

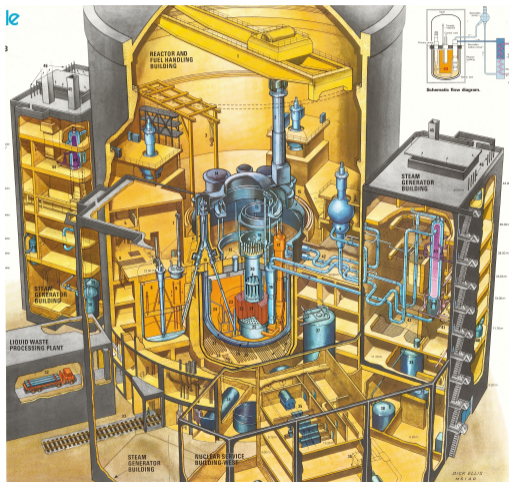


Réacteurs innovants: le nucléaire en mode “startup”

Antoine Gerschenfeld

CEA - DM2S/STMF

25/10/2023



Introduction

Réacteur innovant?

↑ ne relevant pas d'un concept **commercialisé** (eau pressurisée/bouillante)

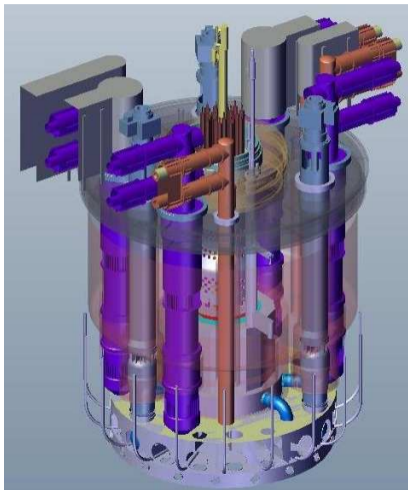
■ désigne le plus souvent un réacteur "Gen4" :

- meilleure utilisation des **ressources** (^{238}U / Th au lieu de ^{235}U)
- réduction de la **durée de vie** des déchets → par **transmutation** de Pu/Am/Cm/...

⇒ 6 technologies...

■ ... dont une très connue en France : **RNR-Na** (neutrons **rapides**, caloporteur **sodium**)

- RAPSODIE ('67-'78, 40 MWth)
- PHENIX ('73-'10, 250 MWe)
- SUPERPHENIX ('84-'97, 1200 MWe)



ASTRID

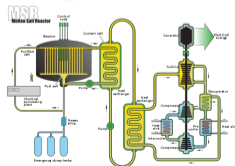
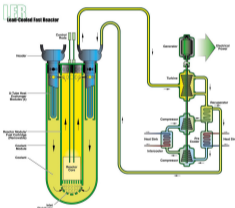
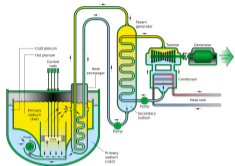
- loi “déchets” de 2006 : le CEA doit mettre en service un **prototype** de réacteur d’ici fin 2020
- ⇒ projet lancé avec le **PIA** de 2009:
Advanced **S**odium **T**echnology **R**eactor for **I**ndustrial **D**emonstration
- gros RNR-Na (600 MWe \simeq tête de série)
→ coûts de **développement**/**construction** élevés
- tentative de **réduire la puissance** en 2018-19
→ 150 MWe / 400 MWth : **SMR**
- ... mais **annulation** fin 2019



Introduction

France 2030

- Relance du nucléaire en 2021 (“Discours de Belfort”, CPN...)
 - plusieurs programmes dans les plans post-Covid
France Relance et **France 2030** :
 - projets de **R&D** (ISAC, MOSARWASTE...)
 - soutien au projet **NUWARD** (cf. Pierre!)
 - ... et un appel à projets “**Réacteurs innovants**” :
 - réservé aux **nouveaux entrants** → startups!
 - financement **50% public**
 - structuré en **trois phases** :
 - phase 1 : ~10x10 M€
 - phase 2 : ~2x80 M€
 - phase 3 : 1x300 M€
- + soutien **public** (CEA, CNRS?,...)

