



Développement de méthodes de couplage aéro-thermo-mécanique pour la prévision d'instabilités dans les structures aérospatiales chaudes

Jean-Didier Garaud

Directeur : Yvon Maday

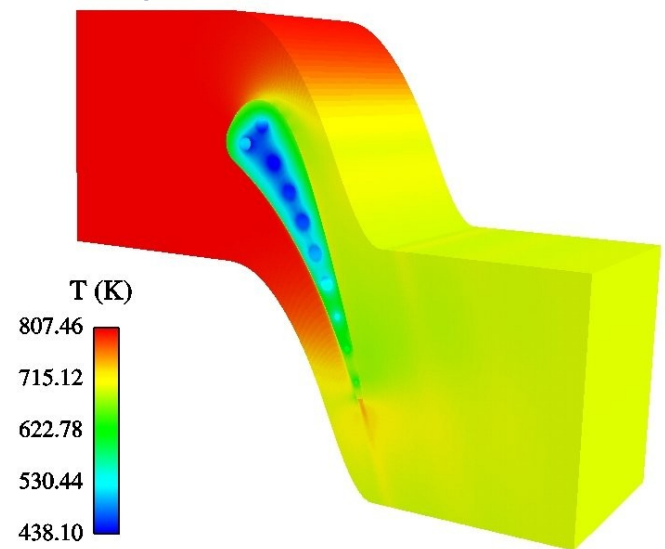
Encadrants : Arjen Roos, Frédéric Feyel

Marc Errera, François-Xavier Roux



retour sur innovation

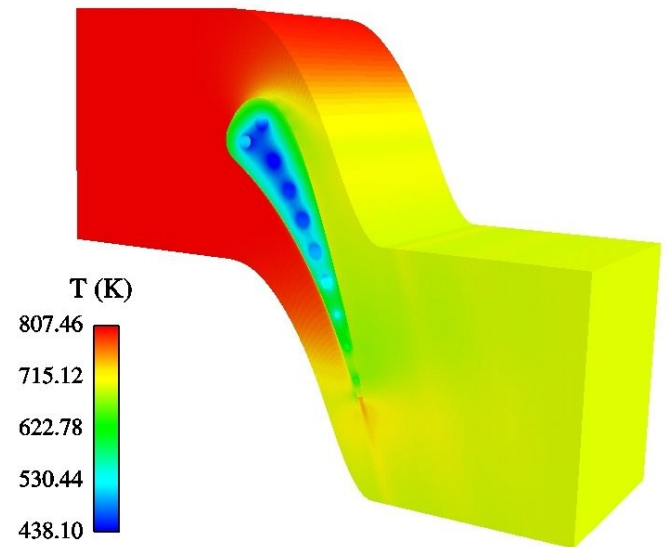
- **Projet de Recherche Fédérateur CoCoMAT**
 - Multi-disciplinaire
 - ONERA
 - DSNA (Simulation Numérique des écoulements et aéroacoustique)
 - DMSM (Matériaux et Structures Métalliques)
 - DTIM (Traitement Information et Modélisation)
 - ...
 - Intérêt industriel
 - CNES
 - SPS / SNPE
 - ...
- Suite de S. Chemin



Calcul thermique couplé du refroidissement d'une aube de turbine [S. Chemin]

3 objectifs

- Couplage mécanique
- Couplage thermique (unification)
- Couplage à 3 codes



Calcul thermique couplé du refroidissement d'une aube de turbine [S. Chemin]

Motivations

- Particularités en aérospatial :
 - Hautes températures
 - Mécanique non-linéaire
 - Écoulements réactifs
- Aubes de turbine
- Chambres de combustion
- Tuyère Vulcain 2

