



Prise en compte du rayonnement dans différentes applications multiphysiques traitées à l'ONERA

Jean-Michel Lamet, Lionel Tessé, Luc-Henry Dorey et Francis Dupoirieux
ONERA - DEFA

Journée SFT, 21 octobre 2014



retour sur innovation

Plan de la présentation

- ❑ Introduction
- ❑ Généralités sur les codes de rayonnement ASTRE et REA
- ❑ Généralités sur le couplage multiphysique avec rayonnement
- ❑ Exemples d'application
- ❑ Cas de simulations multiphysiques en propulsion solide
- ❑ Conclusions / Perspectives

Introduction

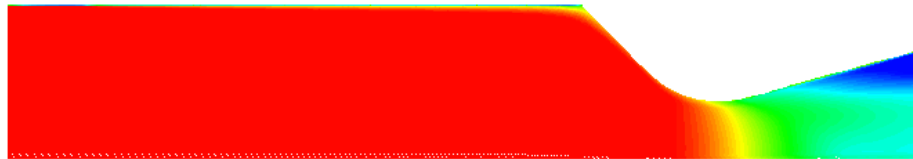
Écoulements à haute température



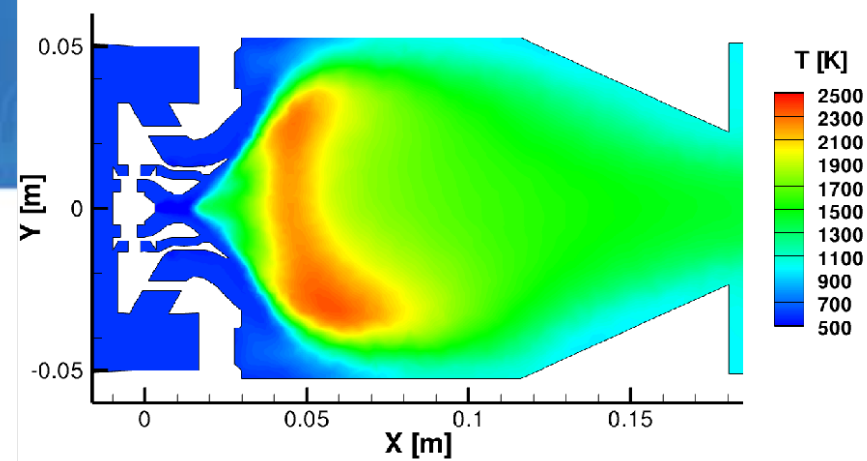
Contribution significative du rayonnement au transfert de chaleur



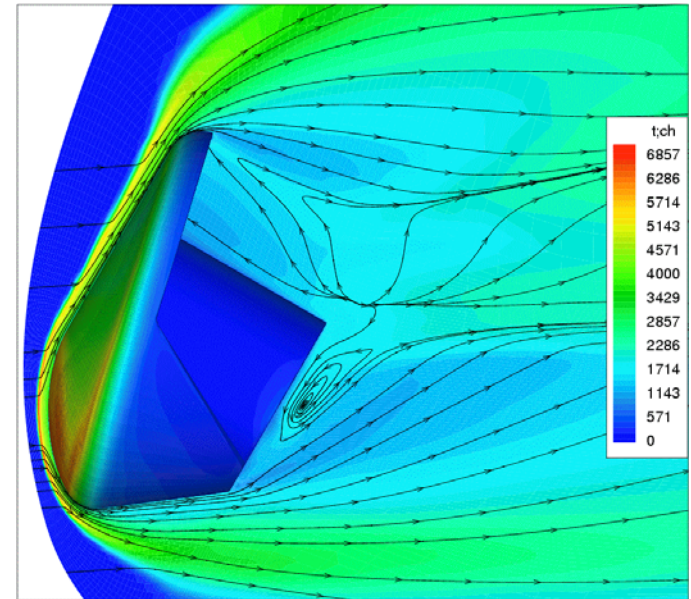
Calcul du transfert radiatif en post-traitement ou couplé avec l'écoulement et les conditions limites



Foyer anaérobie



Foyer aérobie



Rentrée atmosphérique

Solveurs de rayonnement

☐ Solveur ASTRE

Calcul des puissances et des flux par méthode de Monte Carlo

Maillages non structurés généralisés

Parallélisation par paquets de photons numériques :

- MPI (maillage < 5 millions de points)
- MPI-OpenMP (maillage > 5 millions de points)

2 versions :

- Intégrée à la plateforme multiphysique CEDRE
- indépendante

☐ Solveur REA

Résolution de l'ETR par méthode des ordonnées discrètes

Maillages non structurés généralisés

Parallélisation par domaine géométrique (MPI)

Solveur intégré à la plateforme multiphysique CEDRE

Modèles de propriétés radiatives des gaz

☐ Milieux en combustion

Modèle CK : H₂O et CO₂, P=1 atm, T < 5000 K

MSBE : H₂O, CO₂, CO et HCl, T < 5000 K

« Box models » : H₂O, CO₂, CO et HCl, P > 5 atm, T < 5000K

☐ Plasmas

MSBE atmosphère martienne : CO₂ et CO, P < 100Pa, T<4000K

MSBE atmosphère terrestre (plasma O₂-N₂ avec déséquilibre thermique)

☐ Matériaux semi-transparents Verre / Silice

Box models pour plusieurs teintes de verre

☐ Emission radical OH

Base spectroscopique pour les raies entre 280 et 400 nm

ASTRE	REA
ok	ok
ok	
ok	ok
ok	
ok	
ok	
ok	

Modèles de propriétés radiatives des particules

☐ Particules de suie

- hypothèse : particules sphériques homogènes isothermes de petite taille
- théorie de Mie → diffusion Rayleigh négligeable
→ coef. d'absorption : $\kappa_v = f(n_v, \chi_v) v f_v \approx 5,5 v f_v$

☐ Gouttes d'alumine et/ou d'eau

- hypothèse : particules sphériques homogènes isothermes
- calcul des efficacités par la théorie de Mie
- possibilité de prendre en compte les phénomènes de diffusion anisotrope
- différentes classes de particules et une température de classe de particules différente de celle du gaz
- indice optique pour l'alumine donné par Dombrovsky ou Joumani
- indice optique pour l'eau donné par Hale and Querry
- possibilité de tabuler ces propriétés radiatives

ASTRE	REA
ok	ok
ok	ok Al_2O_3

Couplages multiphysiques

Où ?