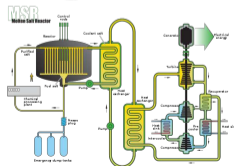
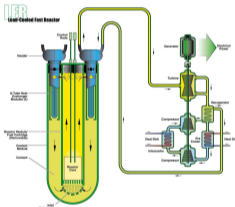
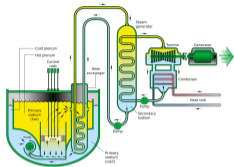


Introduction

Startups

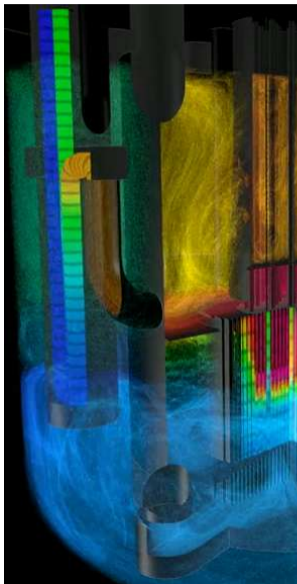
De l'ordre de **25** candidats à la phase 1! 2 déjà **retenus**
En particulier:

- Réacteurs refroidis au **sodium** :
 - **HEXANA** ← “héritière” d'ASTRID
 - **OTRERA**
 - **Blue Capsule** ← sodium, mais blocs de **graphite**
⇒ réacteur à spectre **thermique!**
- Réacteurs refroidis au **plomb** :
 - **Newcleo**
- Réacteurs à **sels fondus** :
 - **NAAREA**
 - **Thorizon**
 - **Stellaria**
- Réacteurs refroidis au **gaz** : **Jimmy Energy**



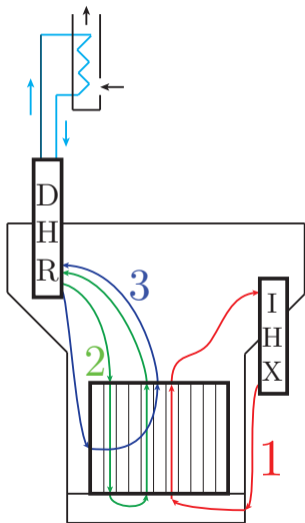
Startups : remarques

- dans tous les cas : écoulements **monophasiques**
→ y compris dans la plupart des **accidents!**
(un peu de diphasique en **sodium...**)
- et à basse **pression** : transitoires **lents!**
- dans les cas **sodium/plomb** : écoulements **complexes**
→ besoin de **dépasser** l'échelle **0D/1D** :
couplages **multi-échelles**
- dans le cas **sel fondu** :
combustible (Th, U, Pu) **dissous dans un liquide**
→ interactions entre **mécanique des fluides** et **neutronique** :
couplages **multiphysiques**
- dans tous les cas : ~~SMR~~ **AMR**
 - **décarboner** l'industrie (électricité + **chaleur** $\geq 500^\circ$)
 - développement (expériences + **prototypes**) plus abordables!



Pourquoi le multi-échelles?

- modélisation **classique** des transitoires réacteur:
TH **système** (STH) → 0D/1D
→ pour les (U)LOF, (U)LOHS, UTOP...
- possibilité de phénomènes **complexes** :
dynamique de jets, stratification..
→ par le passé : **modèle grossier** + **conservatisme**
- cette méthode devient **difficile**:
 - plus de **sûreté** → transitoires plus **complexes**
 - designs **compacts/optimisés** → moins de **marges**
- développement progressifs de modèles "**haute-fidélité**"
(en particulier CFD) → les utiliser?



Métaux liquides

Exemple: EPUR passive en conv. nat.

- EPUR passive vers l'air par un échangeur en haut
- compétition entre **trois chemins hydrauliques** :
 - 1 circulation **standard** échangeur → pompe → cœur
 - 2 recirculations **entre assemblages**
 - 3 recirculations **autour des assemblages**

⇒ seul (1) peut être modélisé en échelle **0D/1D**!