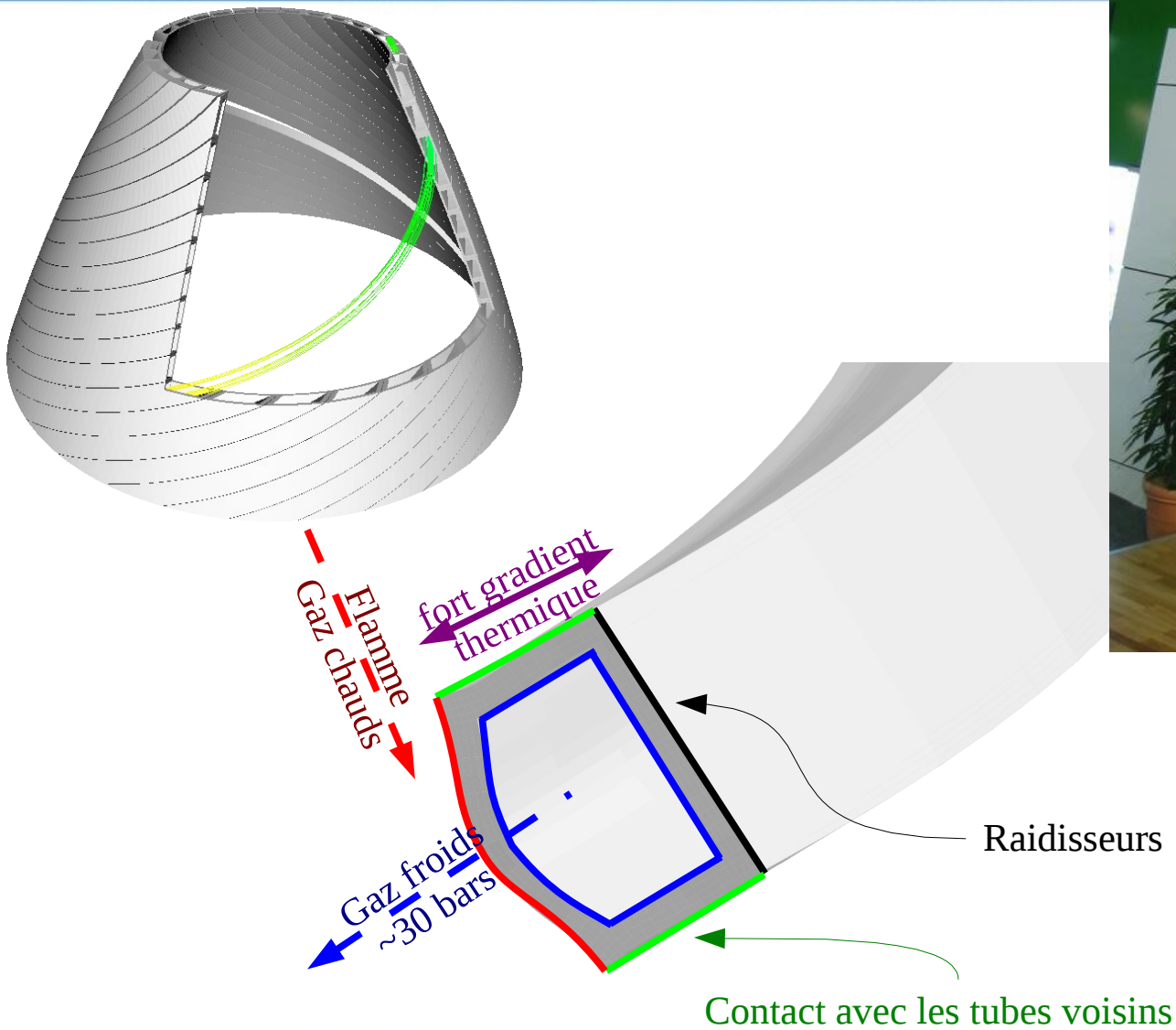


Credits: ESA-CNES-ARIANESPACE
Photo Service Optique CSG

mécanique

008

Motivations

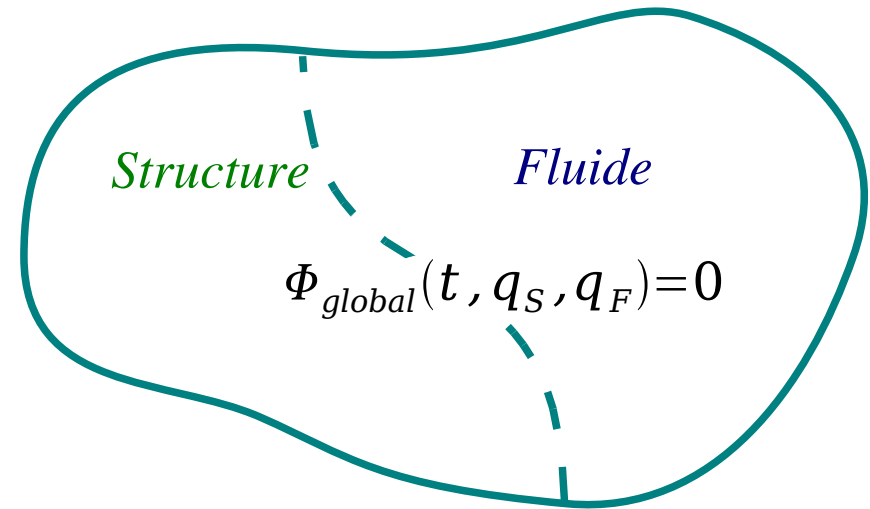


Plan

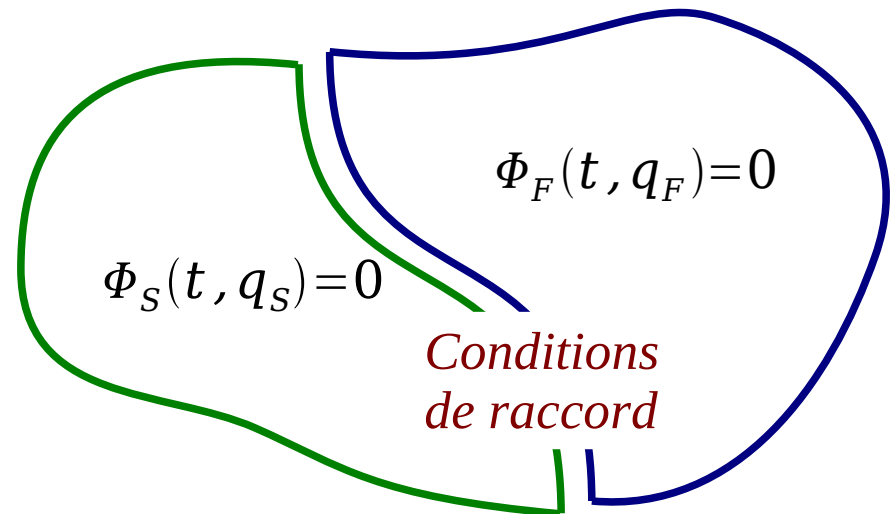
- Contexte et motivations
- Bibliographie : couplage partitionné
- Conception objet du couplage
- Couplages à 2 codes
 - Préparatifs
 - Aéro-mécanique
 - Aéro-thermique
 - Thermo-mécanique
- Couplage aéro-thermo-mécanique
- Conclusions et perspectives

Calcul multi-physique : 2 approches

- Monolithique



- Partitionnée



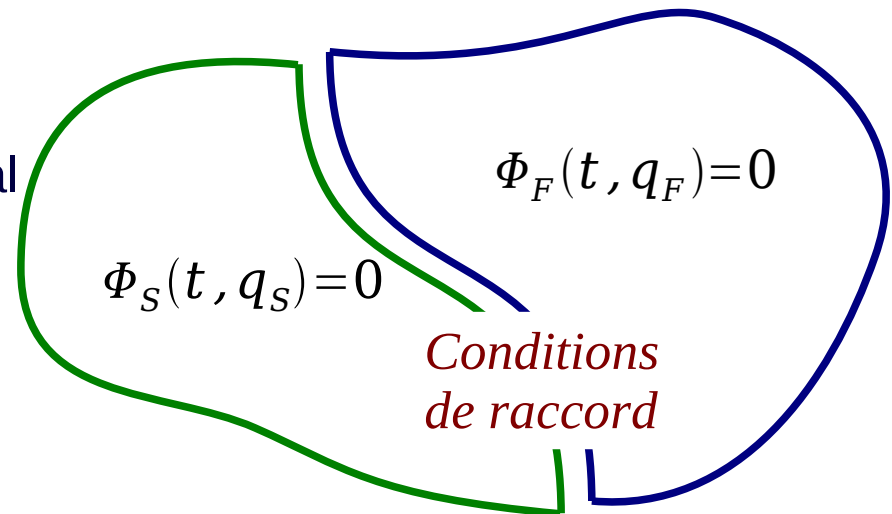
Couplage partitionné

- Avantages

- Réutilisation des codes existants, spécialisés
- Indépendance des discrétisations
- Remplacement possible d'un code par un autre
- Intervention locale dans les codes
- Évolutions des solveurs
- Codes « boîtes noires »