Couplages spatiaux

- Couplages surfaciques (Conditions limites, interfaces...)
- Couplages volumiques

Quand ?

Couplages temporels

- Couplages synchrones
- Couplages asynchrones
- Fréquences de couplage

Quoi ?

Quantités échangées

Comment ?

Types d'interactions

- Post-traitement
- « One-way »
- « Two-way »

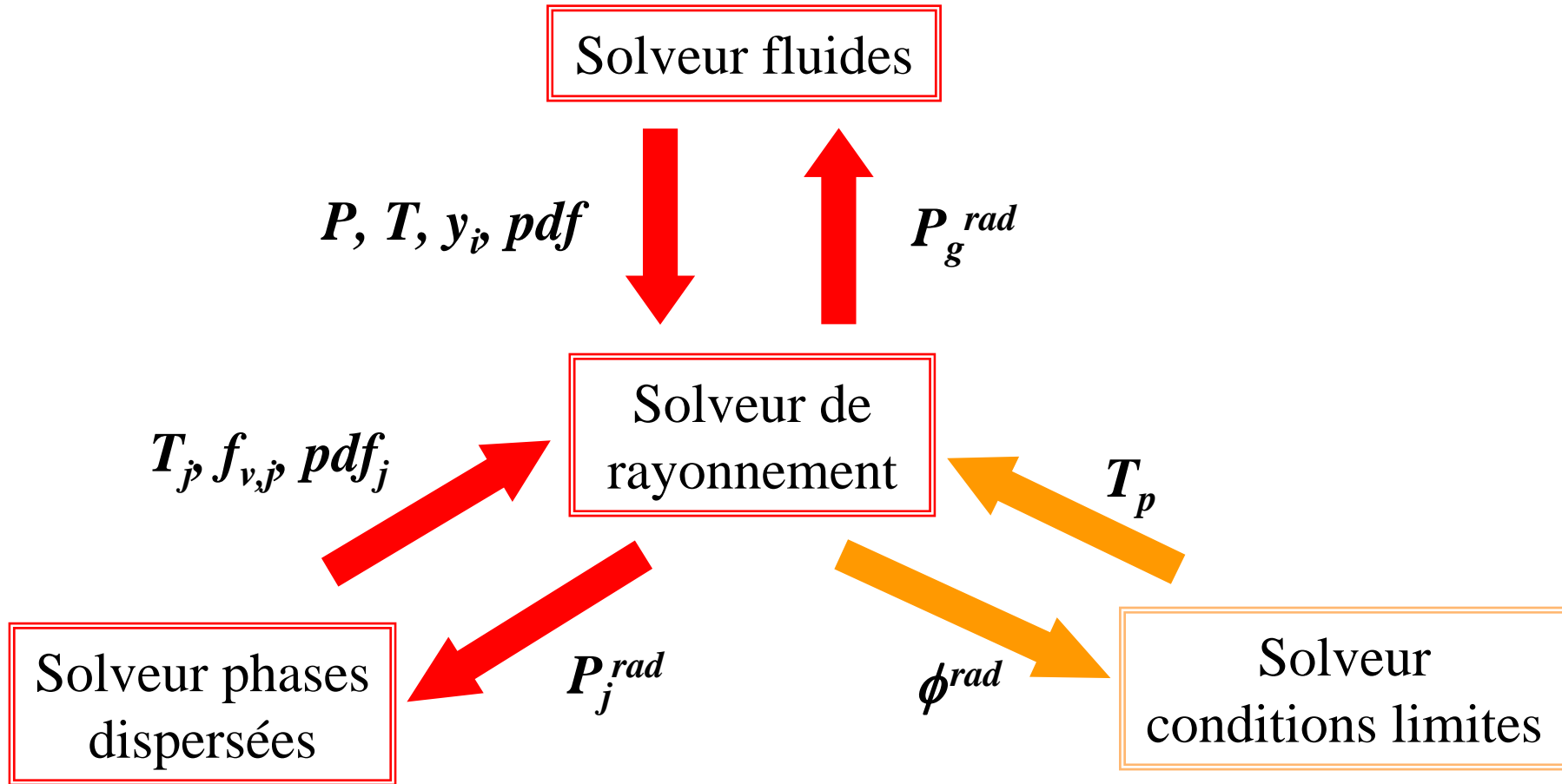
Comment ?

