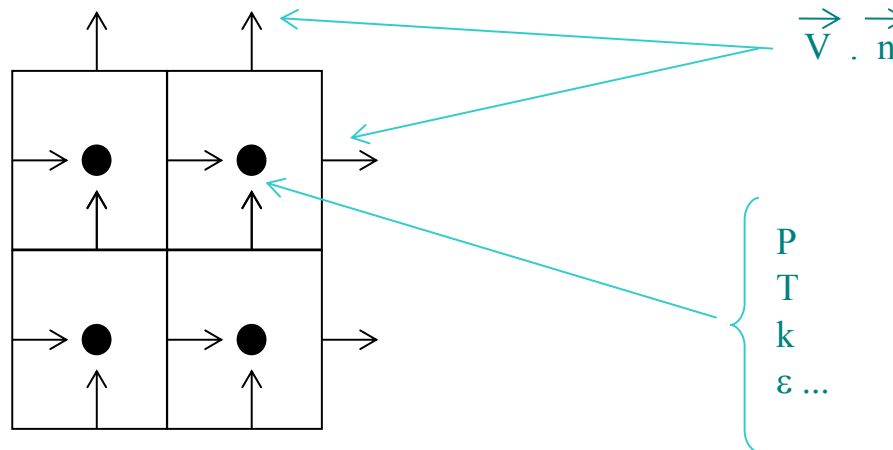


- Modélisations RANS et LES de la turbulence
- Lois de paroi
- Couplage solide thermique
- Rayonnement en milieu transparent ou semi transparent
- Combustion homogène et hétérogène
- Conduction
- Transport de scalaires passifs

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{u} \nabla C_i = Div (D_i \nabla C_i)$$

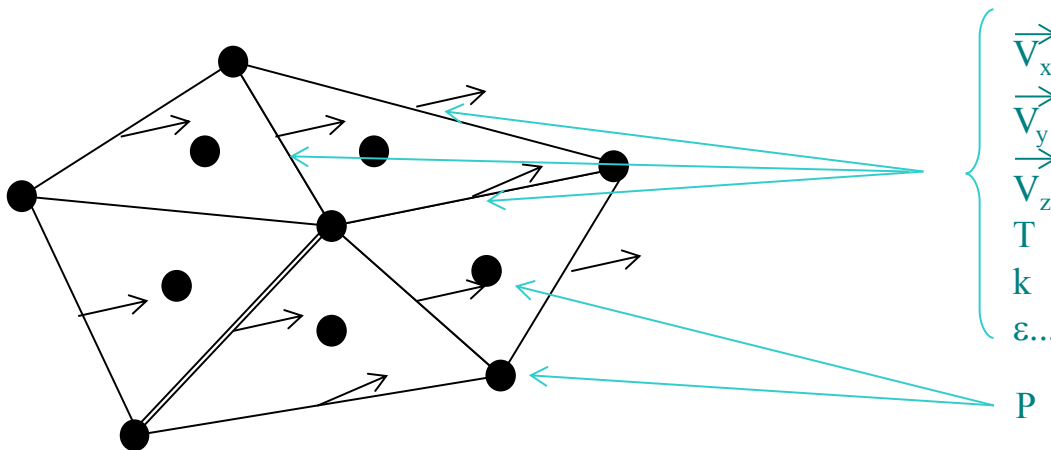
- Milieux poreux (approche moyennée)

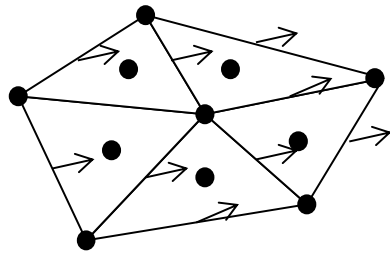
- Calculs 2D: coordonnées cartésiennes ou cylindriques
- Calculs 3D: coordonnées cartésiennes ou polaires
- Schéma de type **Volume Différences Finies** (VDF)
- Schéma **décalé en espace**: vitesses normales aux faces et pression au centre des éléments
- Inconnues scalaires au centre des éléments



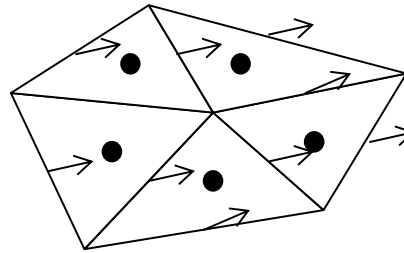
- Une méthode numérique originale, qui a fait l'objet de 3 thèses
- Propriétés de stabilité

- Méthode **Volumes Éléments Finis (VEF)**
- Maillages de triangles (2D) ou de tétraèdres (3D)
- Champ de vitesse centrées sur les faces (P1NC)
- Autres variables (sauf pression) centrées sur les faces
- Différentes approches pour la pression: P0, (P0+P1), (P0+P1+Pa) en 3D
(voir transparent suivant)

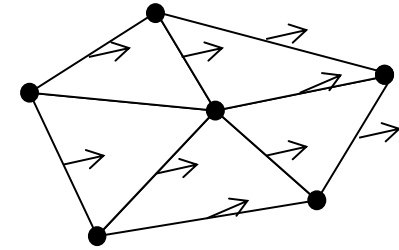




P0+P1

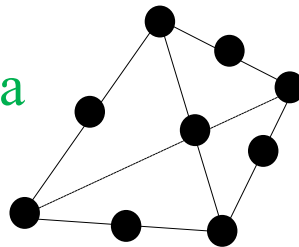


P0



P1

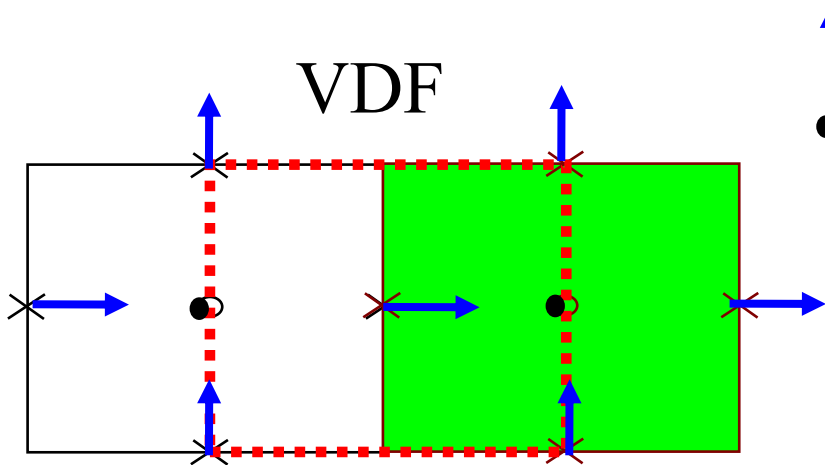
Plus en 3D: **P0+P1+Pa**



11 ddl en pression par tetra:

- 1 au centre (P0)
- 4 aux sommets (P1)
- 6 aux arêtes (Pa)

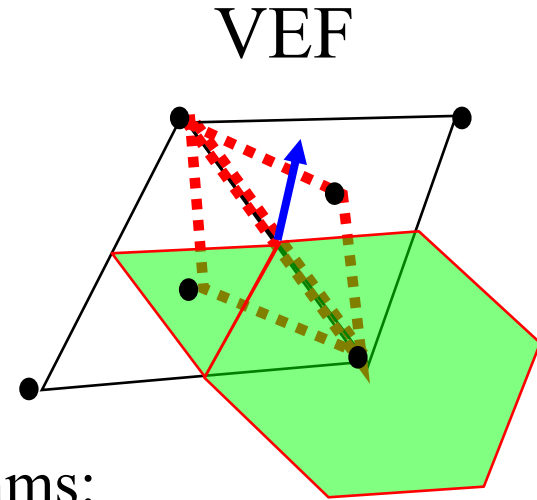
➔ **Adapté aux termes sources violents et cas de faibles vitesses d'écoulement pour lesquels le gradient de pression P0+P1 a du mal à compenser le terme source**



↑ Velocity
● Pressure



Algorithms:

- Iterators to loop on elements or faces
- Evaluators to calculate fluxes on faces or facets

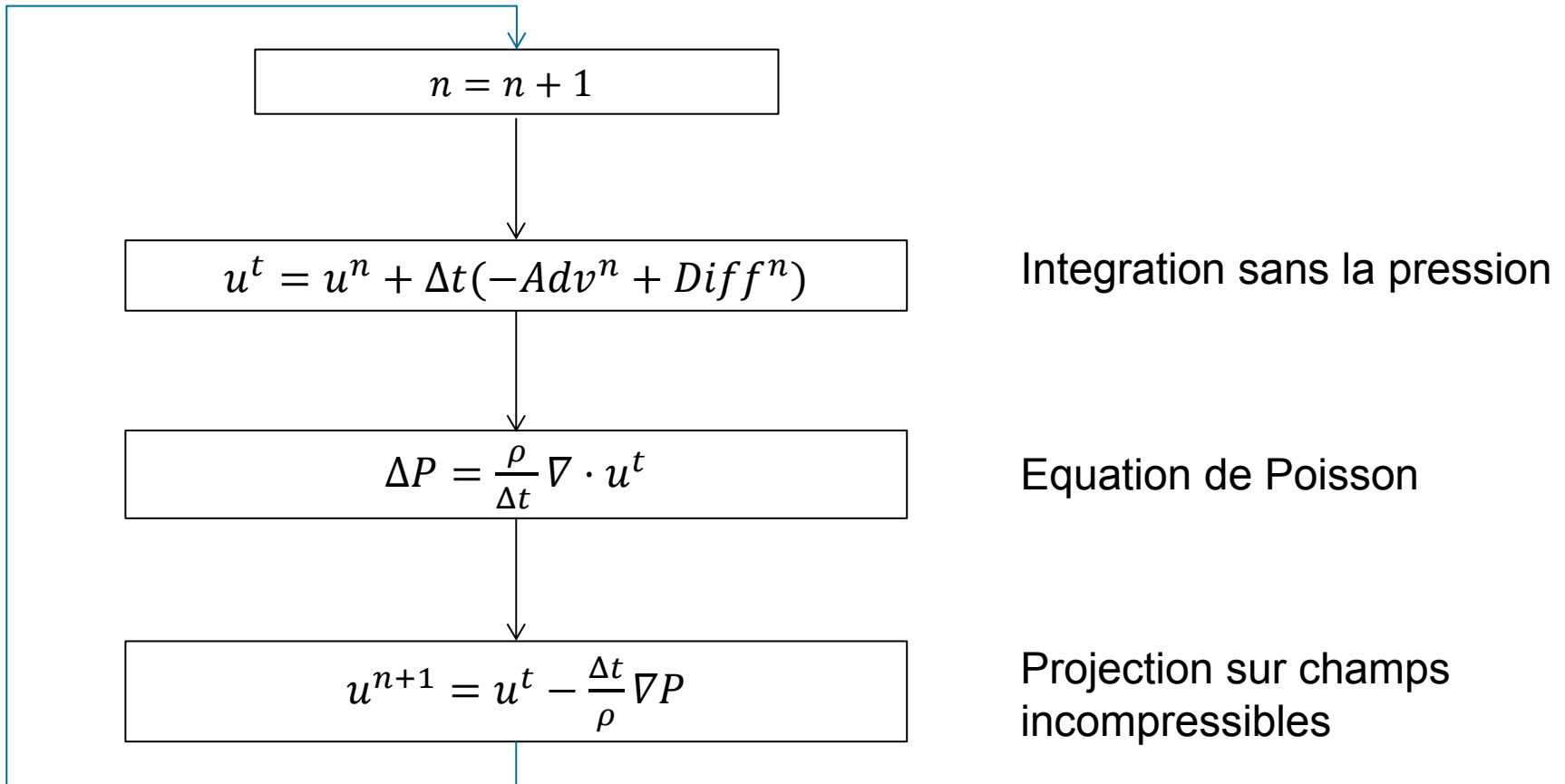


Algorithms:

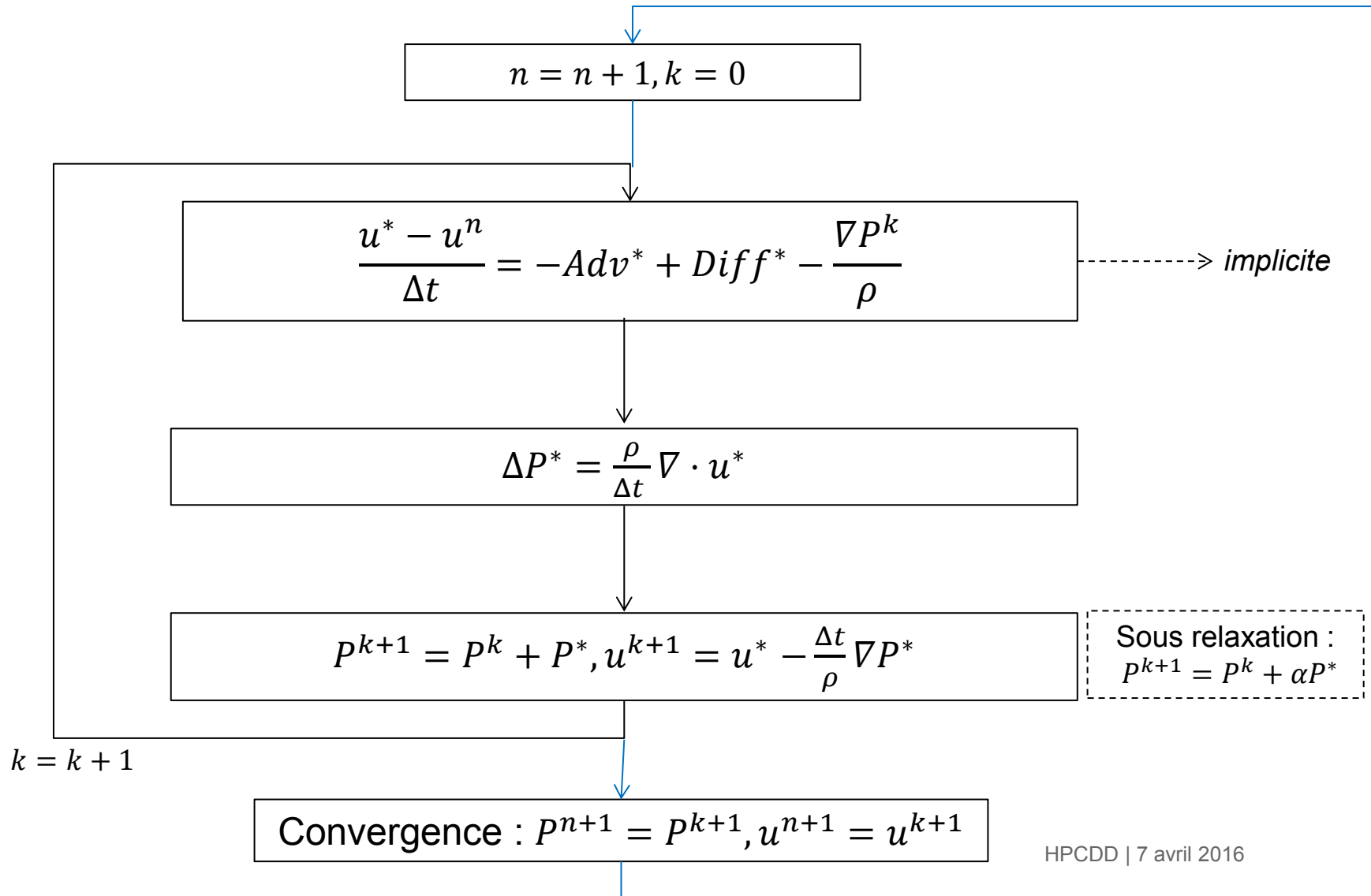
- Repeated loops on elements, faces or facets to calculate fluxes on the control volumes for each scheme

 Momentum control volume
 Mass control volume

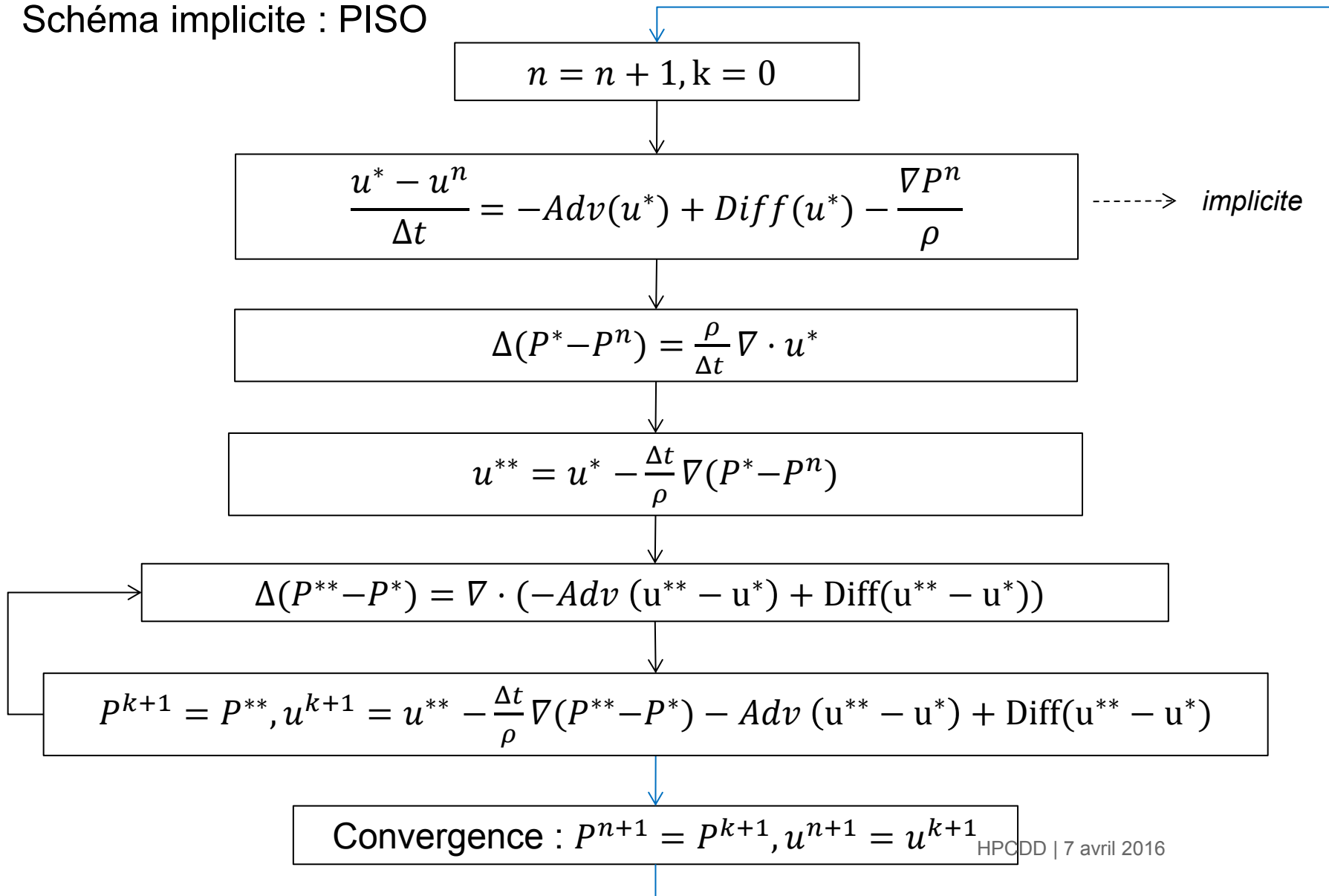
❑ Schéma explicite : méthode de projection



□ Schéma semi-implicite : SIMPLE



❑ Schéma implicite : PISO



➤ Domain partitioning tools:

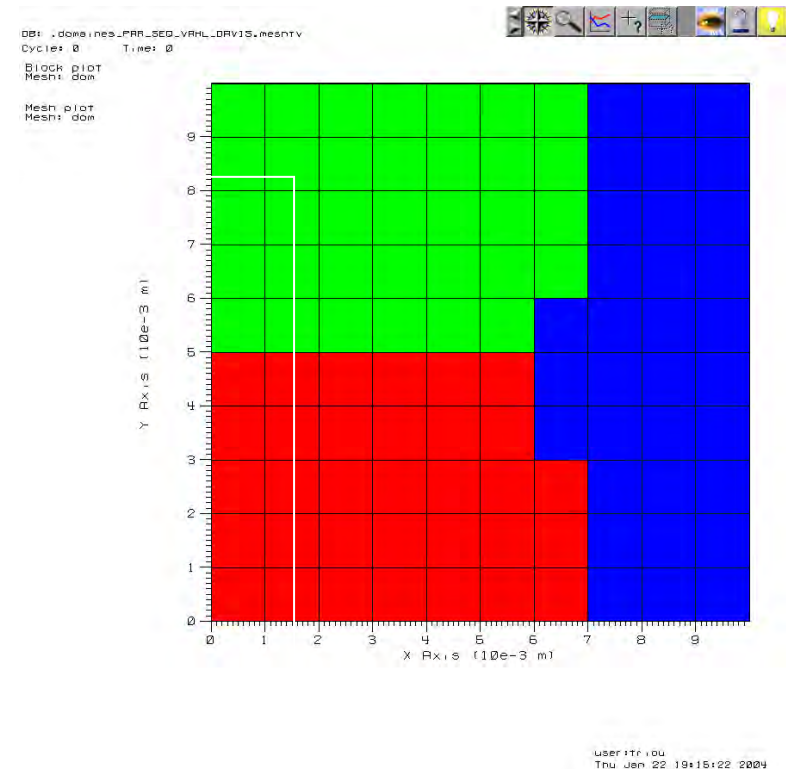
- Metis
- Tranche “band partitioning”

➤ Performances are partition dependent:

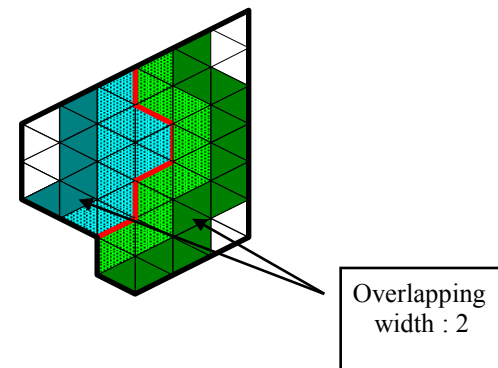
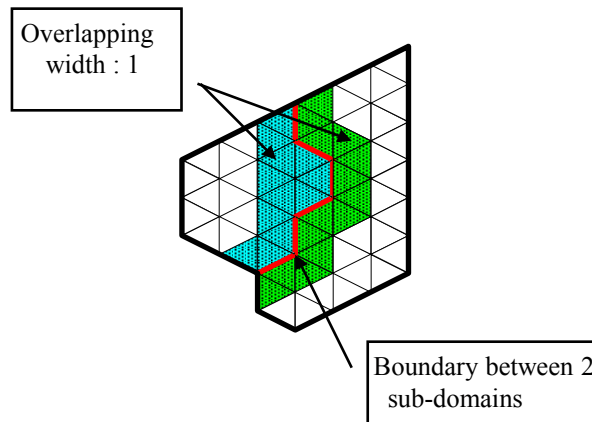
- Same number of cells by sub-domain
- To minimize the joints length (boundaries between sub-domains)