- Inconvénients

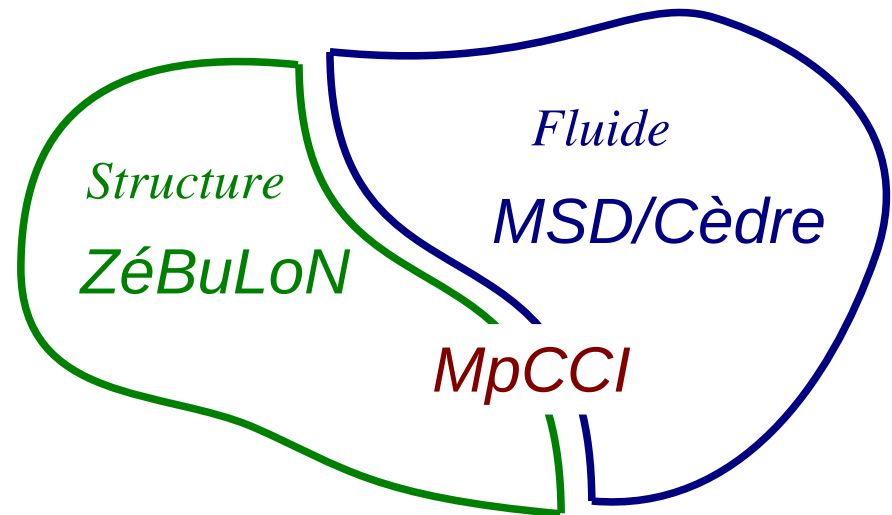
- Découplage temporel & spatial
- Baisse précision
- Instabilités



Les codes

- ZéBuLoN – Matériau & Structure
 - Éléments finis
 - Lagrangien
 - Maillage libre
 - Z-Mat : bibliothèque matériaux
 - Parallèle (FETI)
 - 600 000 lignes de C/C++
- MSD – Fluide
 - Volumes finis
 - Eulérien
 - Maillage structuré
 - Écoulement réactif, énergétique
 - Parallèle (DD)
 - 120 000 lignes de F90