Couplages informatiques

- Couplages internes
- Couplages externes

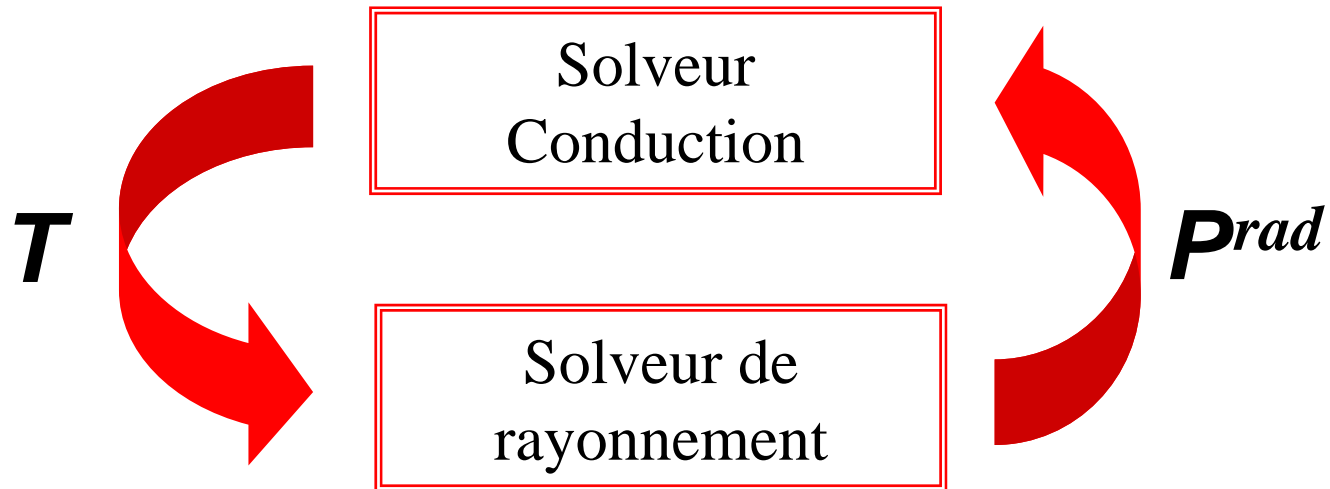
Couplages multiphysiques

- Interactions Écoulement diphasique / Rayonnement / Paroi



Couplages multiphysiques

- Interactions Matériau semi-transparent / Rayonnement



Couplages multiphysiques

□ Couplages internes (ASTRE / REA)

- Plateforme multiphysique **CEDRE** (couplage synchrone) (Onera, Herakles)

□ Couplages externes (uniquement pour le code ASTRE)

- Chaînage de codes par fichiers

- Chaîne CelHyo3D-**ASTRE** (Onera)
- Chaîne N3S-**ASTRE**-ABAQUS (Snecma)
- Chaîne N3S-**ASTRE**-ANSYS (Turbomeca)

- Coupleur CWIPI (couplage synchrone/asynchrone)

- Couplage CEDRE-**ASTRE** (Onera)
- Couplage **ASTRE**-Zebulon (Onera)

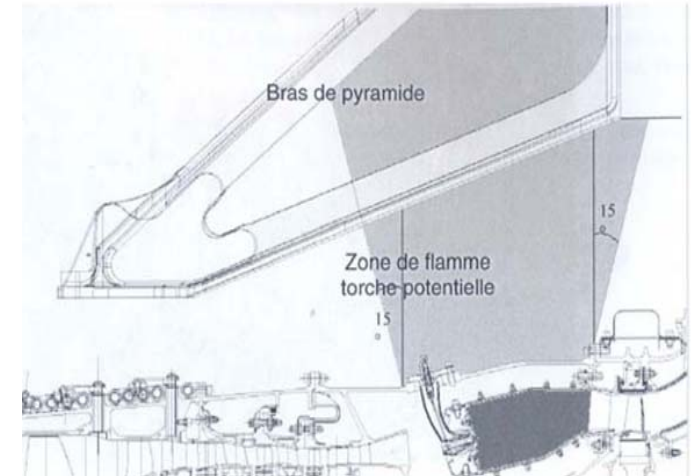
- Coupleur OpenPalm (CWIPI + PALM) (couplage synchrone/asynchrone)

- Couplage CEDRE-**ASTRE** (Onera)
- Couplage **ASTRE**-FLUENT (Safran) (en cours)
- Couplage **ASTRE**-Zebulon (Onera) (en cours)

Exemples d'application

☐ Tenue thermique de pièces de moteur d'avion soumises au feu

- Interaction Rayonnement-flamme-paroi
- Modèle CK (CO_2 , H_2O) et suies
- Couplage interne (CEDRE : 4 solveurs CHARME-SPARTE-ACACIA-ASTRE)



Flux convectif

~~confidentiel~~

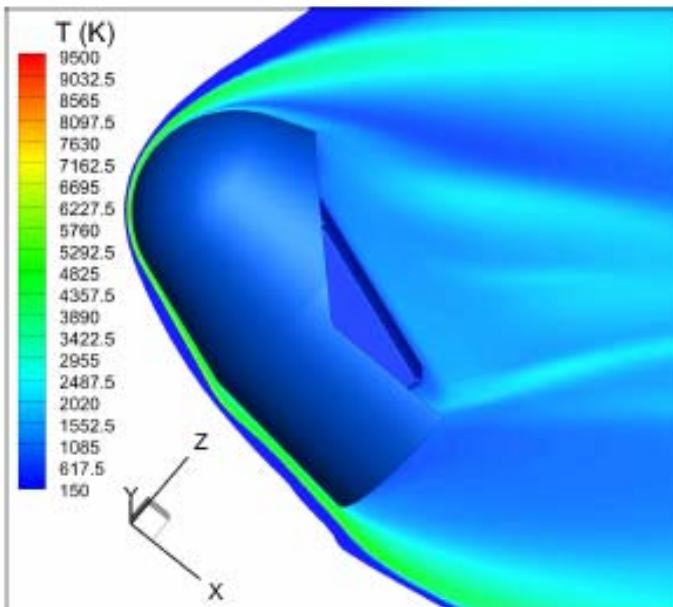
Flux radiatif

~~confidentiel~~

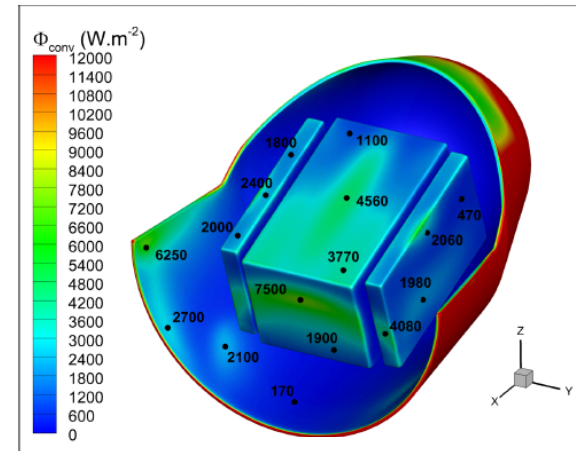
Exemples d'application

Dimensionnement de protections thermiques de véhicules de rentrée atmosphérique

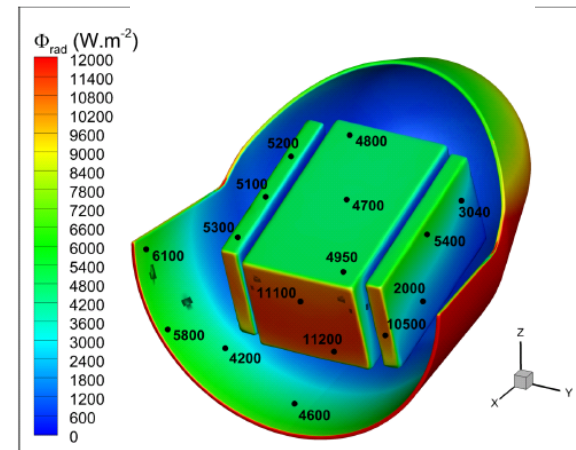
- Interaction Rayonnement-Ecoulement
- Modèle MSBE CO₂, CO
- Couplage à 2 codes CelHyo3D-ASTRE
- Couplage externe par fichiers