➤ Some rules of thumb for performance:

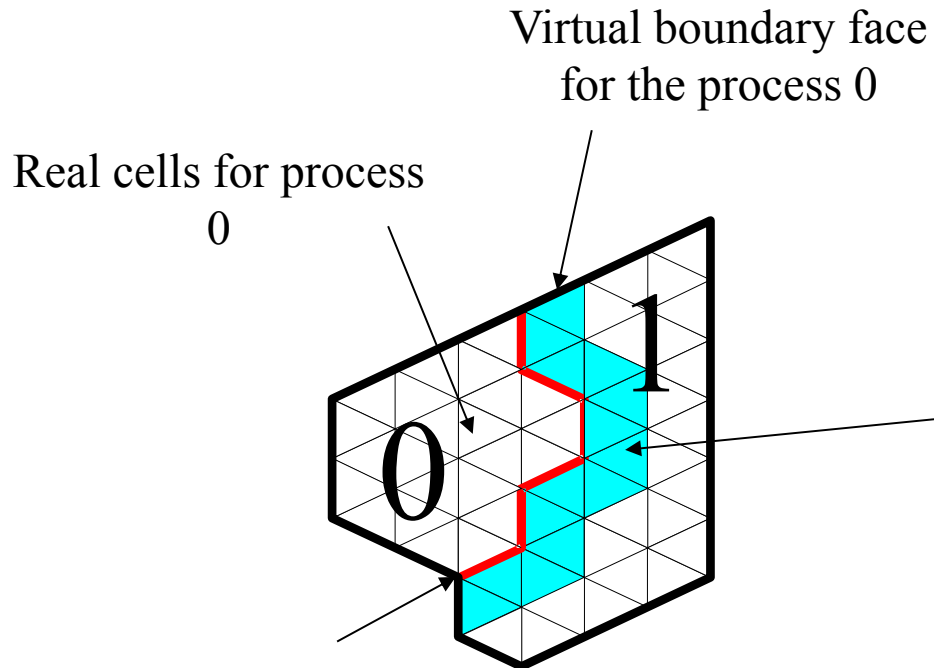
- If possible, use 20000-30000 cells per MPI process
- Look at cluster specificities:
- Look at cluster specificities:
 - L2 size cache
 - Latency network
 - ...



- Definition of overlapping width value
 - Number of vertexes or elements on the remote sub-domain known by the local sub-domain
 - Specified by the users during partitioning task
 - This value depends on the space scheme orders:
 - 1 if 1-2nd order
 - 2 if 3-4th order
 - In practice, use 2 except if you use only upwind schemes



➤ Virtual values



Virtual items in blue (faces, cells, vertexes) constitute the « virtual space » of the process 0.

For the process 1, the same items are real and constitute the « remote space » of process 0.

Joint with common faces and common vertexes for the processes 0 et 1. These common items are real items for the 2 processes.

- Number of **real** items:
 - Zone_VF::nb_faces()
 - Domaine::nb_som()
 - Zone::nb_elem()
- Number of real+**virtual** items:
 - Zone_VF::nb_faces_tot()
 - Domaine::nb_som_tot()
 - Zone::nb_elem_tot()

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

Example of distributed array with additional data structure (**MD_Vector** in Trio_U)

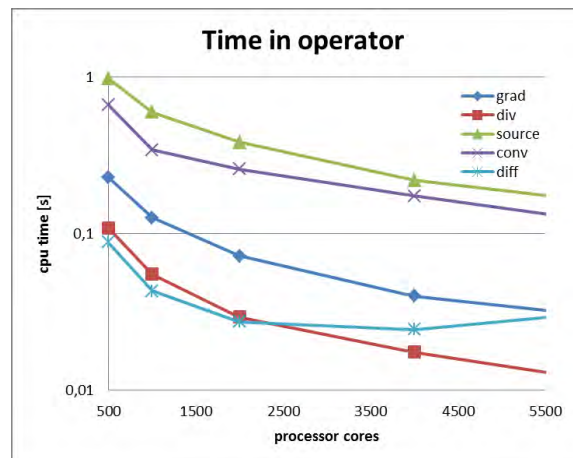
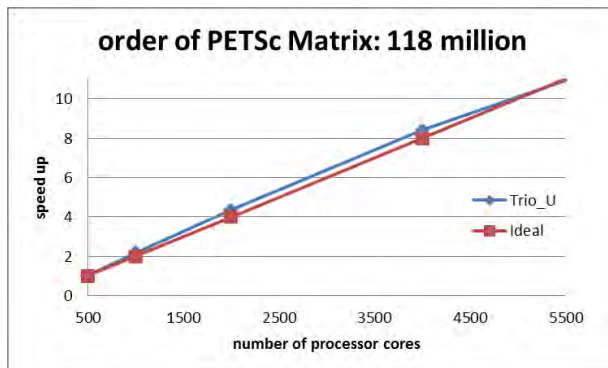
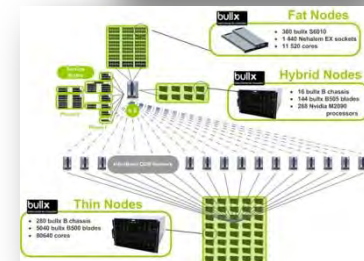
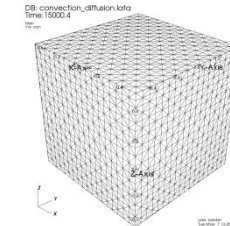
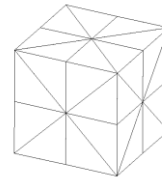
How to find the source(s) of parallelism differences in TrioCFD ?

- Use the Debug keyword by inserting in the sequential and parallel data files after the Discretize keyword:
 - Debug problem_name seq faces 1.e-6 0 # In the sequential datafile
 - Debug problem_name seq faces 1.e-6 1 # In the parallel datafile

- Run the sequential then the parallel calculation. The Debug keyword will compare arrays each time this line is found in the code :
 - Debug::verifier(« I am checking array », array);
 - Look at the log files to detect when the parallel difference appears.

- ❑ Pour les simulations cibles → plusieurs millions d'inconnues → HPC indispensable.
- ❑ La résolution numérique de la CFD est basé sur la méthode de projection de la pression → entre 60% et 80% du temps CPU passé dans le solveur linéaire
- ❑ Analyse de la scalabilité forte sur des benchmarks à 100M de mailles.

Processor cores	Iterations to convergence	CPU time in s	tetras/core
500	5733	181,4	213260
1000	5735	82,9	100663
2000	6019	43,6	50331
4000	5877	22,1	25165
6000	6018	16,2	16777
8000	6042	13,2	12583
10000	5979	11,9	10066



```

# Hydraulique 2D laminar flow with Quick scheme #
dimension 2

Pb_hydraulique pb
Domaine dom

# BEGIN MESH #
Read_file Obstacle.geo ;
# END MESH #

# BEGIN PARTITION
Partition dom
{
    Partitionneur tranche { tranches 2 1 }
    Larg_joint 2
    Nom_Zones DOM
}
Fin
END PARTITION #

# BEGIN SCATTER
Scatter DOM.Zones dom
END SCATTER #

# A discretization is selected #
VDF ma_discretisation

Schema_Euler_explicite mon_schema
Read mon_schema
{
    tinit 0
    tmax 5.0
    nb_pas_dt_max 1000
    dt_min 5.e-3 # Trio_U stops if dt_stab<dt_min #
    dt_max 5.e-3
    dt_impr 5.e-3
    dt_sauv 1.
    facsec 0.5
    seuil_statio 1.e-8
}
# Calculation timestep dt=min(dt_stab,dt_max)*facsec #
# dt_stab=1/(1/dt(convection)+1/dt(diffusion)) #
# 1D : dt(convection)=dx/max(U) dt(diffusion)=dx^2/(2D) #

```

```

# A media is defined #
Fluide_Incompressible milieu
Read milieu
{
    mu Champ_Uniforme 1 3.7e-05 # Dynamic viscosity #
    rho Champ_Uniforme 1 2 # Volumic mass #
}
# Create links between objects #
Associate pb dom
Associate pb mon_schema
Associate pb milieu
Discretize pb ma_discretisation
Read pb
{
    Navier_Stokes_standard
    {
        convection { quick }
        diffusion {} # By default, 2nd order scheme #
        conditions_initiales { vitesse Champ_Uniforme 2 0. 0. }
        boundary_conditions {
            Square paroi_fixe # Wall U= 0 #
            Upper symetrie
            Lower symetrie
            # Neumann boundary condition P=0 #
            Outlet frontiere_ouverte_pression_imposee
                Champ_front_Uniforme 1 0.
            # Dirichlet boundary condition U=(1,0) #
            Inlet frontiere_ouverte_vitesse_imposee
                Champ_front_Uniforme 2 1. 0.
        }
        solveur_pression GCP {
            # Parameter of SSOR #
            precond ssor { omega 1.5 }
            # Convergence threshold which impacts flow mass rate #
            # Warning: not a dimensionless number so the flow mass #
            # rate should be checked during the first time-steps #
            seuil 1.0e-06
            impr # Print the residual error ||Ax-B|| #
        }
    }
}

```

Schema_Euler_explicite sch

Lire sch

```
{
  tinit 0.
  tmax 10000.
  dt_min 1.e-6
  dt_max 100.
  dt_impr 1.e0
  seuil_statio 1.e-10
}
```

Navier_Stokes_Turbulent

```
{
  solveur_pression Cholesky { }
  convection { amont }
  diffusion { implicite }
  Sources { Canal_perio { bord Entree } }
  conditions_initiales
    { vitesse Champ_Uniforme 2 0.05 0. }
  conditions_limites
    { WALL paroi_fixe
      Entree periodique
    }
  modele_turbulence K_Epsilon
  { .....
}
```

$$\Delta P = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot u^t$$

$$u^t = u^n + \Delta t(-A^n + D^n)$$

1. Le logiciel TrioCFD
2. Quelques Applications
3. Conclusion et perspectives

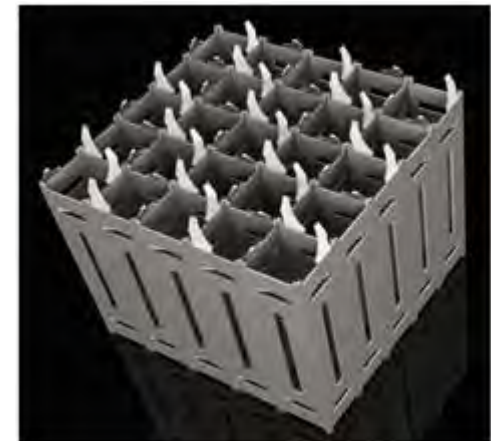
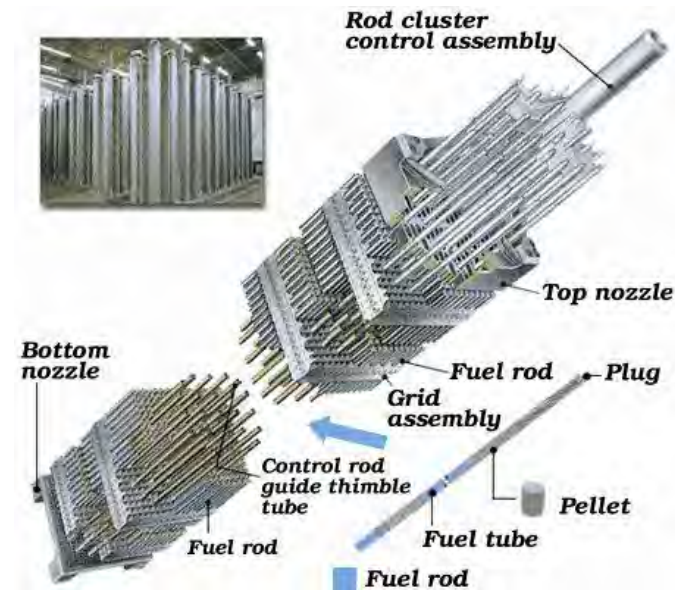
- Mixing grids are designed by nuclear power plant vendors to create a specific coolant mixing behavior in the fuel assembly.
- The mixing grid acts as momentum source which increases the turbulence level and guides the transvers flow pattern as a function of the specific vane design.