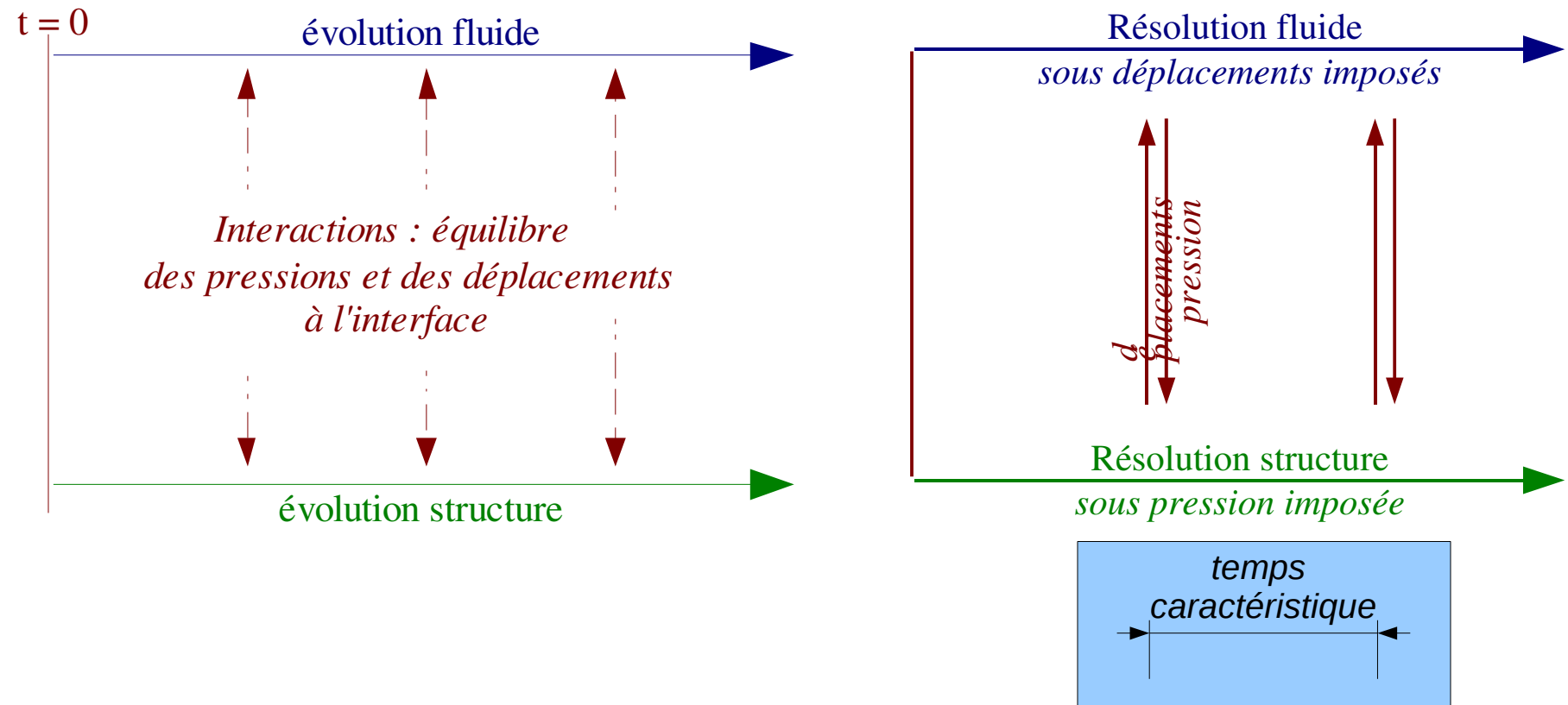
- ZéBuLoN - Thermique



Algorithmes de couplage : en temps

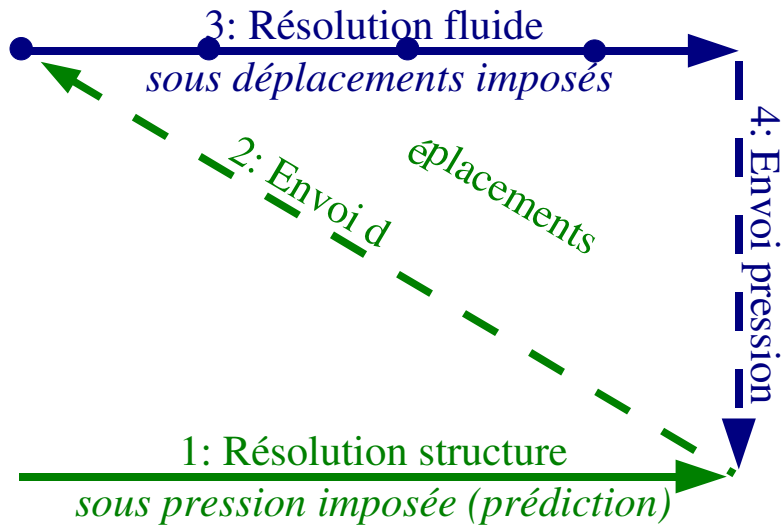
Modèle continu

Discrétisation en temps



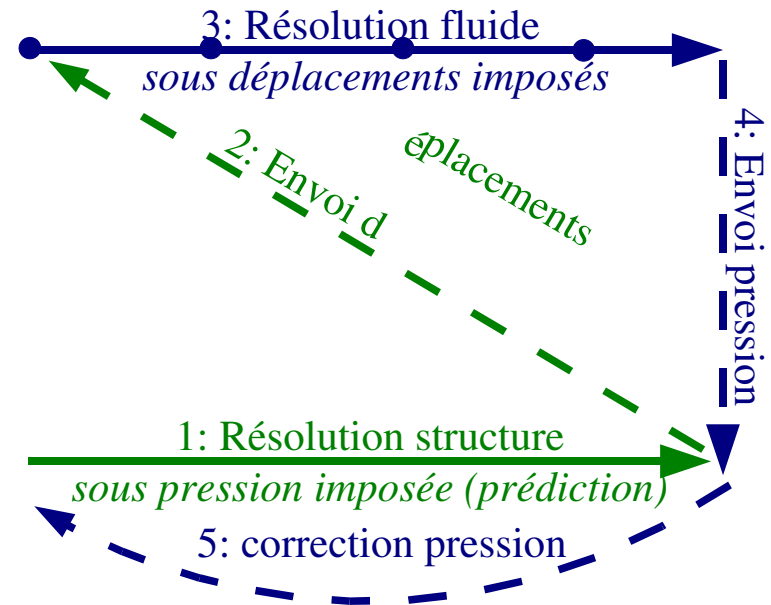
Algorithmes de couplage : en temps

Algorithme CSS avec sous-cyclage



- Simple
- Rapide
- Efficace en aéro-élasticité
- *Parfois instable / imprécis*

Algorithme CSS corrigé



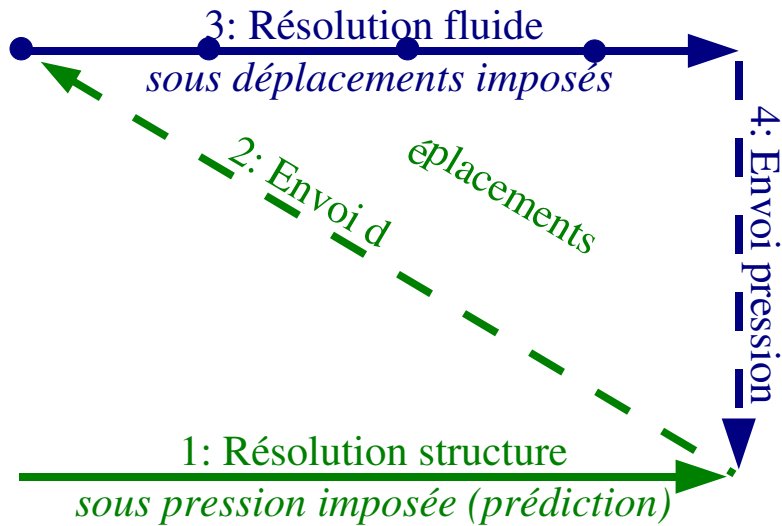
- Simple
- + stable
- + lourd ! (10x, 100x ?)
- *Parfois instable*

[Park, Felippa, DeRuntz 1977]

[Piperno, Farhat, Larrourou 1995]

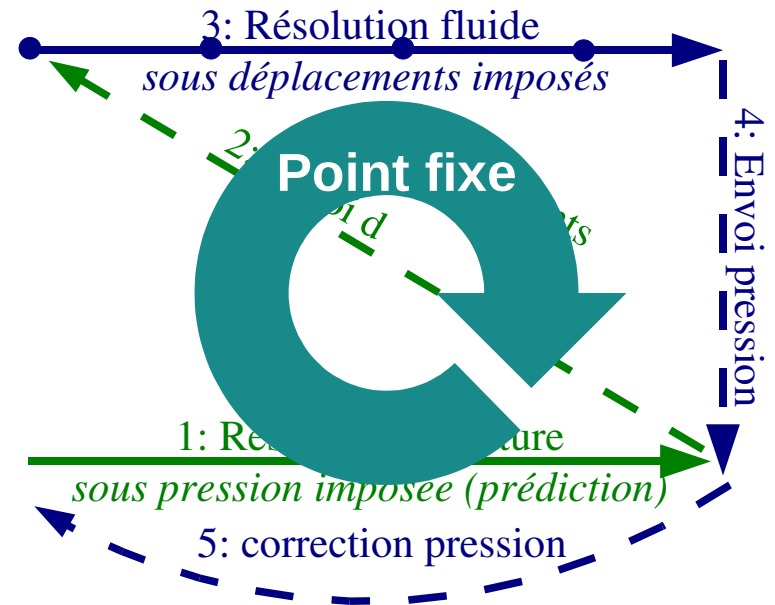
Algorithmes de couplage : en temps

Algorithme CSS avec sous-cyclage



- Simple
- Rapide
- Efficace en aéro-élasticité
- *Parfois instable / imprécis*

Algorithme CSS corrigé



- Simple
- + stable
- + lourd ! (10x, 100x ?)
- *Parfois instable*

[Park, Felippa, DeRuntz 1977]