Démonstrateur
AEROFAST



Flux convectif



Flux radiatif

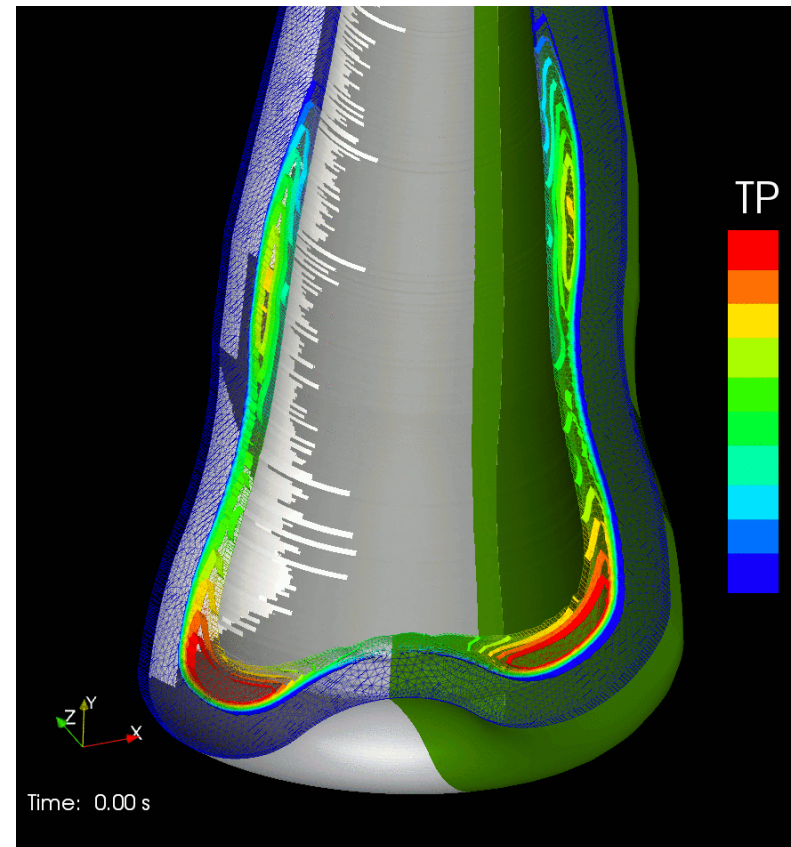
Exemples d'application



❑ Formage du verre (vitesse de refroidissement en fonction de la teinte)

- Interaction Conduction / rayonnement
- 1 Box model pour chaque teinte
- Couplage à 2 codes Zebulon-ASTRE
- Couplage externe via CWIPI

Évolution de la température du verre



Teinte blanche / Teinte verte

Exemples d'application

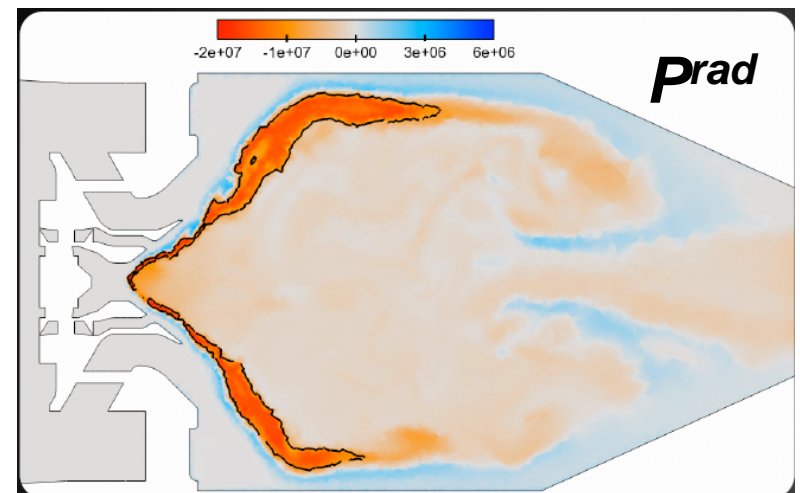
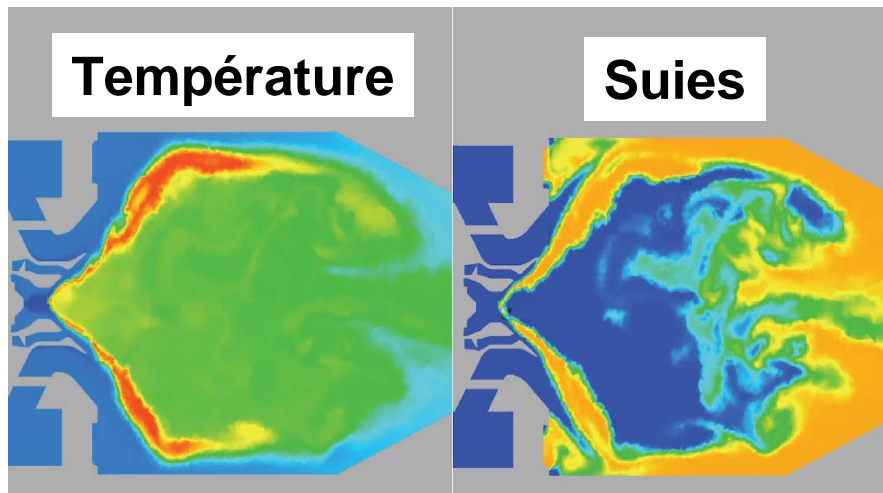
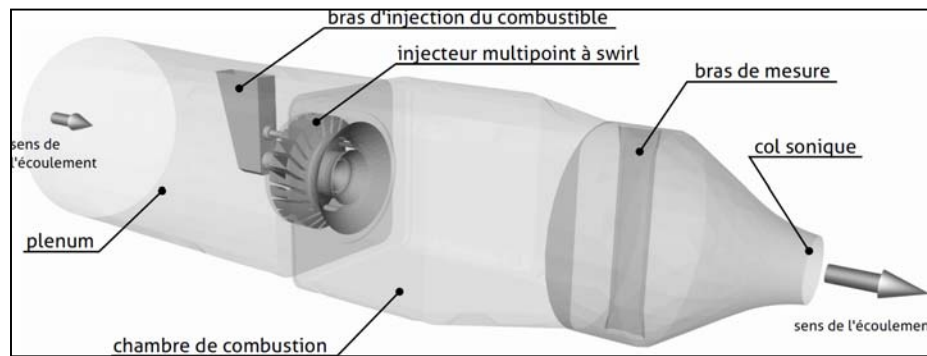
□ Émissions polluantes et tenue thermique des foyers aérobies