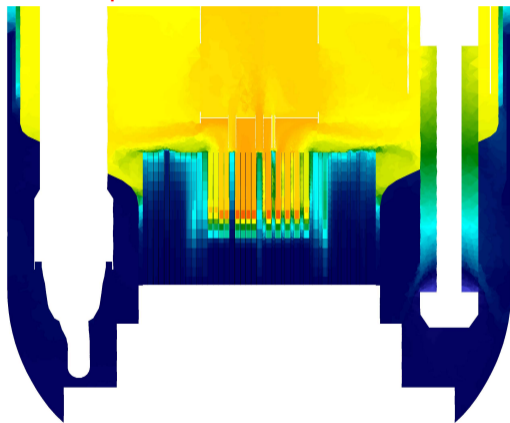
Approches possibles

- simulation **0D/1D** :
 - (2) **mal calculé**, (3) **négligé**
 - ⇒ $T_{cœur}$ surestimé (conservatif...)
 - Q_{prim} surestimé (pas conservatif!)

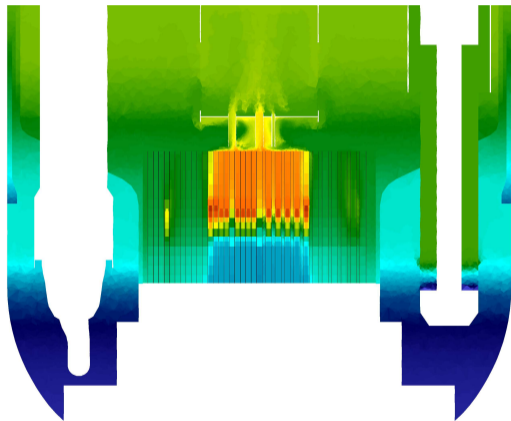
⇒ il faut pouvoir intégrer les **effets locaux**



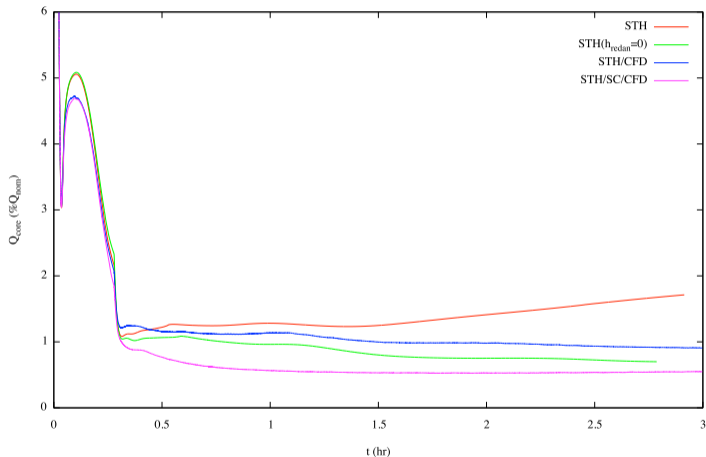
EPUR passive: cas ASTRID



État nominal

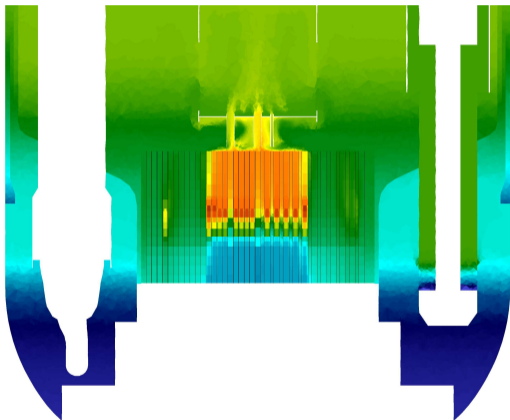


Convection naturelle (long terme)



EPUR ASTRID: débits

- rouge: 0D/1D
→ collecteurs homogènes
 - bleu: 0D/1D + 3D cuve
→ stratification
 - vert: 0D/1D corrigée
($h = 0$ entre cuves)
 - violet: 0D/1D + 3D cuve
+ 3D cœur
- ⇒ $Q_{\text{cœur}}$ surestimé de parfois 100% !