Case studies

- Flow in fuel assemblies of PWRs with mixing grids (AGATE experiment)
- Estimation of pressure and viscous forces onto two PWR mixing grids

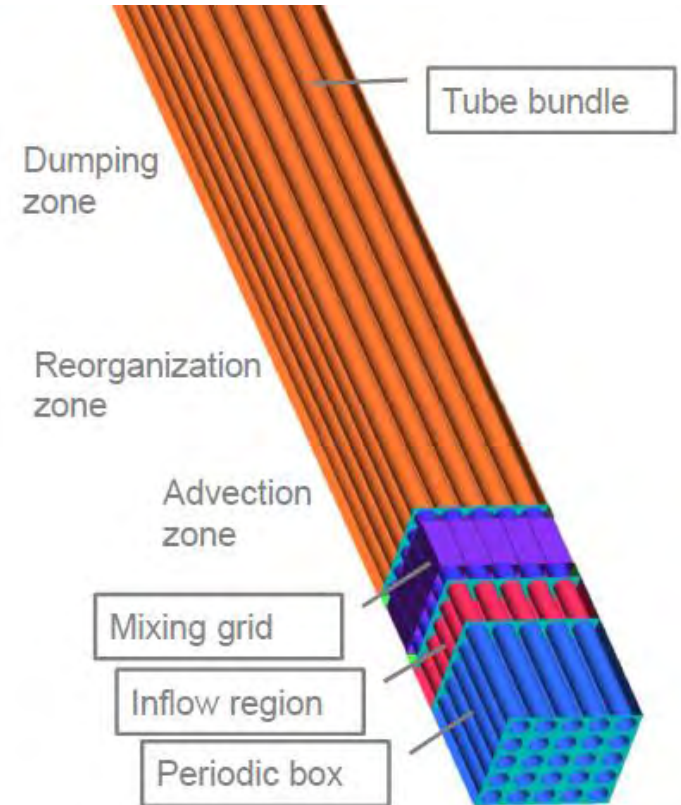
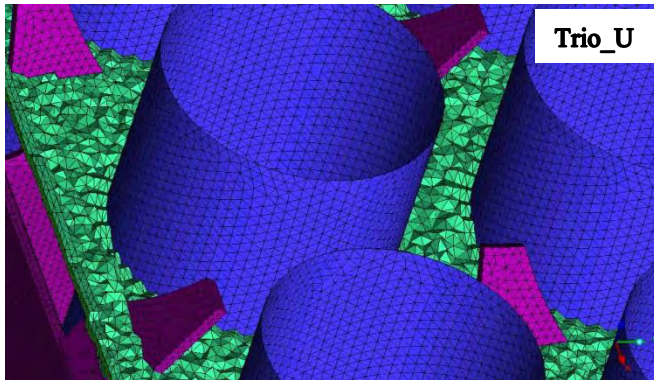
Modeling approach

- Non-isotropic high turbulent flow behavior → LES
- Very large CFD simulations → HPC compulsory
- Use of 3D CFD parallel TrioCFD code

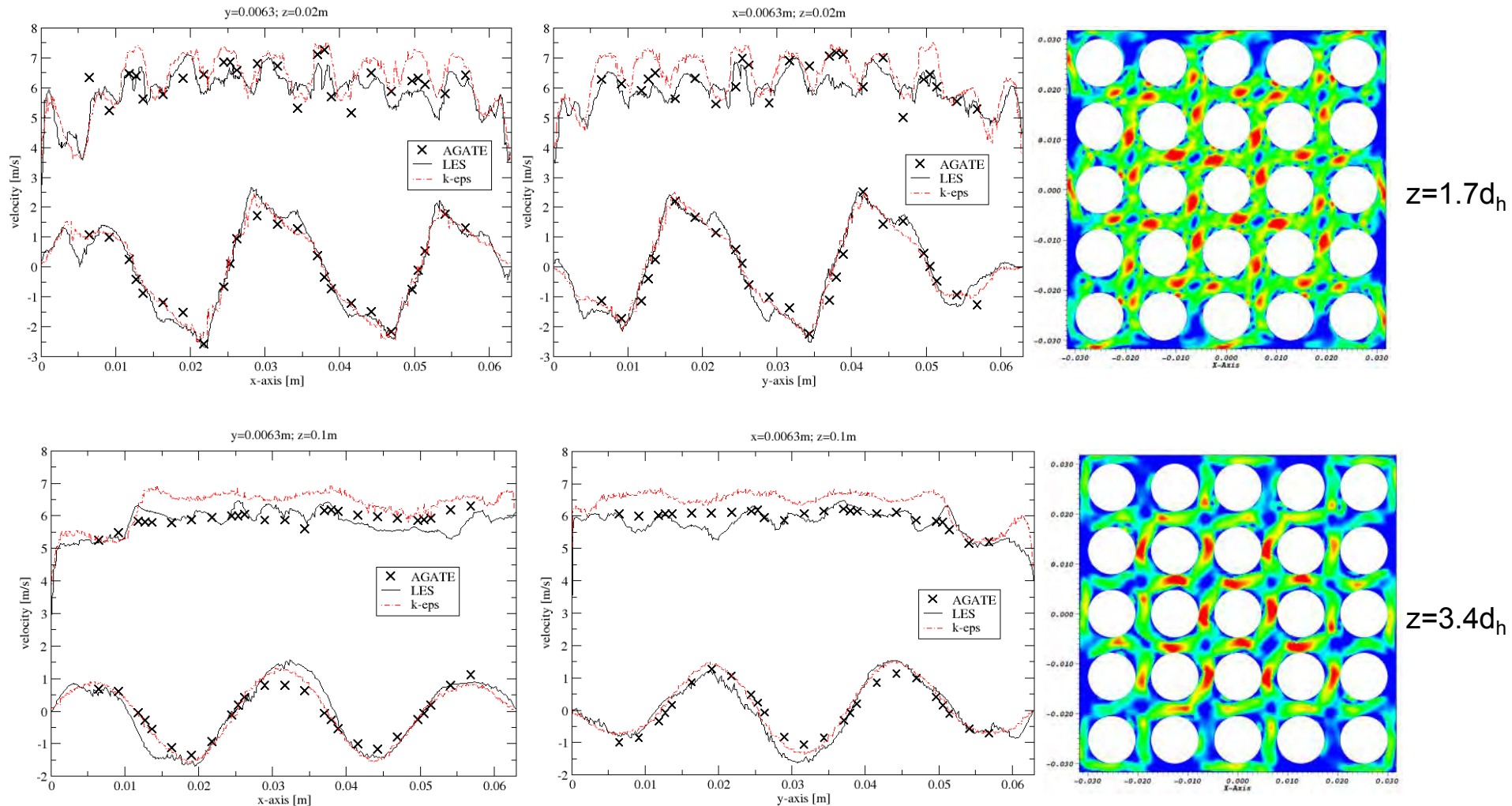


CAD model and meshing

- CAD modeling with SALOME
- Full tetra mesh generation of the mixing grid with ICEM
- Two prismatic layers near walls (cut into tetra)
- 300 million velocity calculation points
- 20 days of CPU on 4600 cores of CURIE

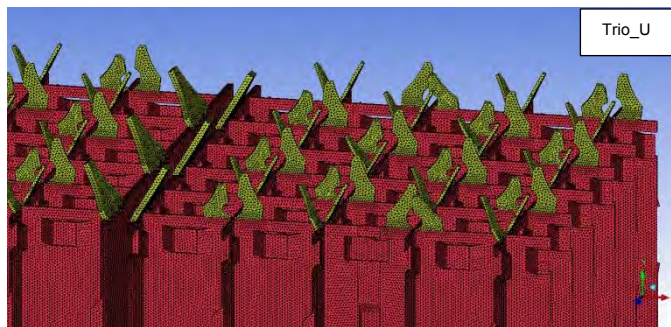
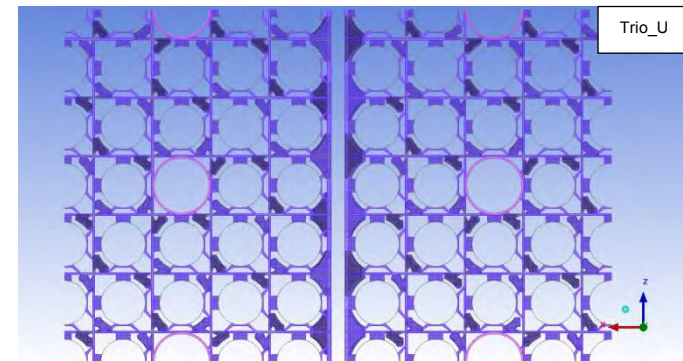
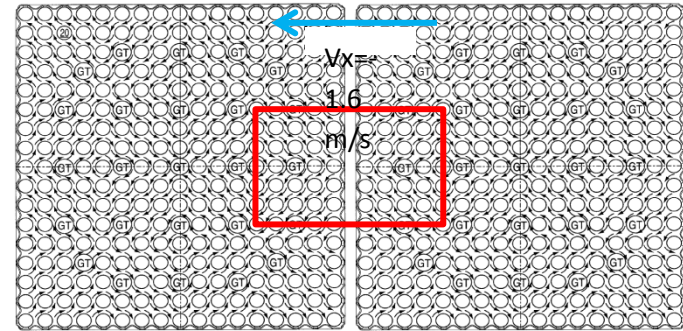


Results: K-eps vs LES

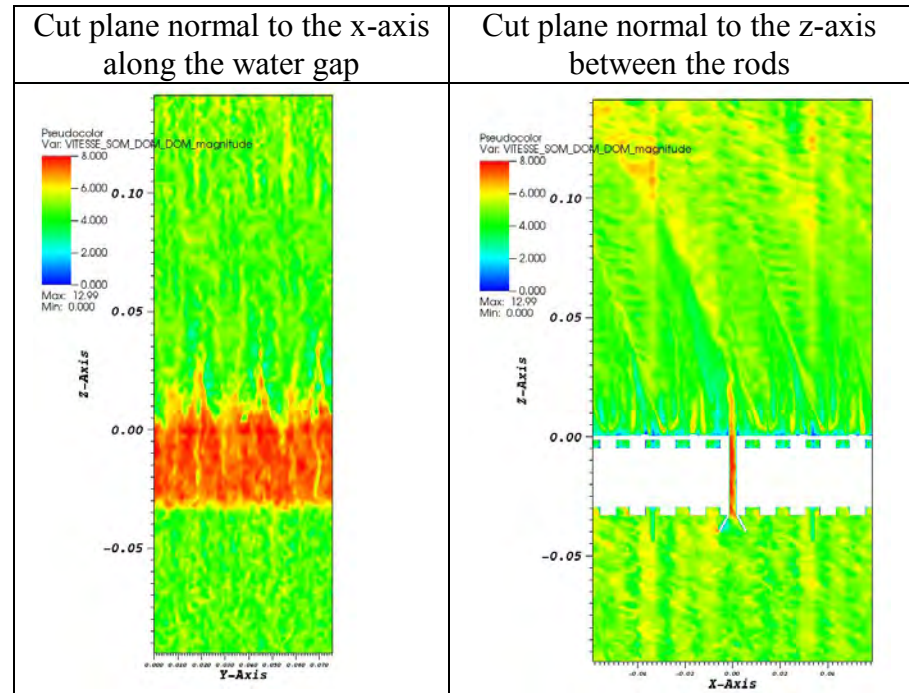


TWO MIXING GRIDS CALCULATION (2014 CALCULATION)