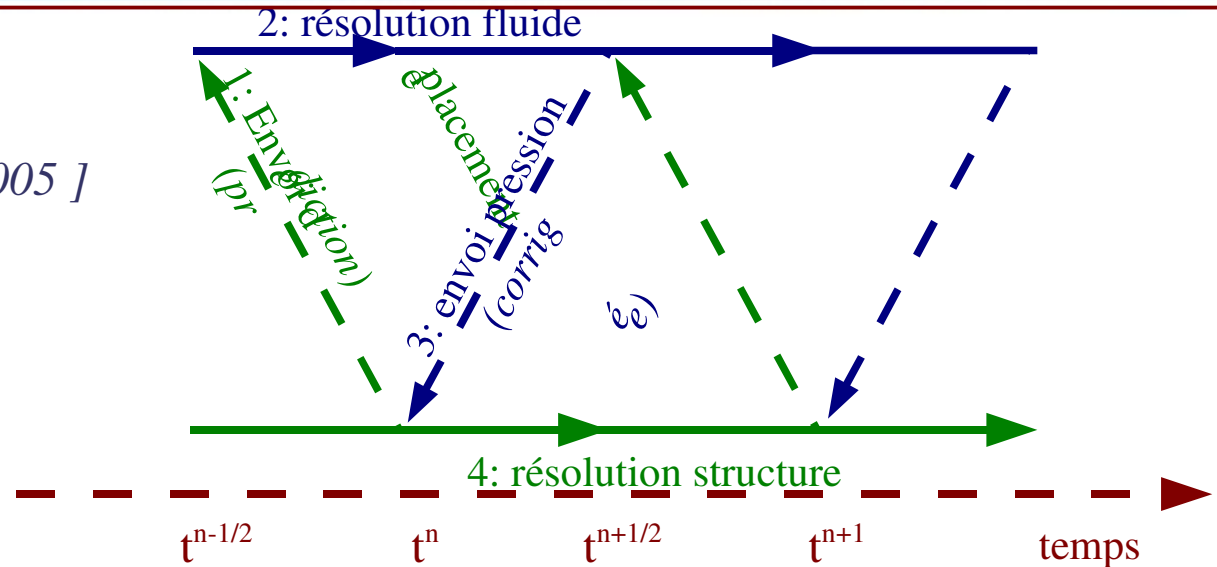
[Piperno, Farhat, Larrouturou 1995]

Algorithmes de couplage : en temps

2e ordre en temps

[Altmikus, Wagner 2002]

[Farhat, Zee, Geuzaine 2005]



Quasi-Newton

[Gerbeau, Vidrascu 2003]

Recherche du point fixe de :

$$P|_{\Gamma} \xrightarrow{\mathcal{R}_S} U \xrightarrow{\mathcal{T}_{S \rightarrow F}} U|_{\Gamma} \xrightarrow{\mathcal{R}_F} P \xrightarrow{\mathcal{T}_{F \rightarrow S}} P|_{\Gamma}$$

Chorin-Temam : méthode de projection

[Fernandez, Gerbeau, Grandmont 2005]

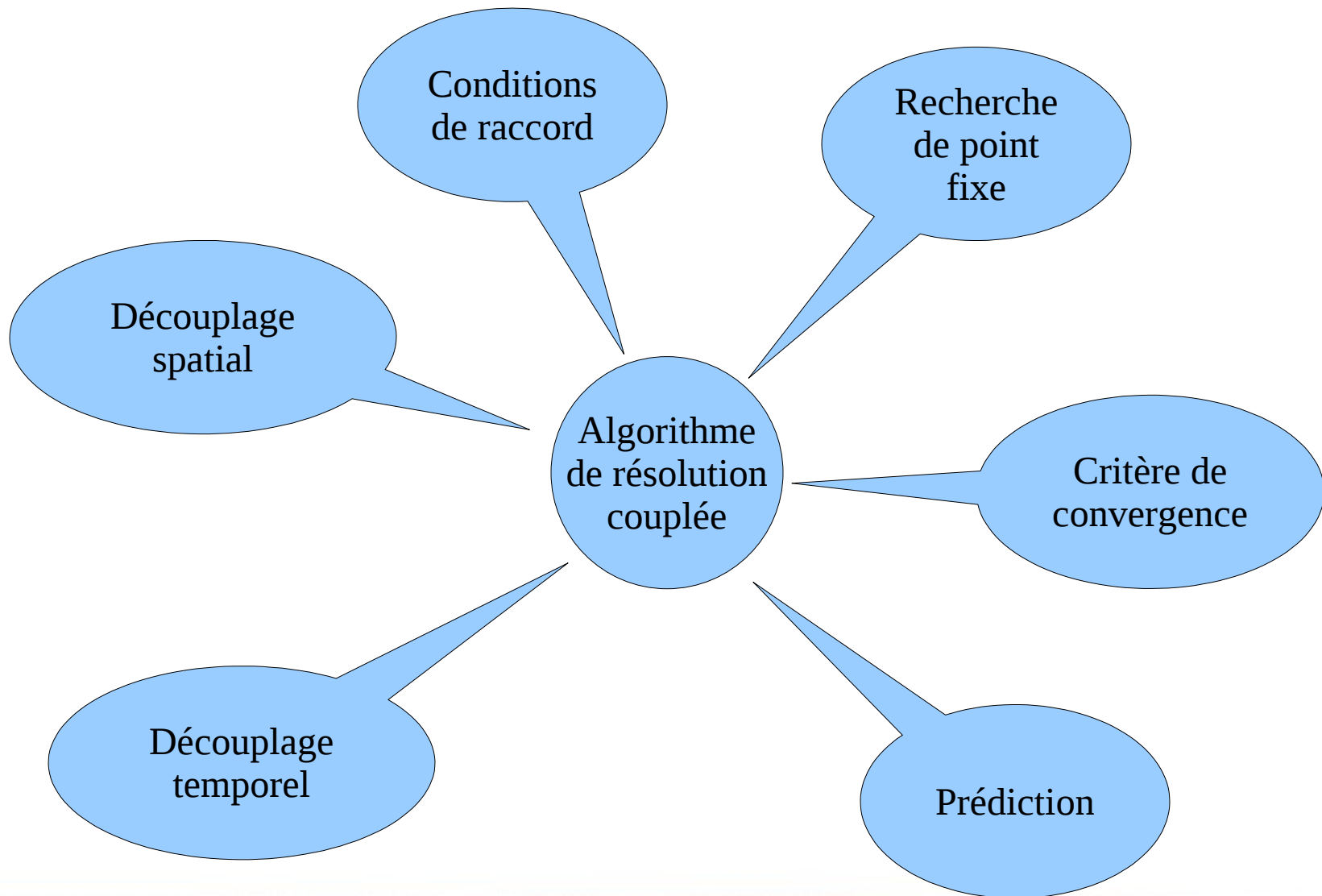
Algorithmes de couplage : en espace

- Conditions de raccord :
 - En pression ou flux de chaleur (Neumann)
 - En déplacement ou température (Dirichlet)
 - Mixte (Fourier)
- Méthodes de transfert :
 - Surfaces non-coïncidentes
 - Interpolation
 - Joints
- Lien avec les méthodes de décomposition de domaine