Besoins

Schémas numériques :

- utilisables sur **maillages quelconques** (géométries complexes...)
- précis à **bas Mach**
- capables de simuler des écoulements en **convection naturelle** sur des temps **longs** :
 - **inf-sup** stables (sans stabilisation → conserver la masse)
 - robustes en **pression** :

$$\|v - v_h\| \leq Ch + \frac{1}{\nu} \|p - p_h\|$$

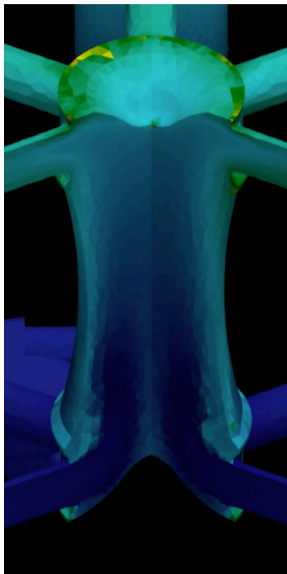
(sans projection → généricité)

... et **algorithmes de couplage!**



Principe

- dissolution du **combustible** (Th, U, Pu) dans un **fluide circulant** :
 - pas de transfert de chaleur **combustible** → **fluide!**
 - la **dilatation du fluide** a un effet **stabilisant** :
 - $P \nearrow \Rightarrow T \nearrow \Rightarrow \rho \searrow \Rightarrow k_{eff} \searrow \Rightarrow P \searrow$
 - $P \searrow \Rightarrow T \searrow \Rightarrow \rho \nearrow \Rightarrow k_{eff} \nearrow \Rightarrow P \nearrow$
 - effet **très rapide** (éventuellement trop → oscillations?)
 - possibilité d'**incorporer Am/Cm/Cf/...** dans le fluide
 - plus facilement qu'en **combustible solide** (fabricabilité + stabilité neutronique)
- mais besoin d'utiliser un fluide **corrosif** : **sel fondu** (LiF-NaF ou NaCl)
 - triple attaque** sur la cuve : **température** ($T \geq 500^\circ$) + **flux neutronique** + **corrosion**
 - **solution** des startups : **cuve remplaçable** (tous les 4-5 ans)
- possibilité de **retraitement en ligne**
 - **trop complexe** pour les startups : retraitement **centralisé**



Cœur

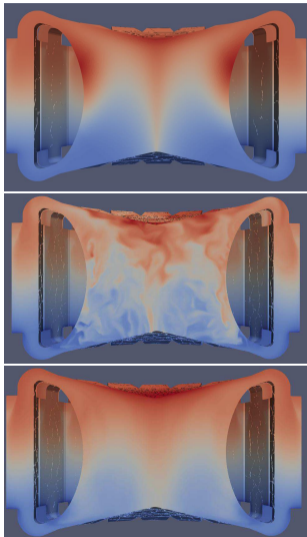
- écoulement **libre** dans une grande cuve **vide**
+ possibilité de points **chauds**

⇒ **CFD** pour la conception

éventuellement **système** (1D) pour les accidents
(mais pas de prédiction des points chauds...)

- spécificité **MSR** → besoin de **couplage** avec :
 - **neutronique** (ex. : **diffusion multigroupes** / **cinétique 3D**)
 - transport des **précurseurs de neutrons retardés** (6 groupes)
 - ... et des précurseurs de **puissance résiduelle** (6 groupes)

⇒ ça peut coûter **très cher**!