- **Calculation setup**
- Determine pressure and viscous forces onto two PWR mixing grids in case of transverse flows.
- Similar approaches as for the AGATE study have been used to model and mesh the geometry
- More than 1 billion of velocity control volume (550M of tetra):
 - 400 M VCV for recirculation box
 - 700 M for the computational domain
- 10K cores on the CURIE machine



- **First results**
- Final results are being analyzed
- The calculation was running for 20 days on 10,000 CPU cores up to reach convergence of the mean values
- Total calculation cost: >6M hours
 - Study setup
 - Calculation itself onto 10k cores
 - Post processing

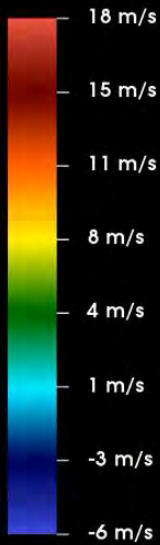


Norm of the instantaneous velocity in two cut planes

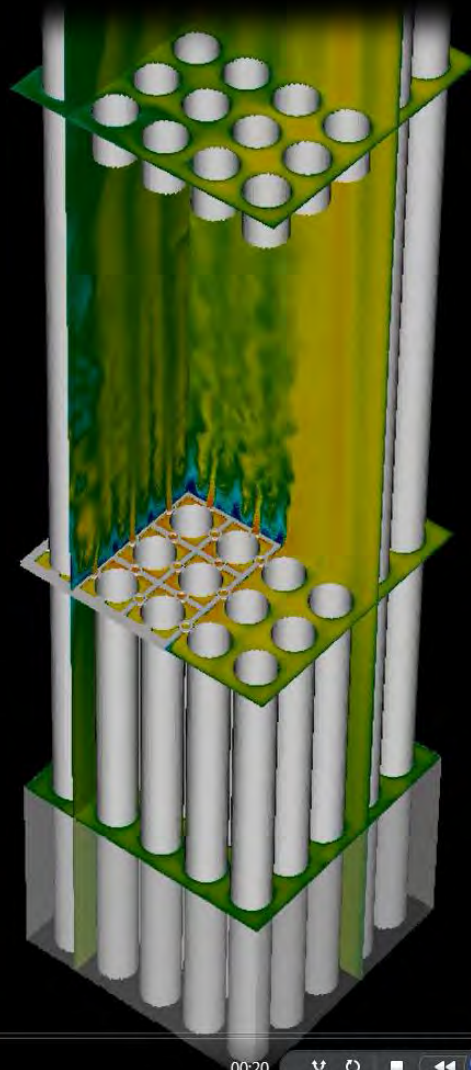
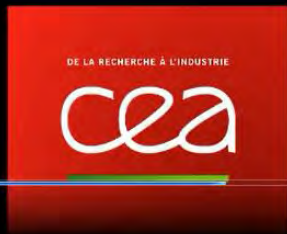
TWO MIXING GRIDS CALCULATION (2014 CALCULATION)

Film_100fps

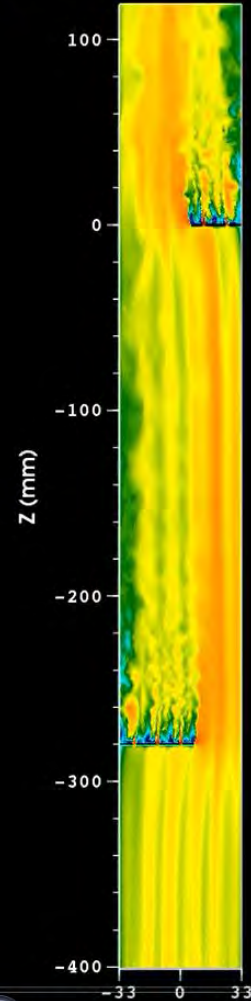
Vitesse axiale (Z)



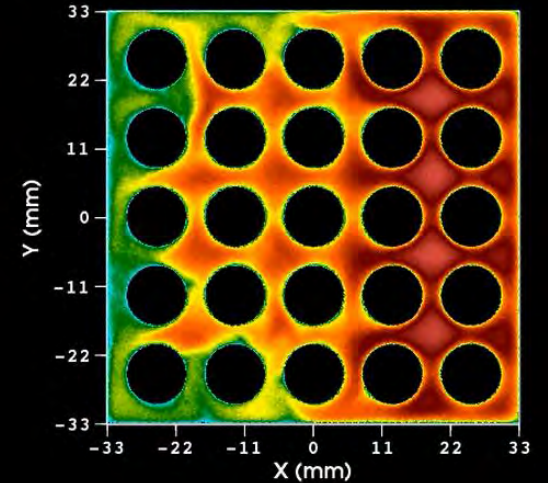
Temps = 0.2000 s



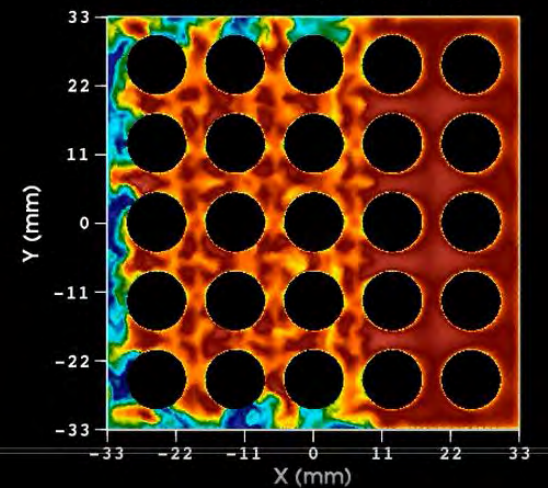
Plan vertical (Y = 6.3 mm)



Plan horizontal (Z = -140 mm)



Plan horizontal (Z = -260 mm)



00:20





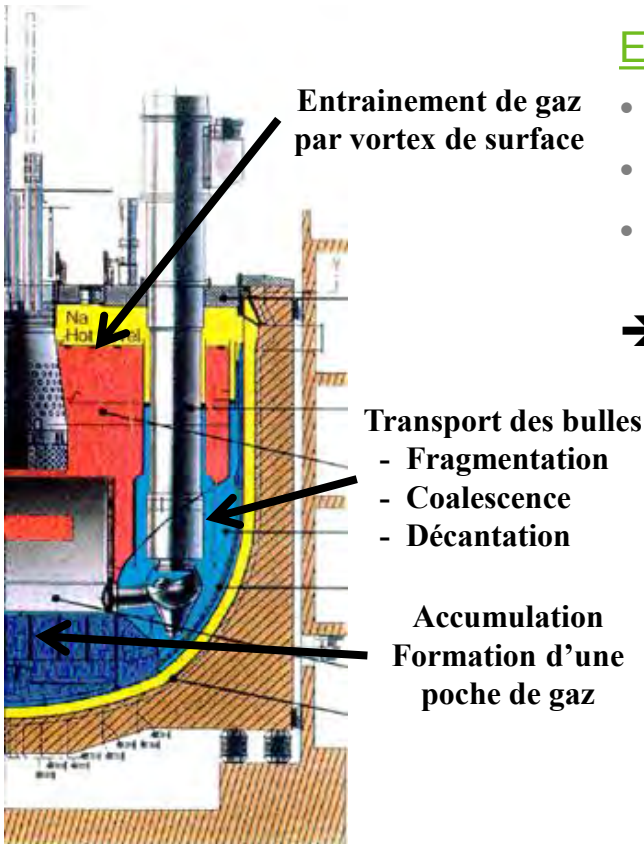
- Recherche de compacité, puissance augmentée
- Agitation plus importante de la surface libre du Collecteur Chaud
- Risque accru d'aspiration du gaz de ciel de pile par formation de vortex de surface, puis passage d'une poche de gaz dans le cœur

Effets du passage de gaz dans le cœur des RNR-Na

- Augmentation de la réactivité et excursion de puissance
- Mauvaise évacuation de la chaleur des aiguilles combustible
- Disfonctionnement de certains composants ou capteurs

➔ Problème majeur de sûreté à écarter dès la conception !

- Réalisation de maquettes expérimentales de collecteurs chauds : problème d'échelle et de similitude (eau ≠ sodium)
- Recours à la simulation numérique pour choisir entre plusieurs design de collecteurs chauds (quelques dizaines de m) : problème de la taille des bulles (quelques mm)



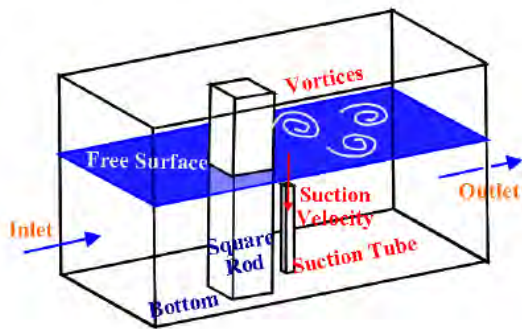
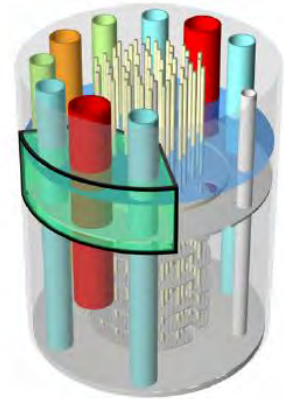
QUELLE DÉMARCHÉ POUR LA CFD ?

Approche réaliste : Utilisation d'une simulation numérique fine du collecteur chaud pour renseigner des modèles analytiques corrélant le phénomène d'entraînement de gaz aux grandeurs locales de l'écoulement

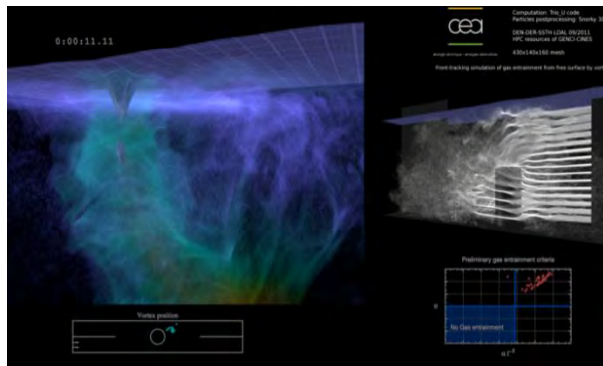
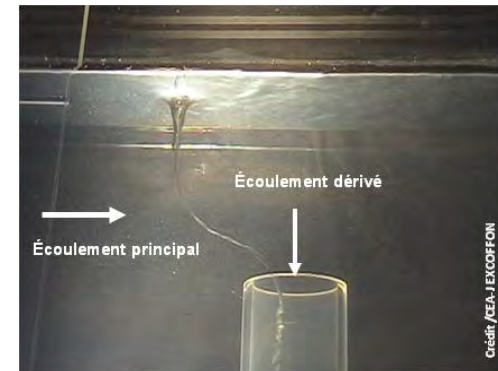
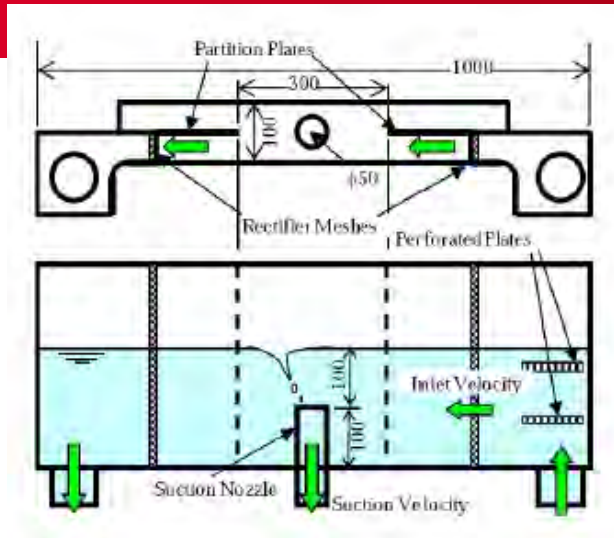
Cette démarche nécessite de **développer et valider**...