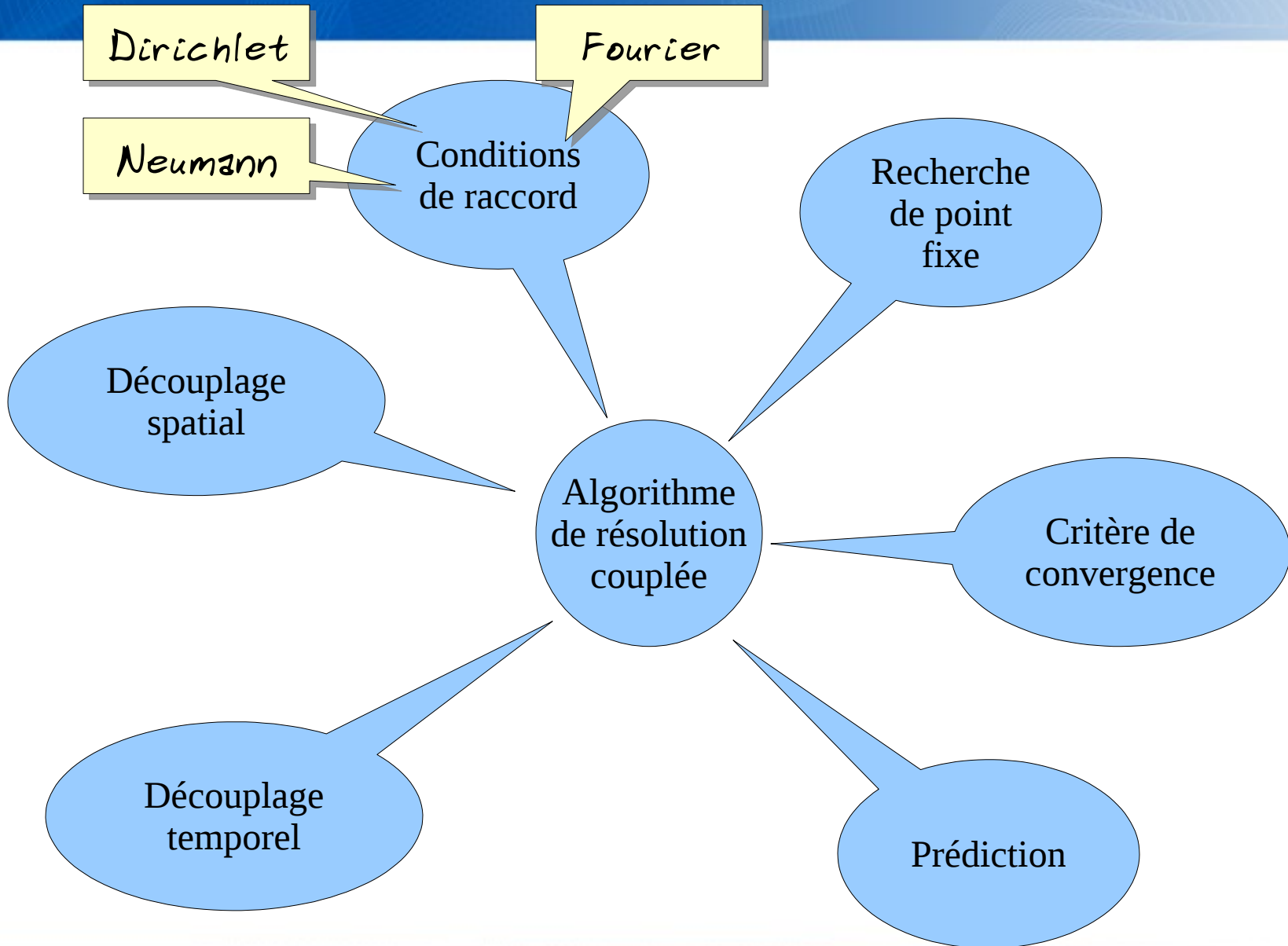
Plan

- Motivations
- Bibliographie : couplage partitionné
- **Conception objet du couplage**
- Couplages à 2 codes
 - Préparatifs
 - Aéro-mécanique
 - Aéro-thermique
 - Thermo-mécanique
- Couplage aéro-thermo-mécanique
- Conclusions et perspectives

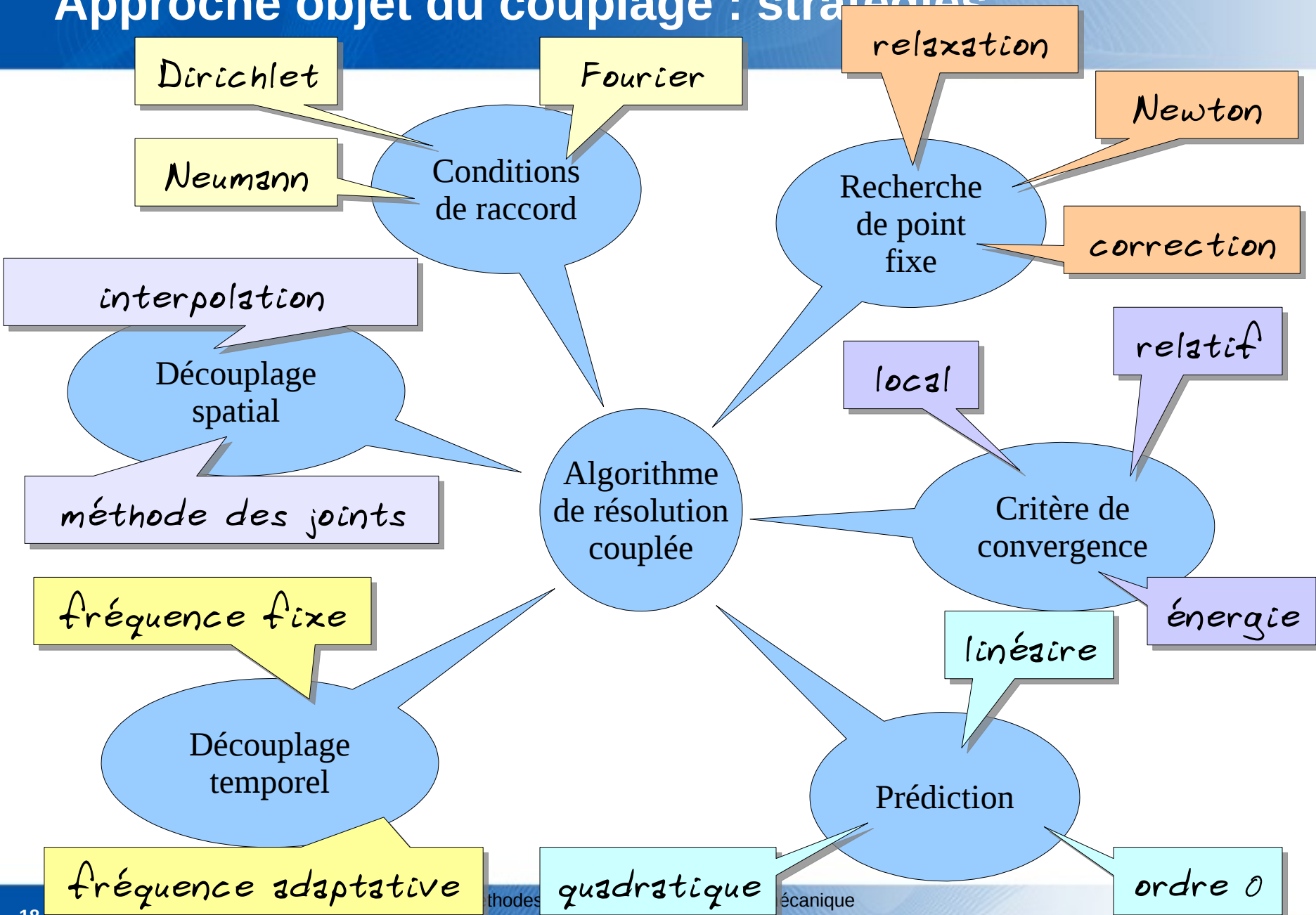
Approche objet du couplage : cahier des charges