F. Martin (DM2S/LMSF)

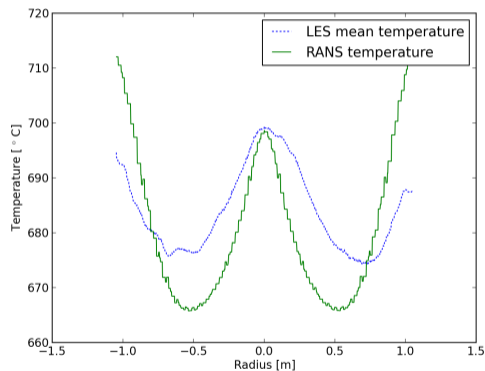
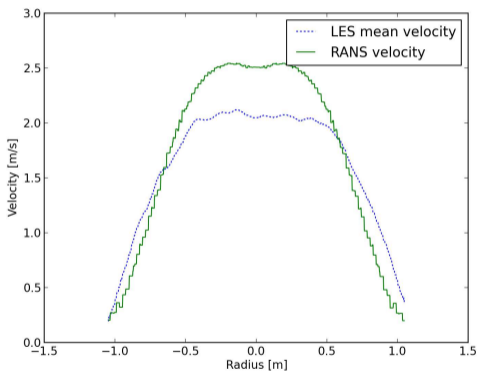


Cœur

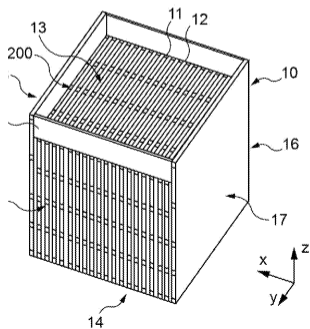
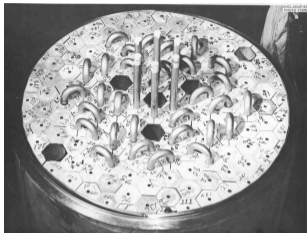
Quelle échelle CFD choisir?

- **RANS** → peu cher (15K h.cpu)...
 - pas de critère sur la **taille de maille**
 - permet de faire un **secteur** (ex. : 30°)... mais ne voit pas les **plus grandes fluctuations**
→ peut **sous-estimer** le mélange / **surestimer** les pics
- **LES** : **maillage fin** + pas de **secteur**
→ **cher**, mais plus **fidèle!** 1.4M h.cpu
- entre les deux : **approches hybrides**
(RANS → LES dans les zones **stagnantes**)
- en pratique : RANS pour la conception
LES quand on peut!

Cœur : RANS vs LES



F. Martin (DM2S/LMSF)



Sels fondus

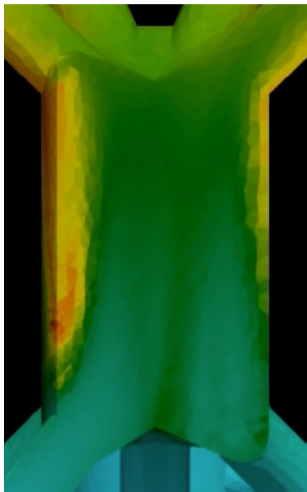
Cœur

Et si le cœur est **encombré**?

- sous forme de **tubes**
→ **ARE** : échelle **système** (1D)
- sous forme de **plaques**
→ **NAAREA** : échelle **sous-canal** (3D grossier)

Dans les deux cas :

- 1 maille **radiale** dans le tube/entre deux plaques
- **corrélations** pour le **frottement**/ l'échange **thermique**



Cœur : remarques

Au nominal :

- éviter les zones **stagnantes**, surtout sur les **parois**
→ en particulier si **pic de puissance** près du réflecteur...
- ne pas abuser de la **mise en rotation** :
 - tend à créer une **colonne chaude** au **centre**
→ par **centrifugation!**
 - qui va ensuite **impacter** le haut/bas de cuve...

⇒ dans tous les cas : besoin d'**optimisation de forme**

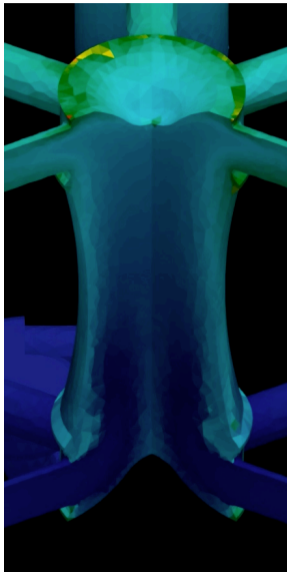
- aujourd'hui : à la main...
- possibilité d'**optimisation topologique**, de **ML?**



Reste du réacteur

- reste du **circuit combustible** (conduites, pompes, échangeurs) :
 - échelle **système** : moins **chère**, modèles **disponibles**...
... mais nécessite un **couplage hydraulique** : délicat!
 - continuer en **CFD** : **pas de couplage**, plus **cher**
... mais possibilité d'**approche poreuse** dans les échangeurs (\simeq sous-canal)
- autres **circuits** (intermédiaire, EPUR, SCE...) :
échelle **système** → couplage **thermique** seulement (plus facile)

⇒ possibilité de simuler un **transitoire** sur le réacteur complet!