- Le code **TrioCFD** : simulations numériques 3D, turbulentes, instationnaires (du type LES) et diphasiques (avec suivi d'interface de type Front-Tracking) à l'échelle du collecteur chaud
- Un **modèle analytique** : prédire localement le risque d'entraînement de gaz à partir des grandeurs locales de l'écoulement : vorticité, gradient de vitesse verticale, invariant du tenseur des gradients de vitesse,...

Trio_U ↗



... en s'appuyant sur des **maquettes analytiques** permettant de simuler la formation de vortex instationnaires (GERATO de JAEA et BANGA du CEA) afin d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu



Nombre de mailles : 10 millions

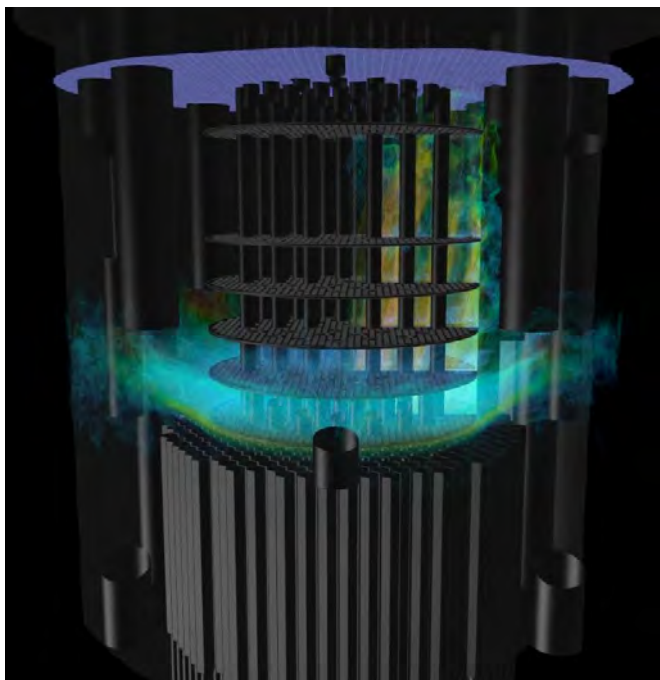
Tailles des mailles : 1 mm

Temps CPU : 2 semaines sur 512 proc. pour 1 min. de temps physique

La **maquette analytique GERATO** (JAEA) :

- ✓ A montré que TrioCFD permettait de reproduire un écoulement à surface libre avec formation d'un vortex instationnaire
- ✓ A permis de tester la validité des critères d'entraînement de gaz proposés par JAEA et issus de l'étude de modèles analytiques de vortex stables (tourbillon de Burger)

SIMULATION « FINE » DU COLLECTEUR CHAUD



Nombre de mailles : 18 millions

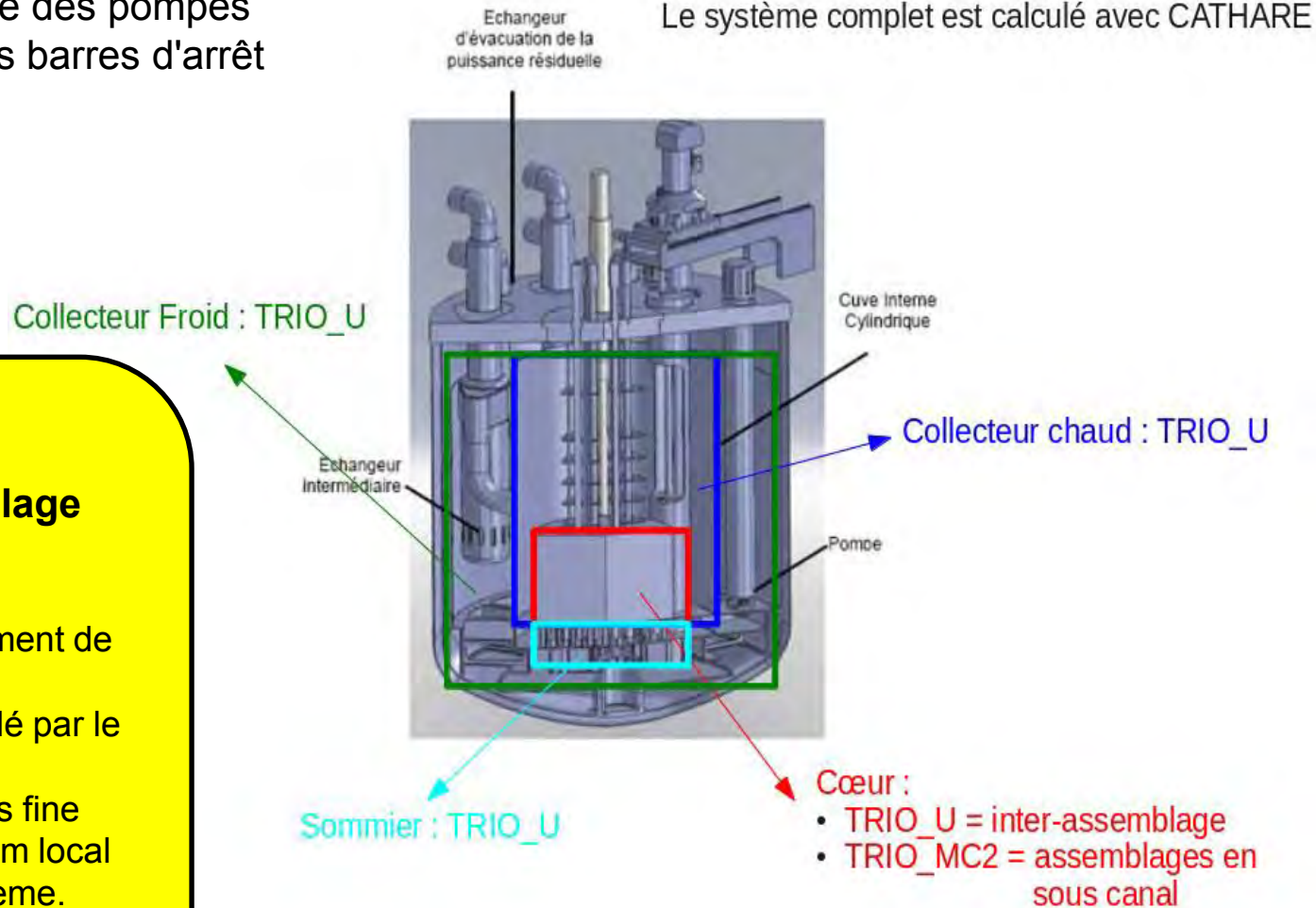
Tailles des mailles : 3,5 cm

Temps CPU : 1 semaine sur 512 proc. pour 50 s de temps physique

Transitoire étudié: perte des pompes primaires avec chute des barres d'arrêt d'urgence.

Mise en œuvre d'une méthodologie de couplage multi-échelle

- Couplage par recouvrement de domaine.
- Réacteur complet calculé par le code système
- Les codes à échelle plus fine agissent comme un zoom local qui corrige le code système.
- Echange des données entre les codes à chaque pas de temps.



R. Bavière, N. Tauveron, F. Perdu, E. Garré, System-CFD coupled simulation of the Phénix Reactor Natural Circulation Test, *The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-15)*, Pisa, Italie, (2013).

PROCÉDÉ DE VITRIFICATION EN CREUSET FROID

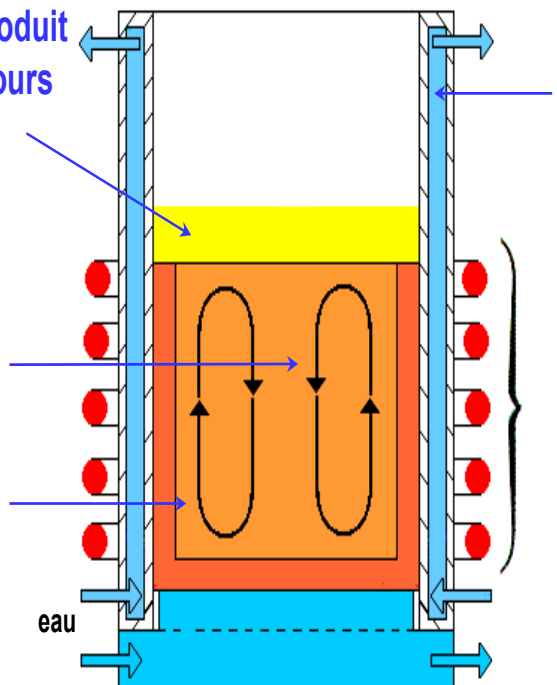
Ces études s'inscrivent dans le cadre de l'optimisation du processus de vitrification des déchets radioactifs, sur la base d'un nouveau procédé : le **creuset froid**

couche de produit de base en cours de fusion

verre fondu

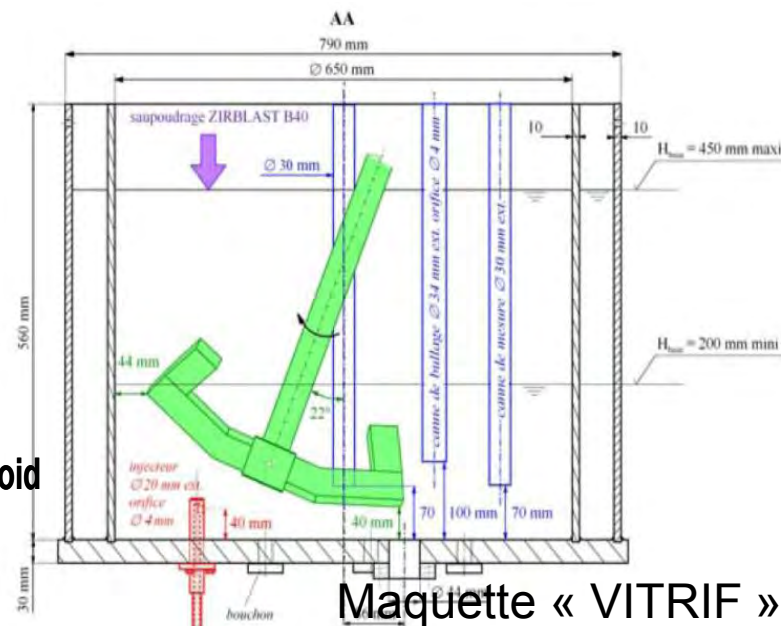
verre figé : autocreuset

eau

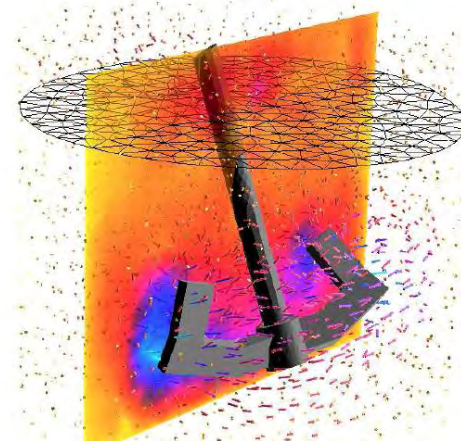


creuset froid

inducteur



Maquette « VITRIF »