- Interaction Rayonnement-flamme
- Modèles Haute Pression (CO_2 , H_2O , CO) et suies
- Couplage interne (CEDRE : 3 solveurs, CHARME-SPARTE-ASTRE)
- 2 types de simulation :
 - Simulation RANS avec Interaction Rayonnement / Turbulence
 - ASTRE récupère des données sur les fluctuations pour générer des champs aérothermochimiques de manière stochastique
 - Simulation LES avec rayonnement
 - Optimisation de la fréquence de couplage
 - Optimisation du temps CPU de l'itération radiative

Exemples d'application



□ Émissions polluantes et tenue thermique des foyers aérobies

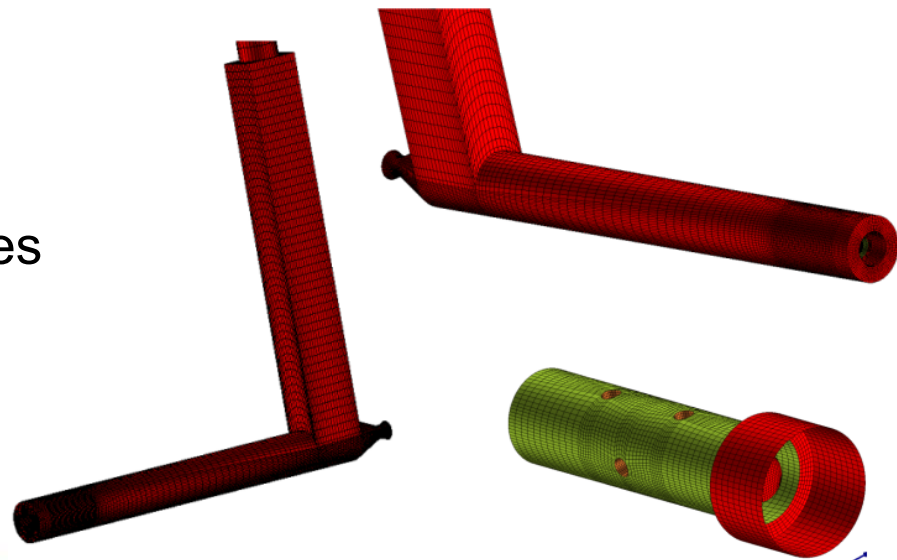
➤ Simulation LES-Rayonnement : cas de la chambre TLC (Thèse LH. Dorey 2012)



Simulations multiphysiques en Propulsion Solide

□ Simulations de l'allumage de blocs de propergol sur le banc expérimental CHEAP

- Configuration 
 - Fonctionnement 
 - Simulation en ambiance sèche
 - Simulation en ambiance humide
- Maillage 3D de 250 000 cellules
 - Calcul sur 128 processeurs



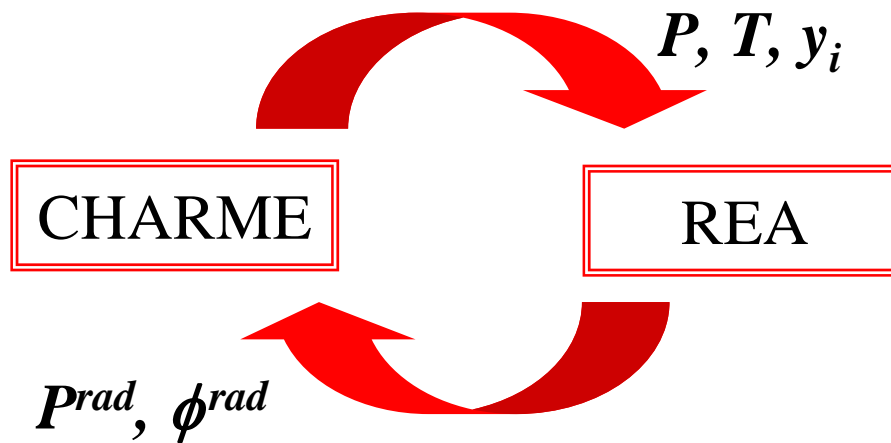
Simulations multiphysiques en Propulsion Solide

□ Simulation en ambiance sèche (CEDRE – 2 solveurs)

➤ Méthodologie de couplage

CHARME : - Gaz neutre, gaz de combustion, particules Al_2O_3 ($\varnothing = 1 \mu\text{m}$)
- Modèle $k-\omega$ pour la turbulence