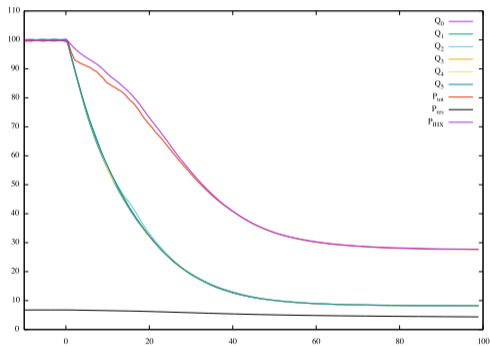
Transitoires

Films d'ULOF (perte de pompes) :

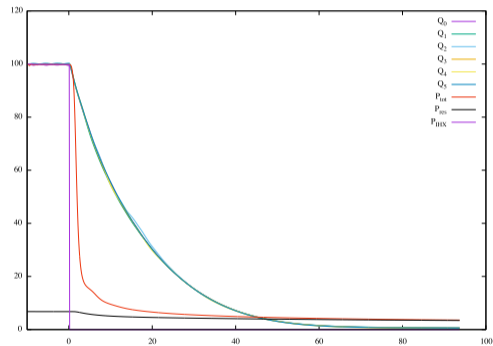
- la **puissance résiduelle** est distribuée **uniformément**
→ attention aux **parties hautes** non refroidies!
 - contraintes sur le **refroidissement** par l'intermédiaire :
 - trop fort → état de **conv. nat.** à **forte puissance**
→ pic **chaud** en partie supérieure
 - trop faible → étouffement neutronique...
mais **échauffement rapide** par la P_{res} :
délai de grâce **faible!**
- besoin de **systèmes EPUR** démarrant rapidement...



Transitoires

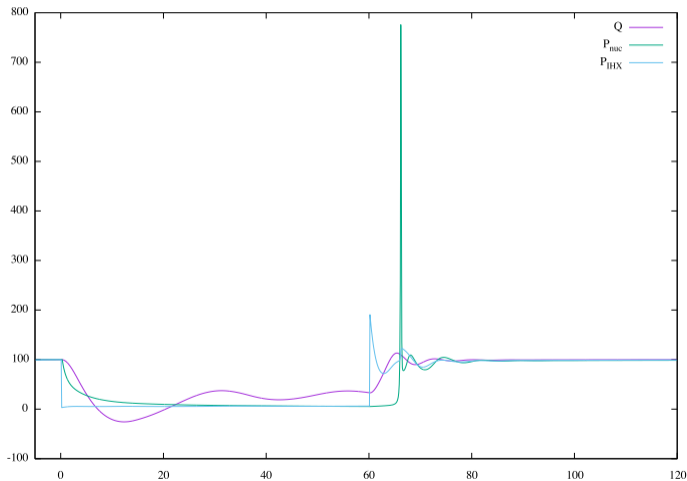


Avec refroidissement secondaire



Sans refroidissement secondaire

Transitoires : dans un réacteur en convection naturelle!





Quelques besoins en lien avec les **startups** :

- Pour les **métaux liquides** (Na, Pb) :
 - schémas numériques pour les écoulements **stratifiés** et **lents**!
 - algorithmes de **couplage** entre échelles
 - mais quand même des besoins en **multiphase** (lent ou **rapide**) :
ébullition Na, fuites dans un **échangeur** (1b vs 180b)
- Pour les **sels fondus** :
 - la même chose...
 - ... mais en couplage avec la **neutronique** et diverses équations de **transport**!
 - en transitoire lent ou **rapide**
 - et éventuellement avec **ondes de choc**!