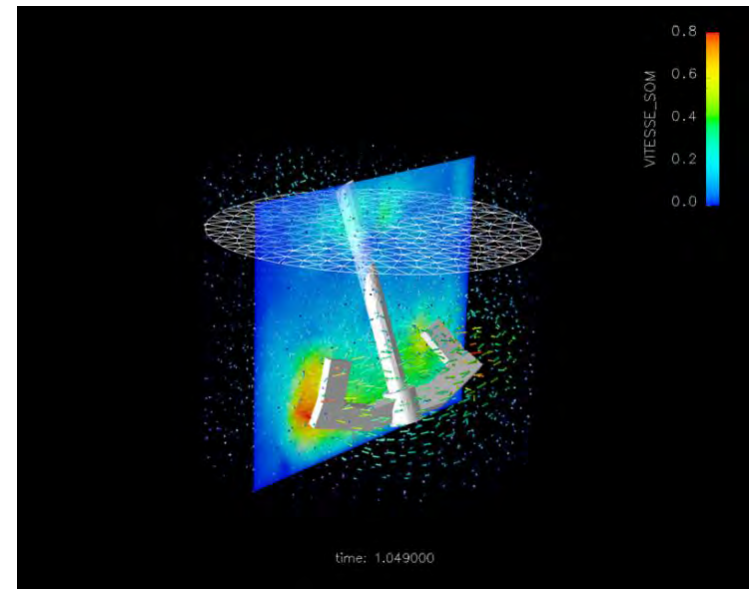
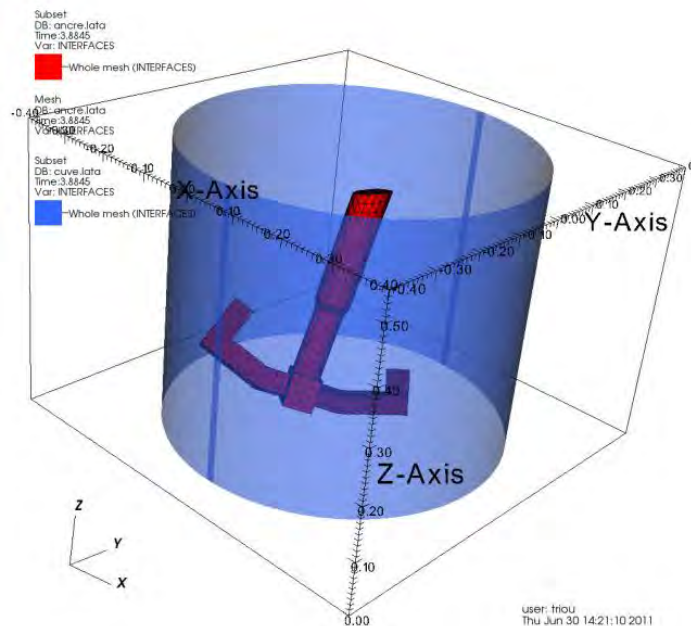


(Pot de vitrification, M. Belliard)

ETUDE TRIOCFD DE LA MAQUETTE « VITRIF »

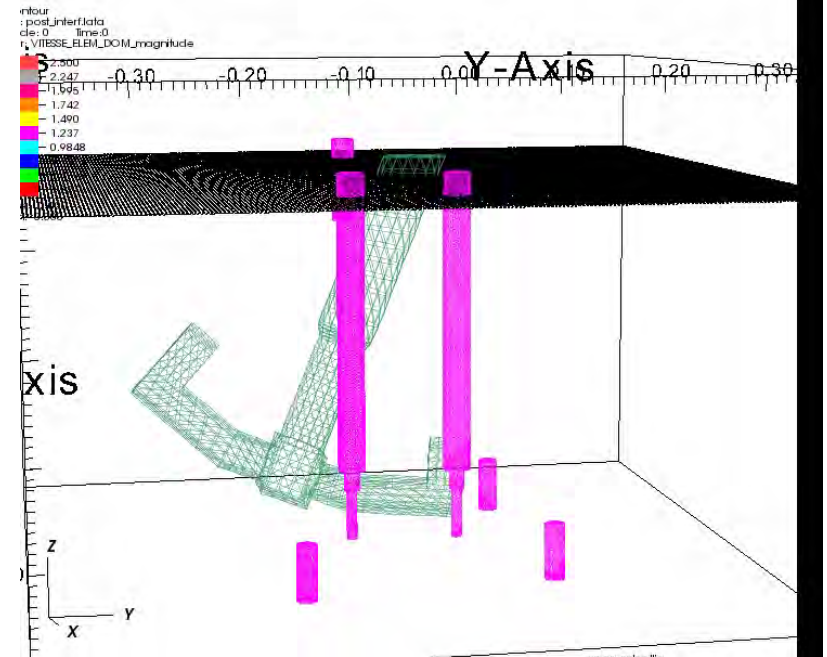
■ Simulation de l'hydraulique et des transferts thermiques au sein du bain de verre agité

- Maillage cartésien avec méthode de frontière immergée (IBC) pour la prise en compte du mouvement de l'agitateur et de la paroi du creuset
- Simulations massivement parallèles (20 millions d'éléments)
- **Validation en fluide simulant grâce à la maquette hydraulique VITRIF (maquette en huile silicone)**
 - Mesures du champ de vitesse bidimensionnel par PIV (vélocimétrie par images de particules) dans des plans verticaux en l'absence de bullage (présence d'une zone d'ombre correspondant à la zone de traversée de l'agitateur dans le plan)
 - Comparaison calcul / expérience pour les vecteurs vitesse moyens : erreur relative (en norme L2) inférieure à 20%



VITRIF

TrioCFD



Expérience

Simulation

UP-SCALING EXAMPLES

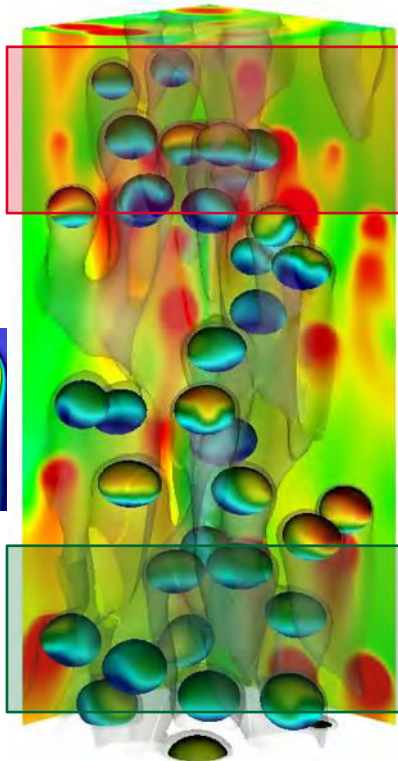
SUBCOOLED HEAT TRANSFER

- Condensation rate models are based on experiments on isolated bubbles without flow;
- Up-scaling lesson : 20% improvement of heat transfer due to “pseudo-turbulence”.

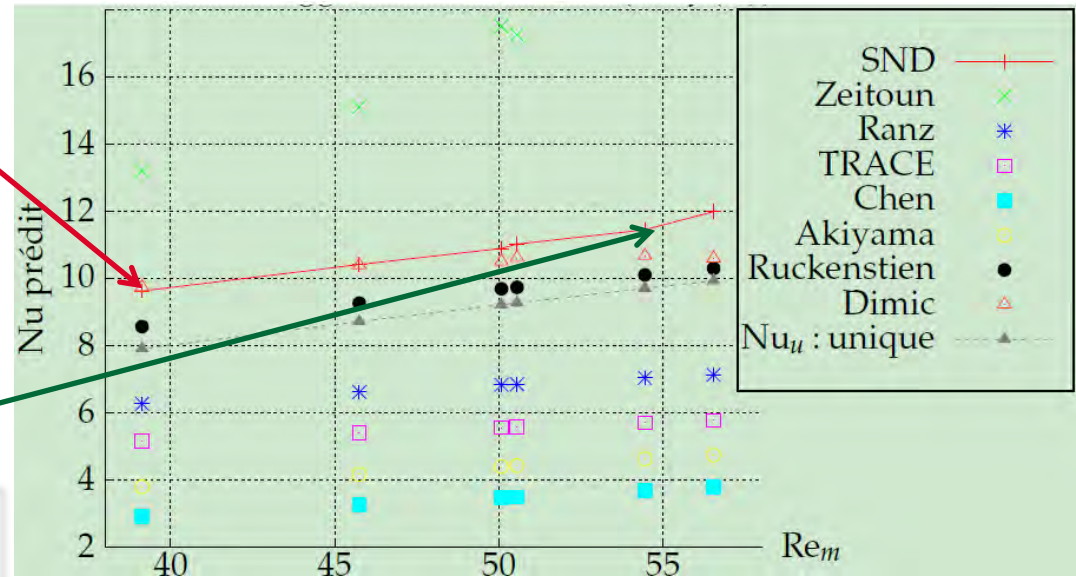
- 1 500 procs
- 800 000 h CPU
- 3 To data

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(\frac{1}{S} \int_S \dot{m}^i dS \right) d\tau \rightarrow Nu \text{ Phase-change rate}$$

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(\frac{1}{V} \int_{V_v} u_v \cdot e_z dV_v \right) d\tau \rightarrow Re \text{ Relative velocity}$$



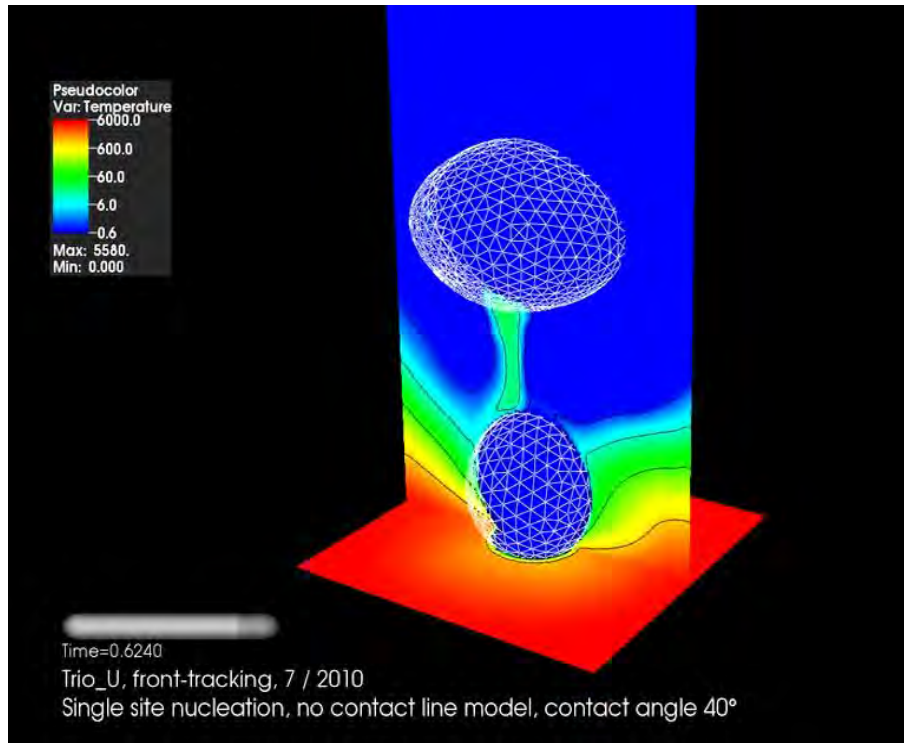
PhD G. Bois (2010)