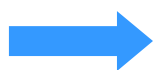
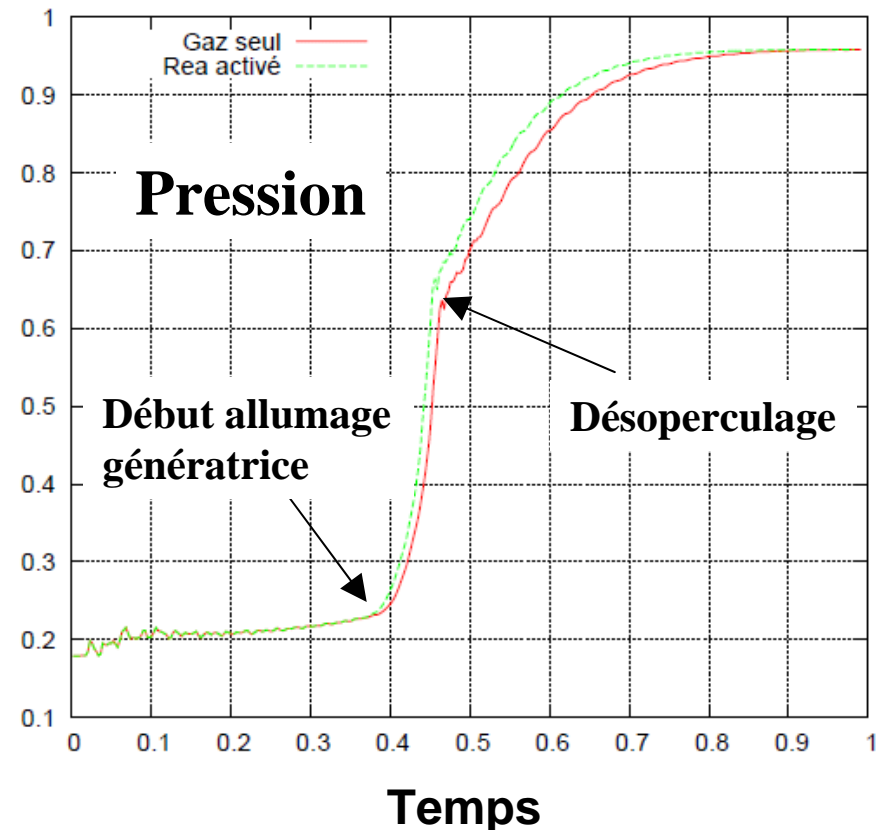
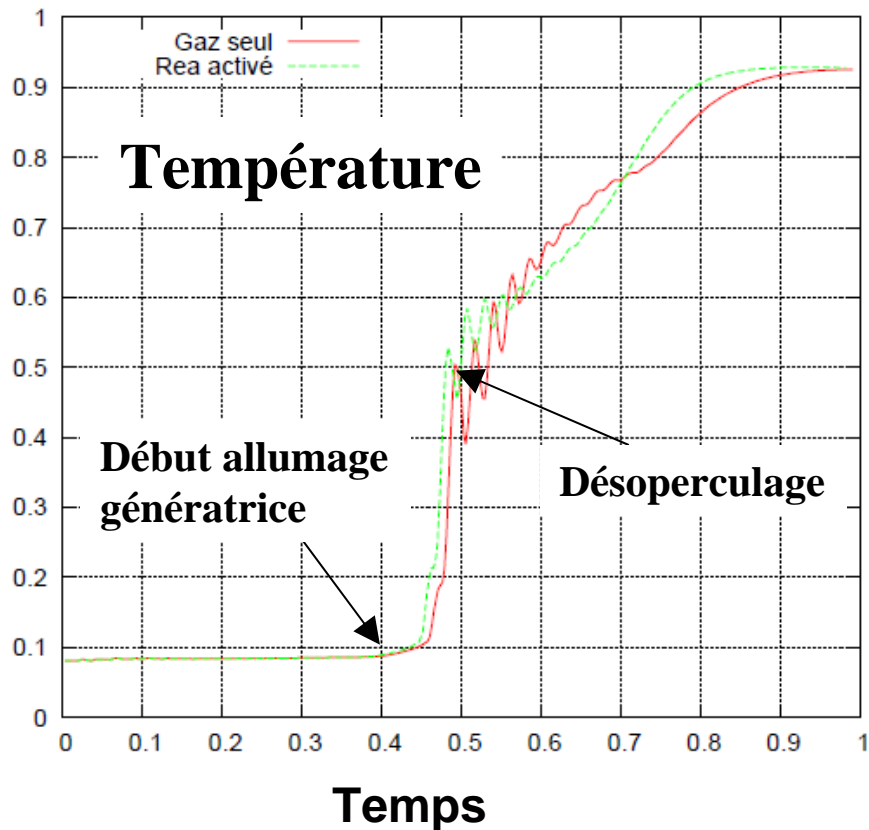
REA : - Gaz (CO_2 , H_2O , CO , HCl) + particules Al_2O_3



- Couplages surfacique et volumique
- Couplage synchrone
- Période de couplage 1 ms (1000 itérations CHARME)

Simulations multiphysiques en Propulsion Solide

Simulation en ambiance sèche (CEDRE – 2 solveurs)



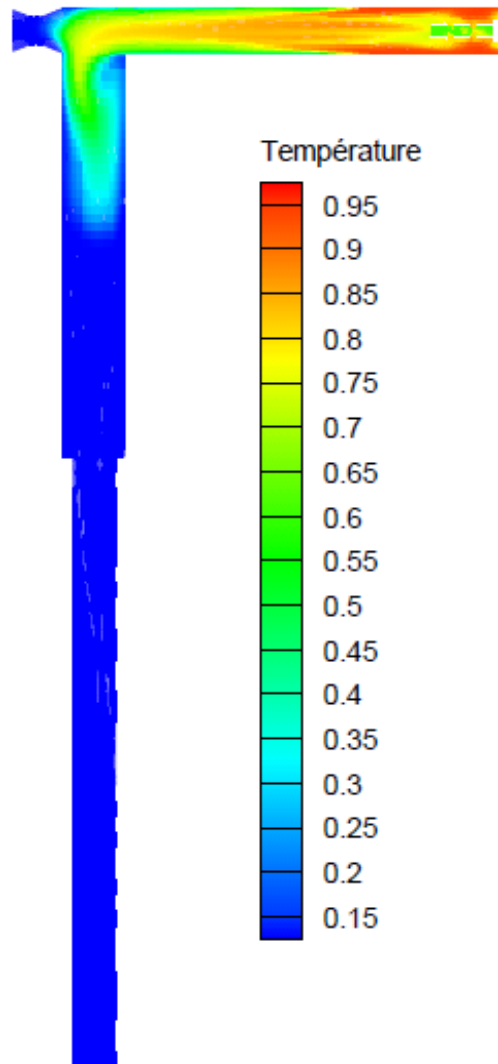
Réduction de 18 % du temps entre le début de l'allumage de la génératrice et le désoperculage