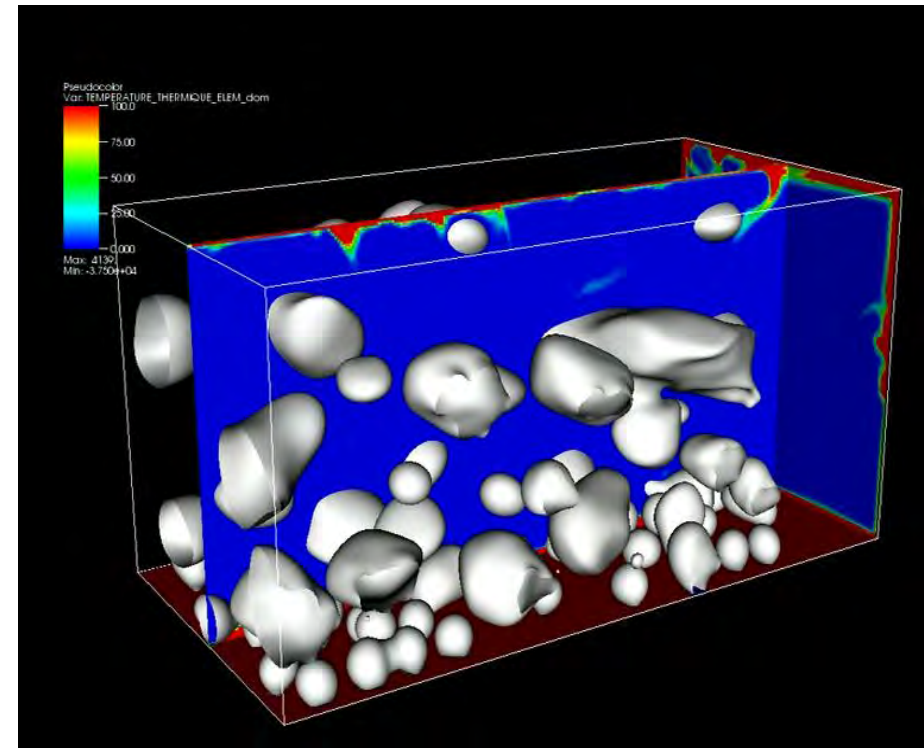
⇒ Strongly dispersed experiments

OTHER EXAMPLES

NUCLEATION



Isolated nucleation site

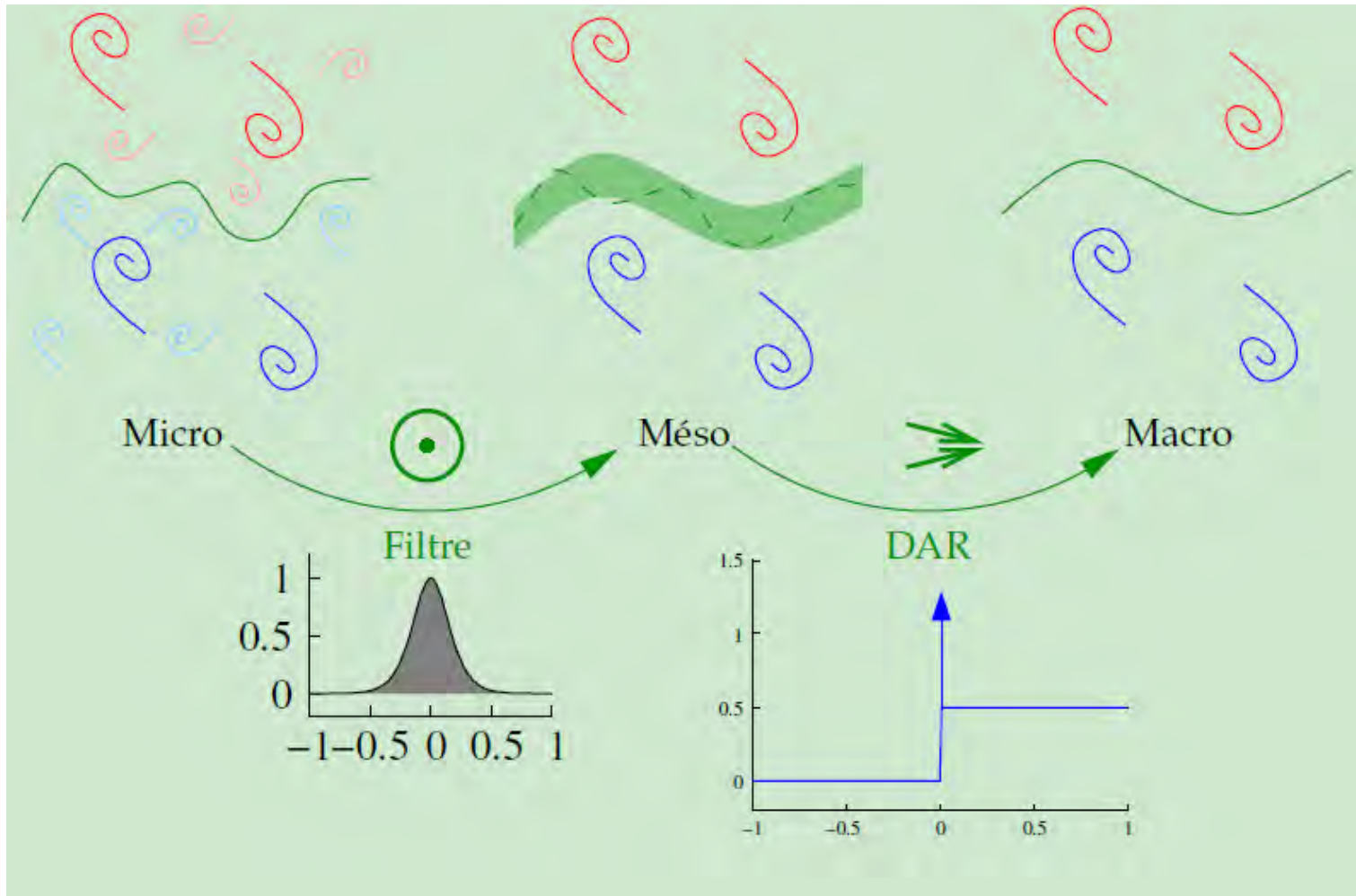


Regular grid of nucleation sites

OTHER UP-SCALING EXAMPLES

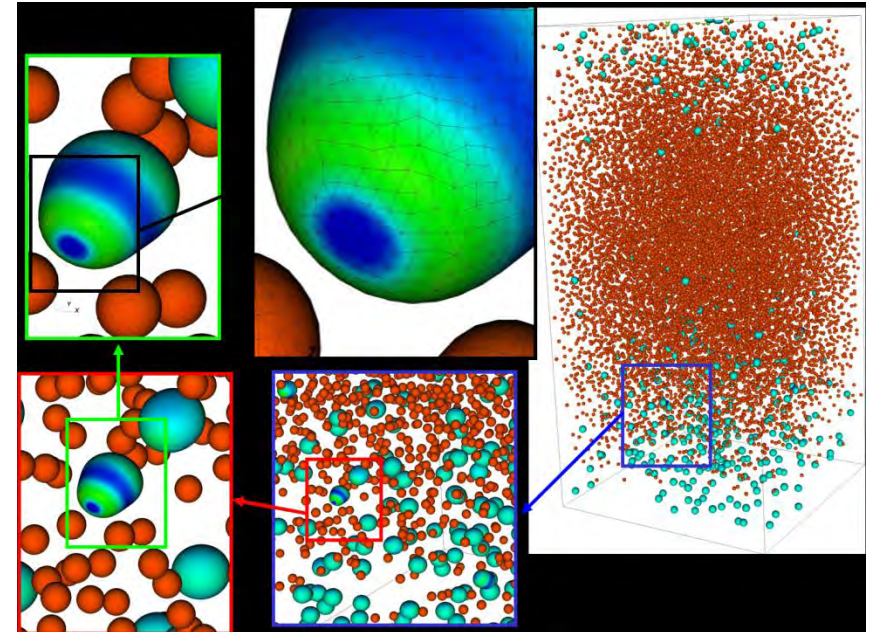
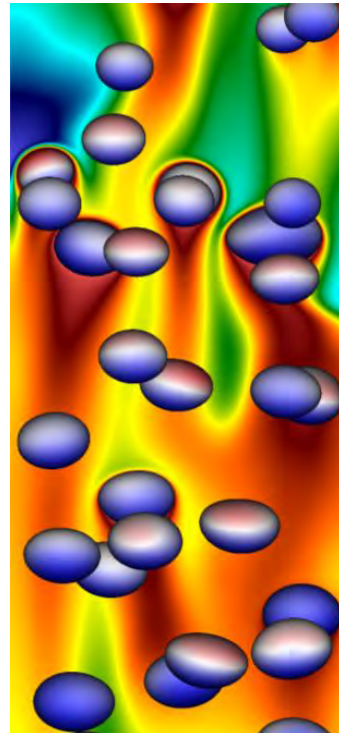
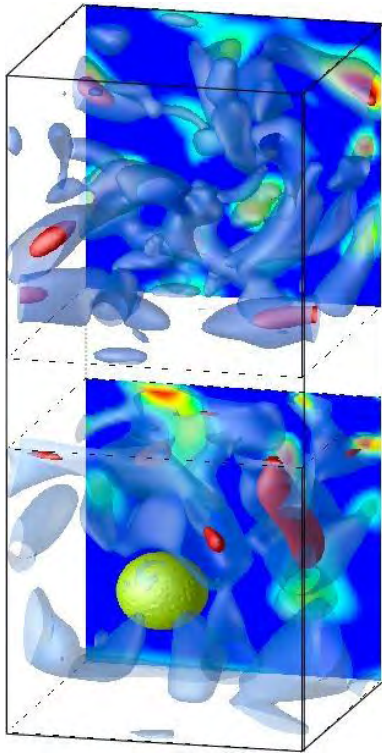
INTERFACES AND SUB-GRID SCALE MODELING

- DNS is too expensive to be used in parametric studies or at high Reynolds numbers;
 - Single-phase LES has been very useful but what should be done close to interfaces?
- ⇒ Interfaces and Subgrid Scale modeling (ISS, Toutant 2006, Bois 2011)



- DNS is too expensive to be used in parametric studies or at high Reynolds numbers;
 - Single-phase LES has been very useful but what should be done close to interfaces?
- ⇒ Interfaces and Subgrid Scale modeling (ISS, Toutant 2006, Bois 2011)

- Development and applications :
 - Interaction with Homogeneous Isotropic Turbulence;
 - Condensation rate;
 - Drag force and interfacial area modeling.



TrioCFD:

- Code de Thermo Hydraulique monophasique (échelle CFD) et diphasique (échelle DNS);
- Code mature, qui a fait l'objet de nombreuses études pour des applications variées;
- Parallélisme MPI avec décomposition de domaine géométrique sur plusieurs dizaines de milliers de coeurs;
- Utilisation d'une méthode de validation;
- Des méthodes numériques originales.
- Une architecture évolutive qui permet de développer de nouveaux modèles ou schémas numériques;
- Nécessité de s'adapter aux nouvelles architectures à travers l'utilisation d'un parallélisme hétérogène
- Introduction à venir d'une méthode de décomposition de domaine (ANR CINE-PARA) : problème de Stokes puis Navier-Stokes
- **TrioCFD est en quête de nouvelles applications**

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
T. +33 (0)1 69 08 21 61 | F. +33 (0)1 69 08 85 68

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

Direction de l'Energie Nucléaire
Département de Modélisation des
Systèmes et Structures
Service de Thermohydraulique et de
Mécanique des Fluides