Simulations multiphysiques en Propulsion Solide

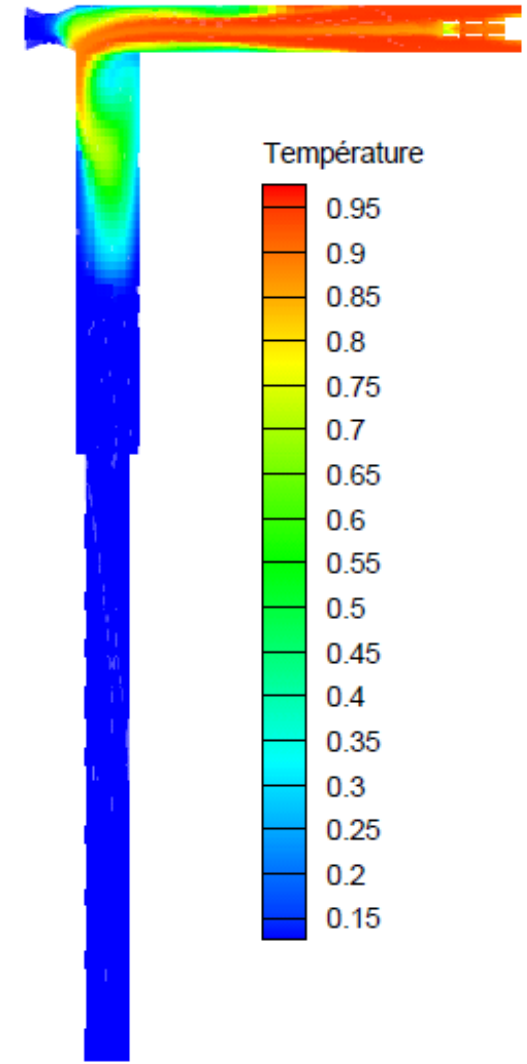
- Simulation en ambiance sèche (CEDRE – 2 solveurs)

Champ de température à $t = 0.43$

Non couplé



Couplé



Simulations multiphysiques en Propulsion Solide

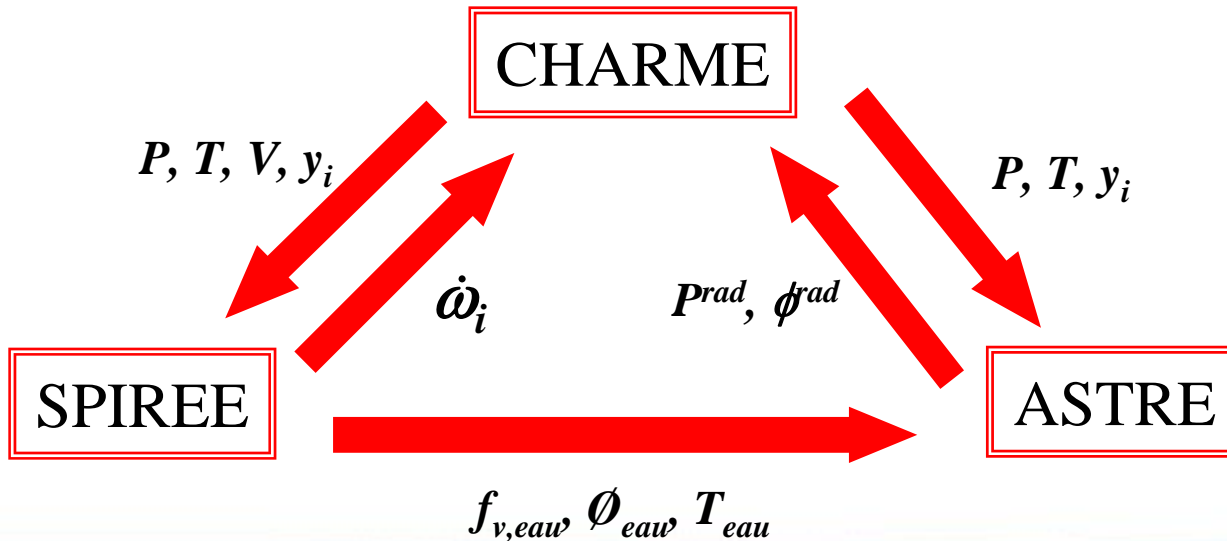
Simulation en ambiance humide (CEDRE – 3 solveurs)

➤ Méthodologie de couplage

CHARME : - Gaz neutre, gaz de combustion, particules Al_2O_3 ($\varnothing = 1 \mu\text{m}$)
- Modèle $k-\omega$ pour la turbulence

SPIREE : Gouttes d'eau ($\varnothing_{\text{ini}} = 10 \mu\text{m}$) dans l'ailette avec évaporation

ASTRE : Gaz (CO_2 , H_2O , CO , HCl) + particules Al_2O_3 et gouttes d'eau

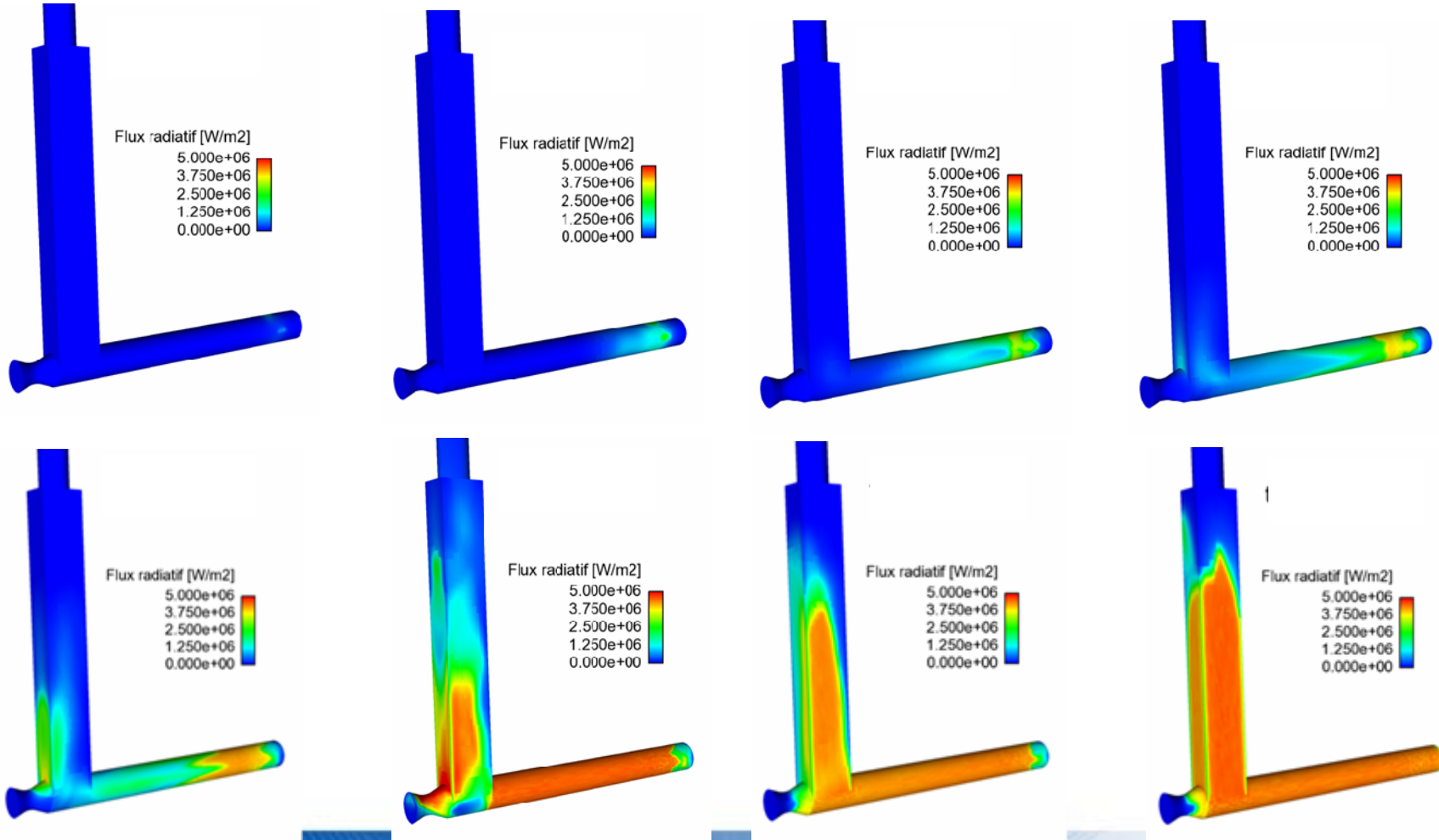


- Couplages surfacique et volumique
- Couplages synchrones
- Période de couplage ASTRE avec CHARME/SPIREE : 1 ms (1000 itérations)

Simulations multiphysiques en Propulsion Solide

Simulation en ambiance humide (CEDRE – 3 solveurs)

Flux radiatif ASTRE (128 millions de tirs par itération)



Simulations multiphysiques en Propulsion Solide

□ Simulation en ambiance humide (CEDRE – 3 solveurs)

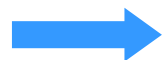
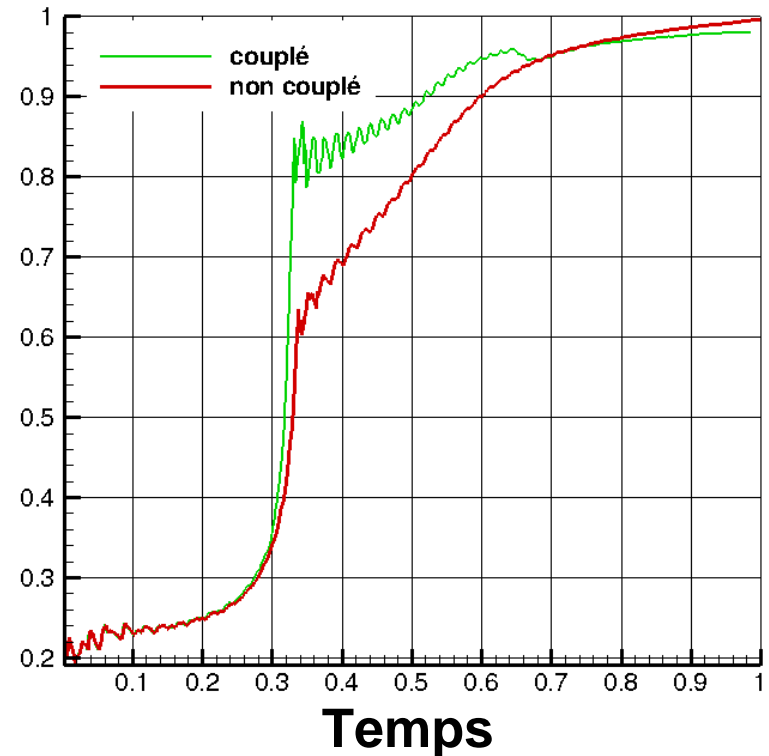
➤ Montée en pression

-Réduction du délai d'allumage de la génératrice

-Problème de désoperculation (réalisé « manuellement » à une pression trop élevée dans le calcul couplé)

- Difficile de conclure sur le délai d'allumage du bloc de l'ailette et de l'effet des gouttes d'eau

Pression



Mise en œuvre de ce type de simulation à poursuivre

Conclusions / Perspectives

- ❑ Prise en compte du rayonnement dans de plus en plus d'applications semi-industrielles / industrielles
 - ❑ Solveurs radiatifs ASTRE / REA fonctionnels pour une large gamme d'applications
-
- ❑ Algorithme de couplage (fréquence de couplage, convergence, stabilité...)
 - ❑ Enrichir les couplages internes et externes
 - ❑ Orienter les codes de rayonnement vers le HPC
 - ❑ Disposer de modèles radiatifs plus précis (en particulier pour les particules)