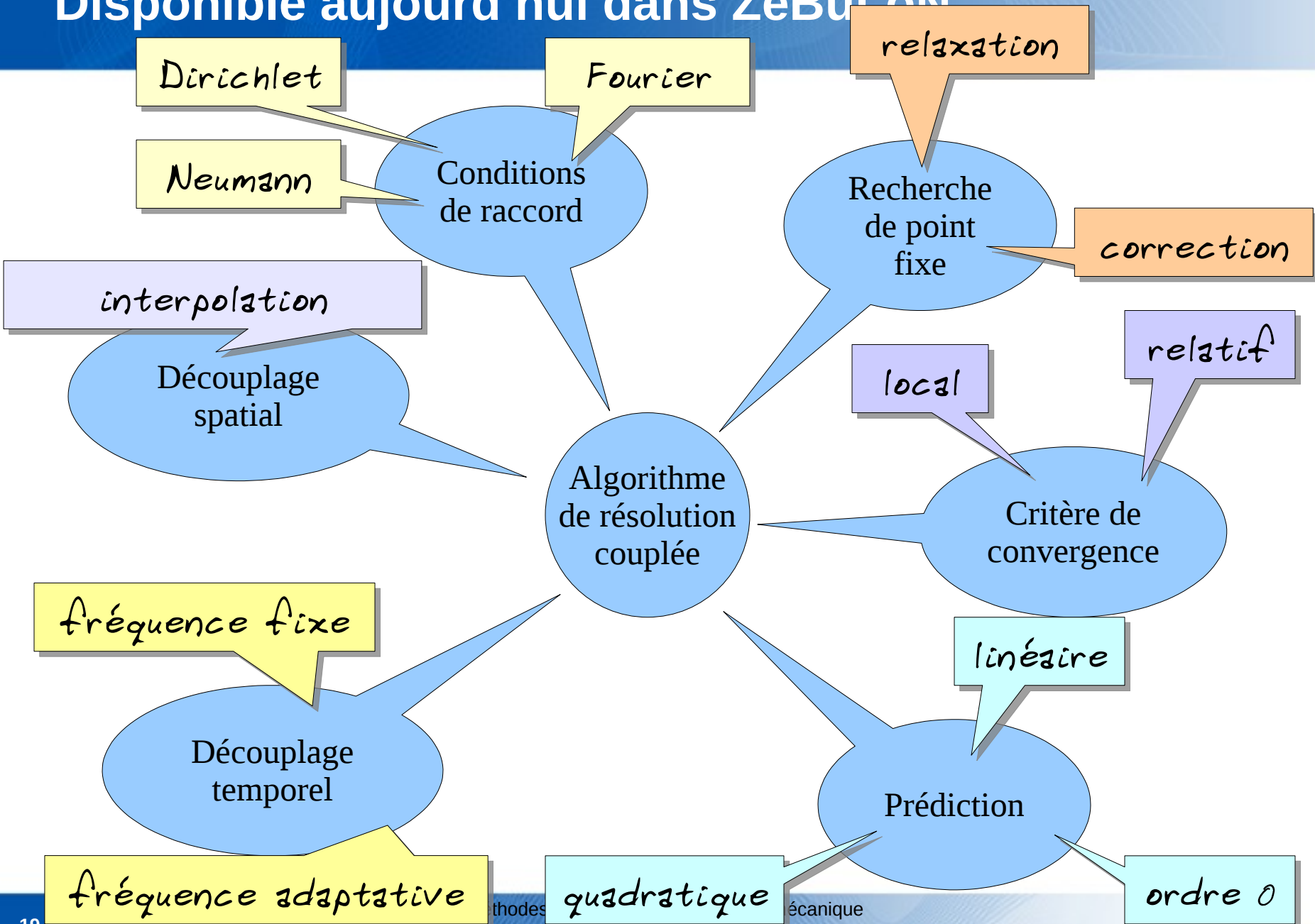
Approche objet du couplage : stratégies



Approche objet du couplage : stratégies



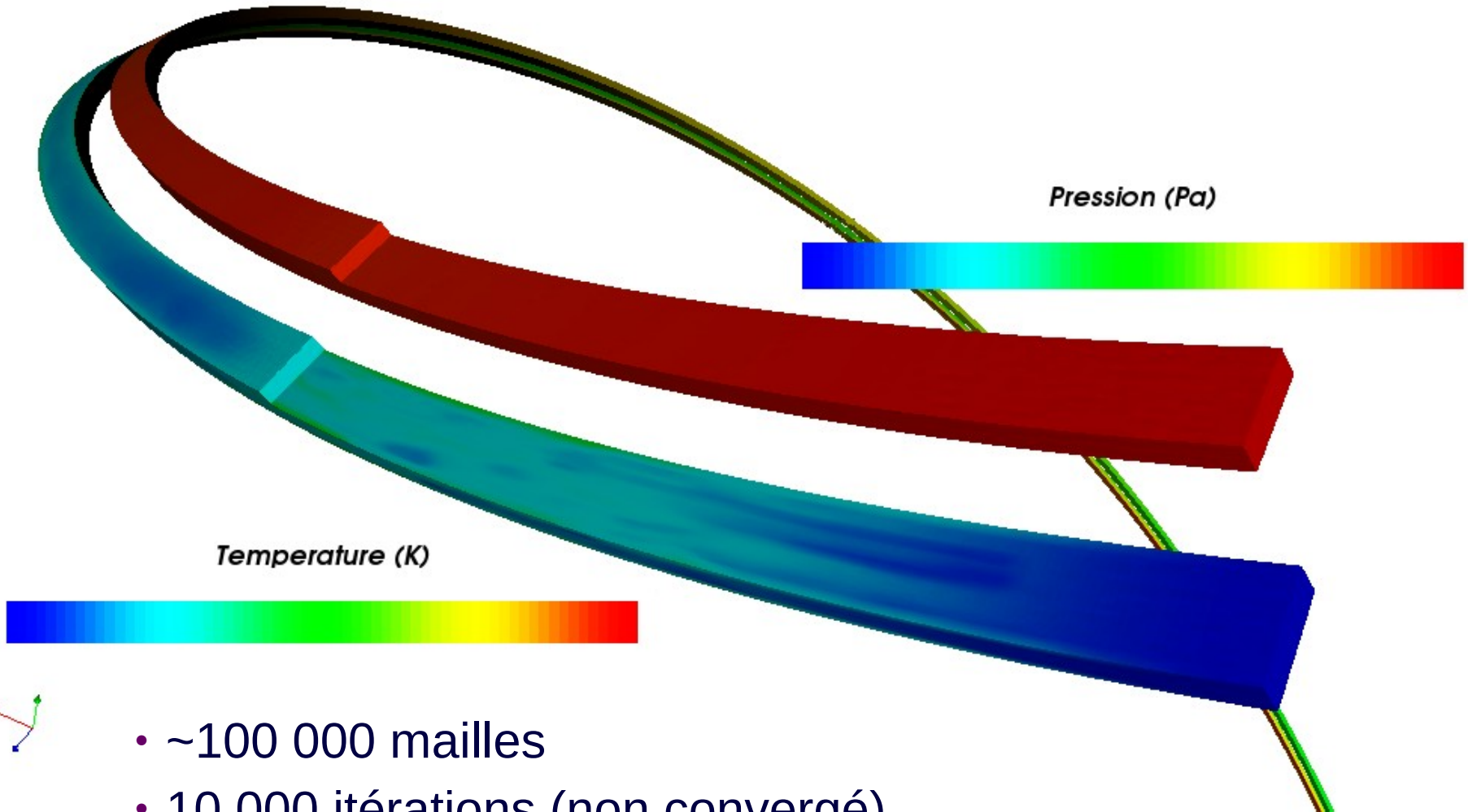
Disponible aujourd'hui dans Zébulon



Plan

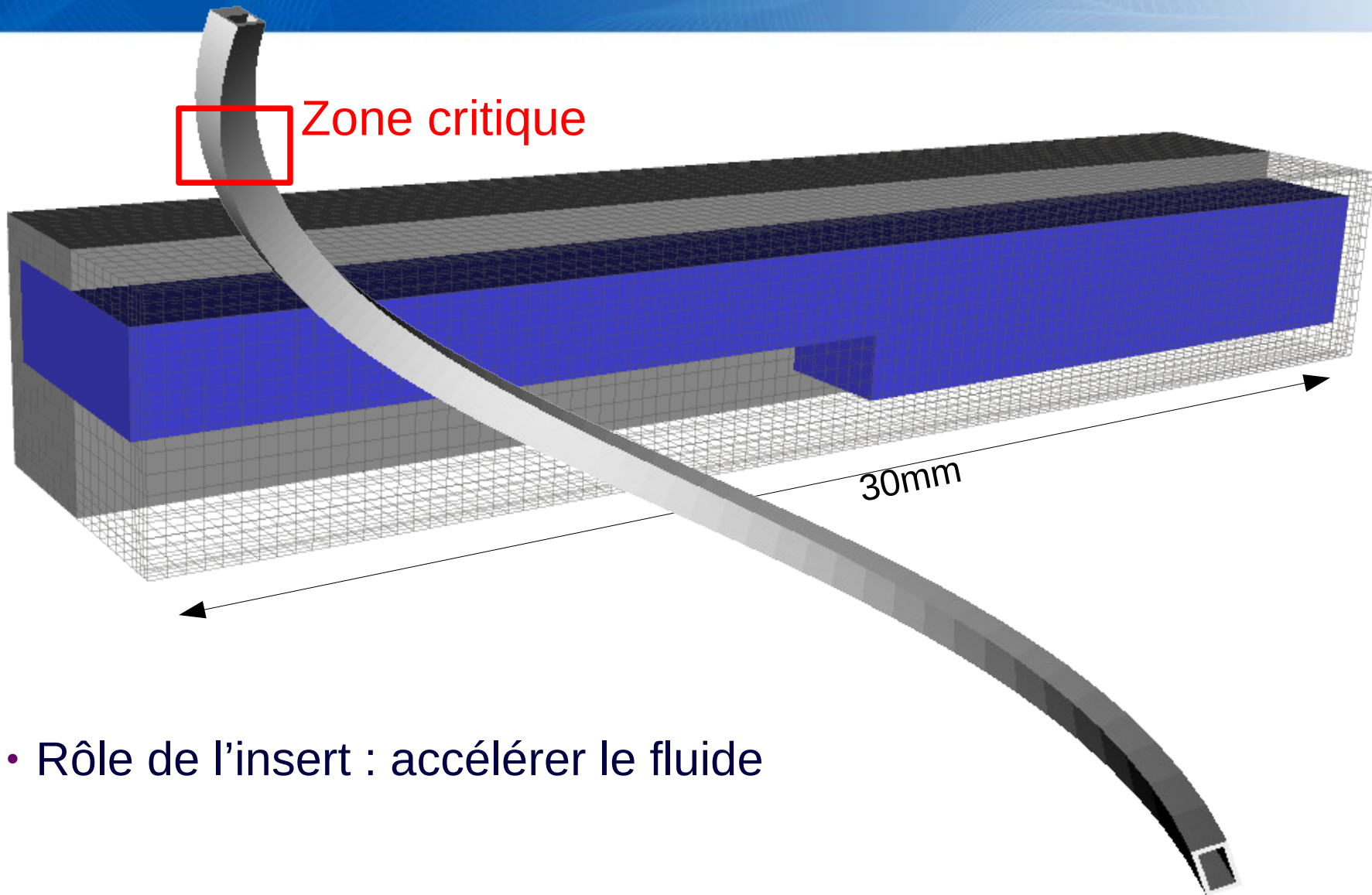
- Motivations
- Bibliographie : couplage partitionné
- Conception objet du couplage
- **Couplages à 2 codes**
 - Préparatifs
 - Aéro-mécanique
 - Aéro-thermique
 - Thermo-mécanique
- Couplage aéro-thermo-mécanique
- Conclusions et perspectives

Calcul complet, sur 2m de tube



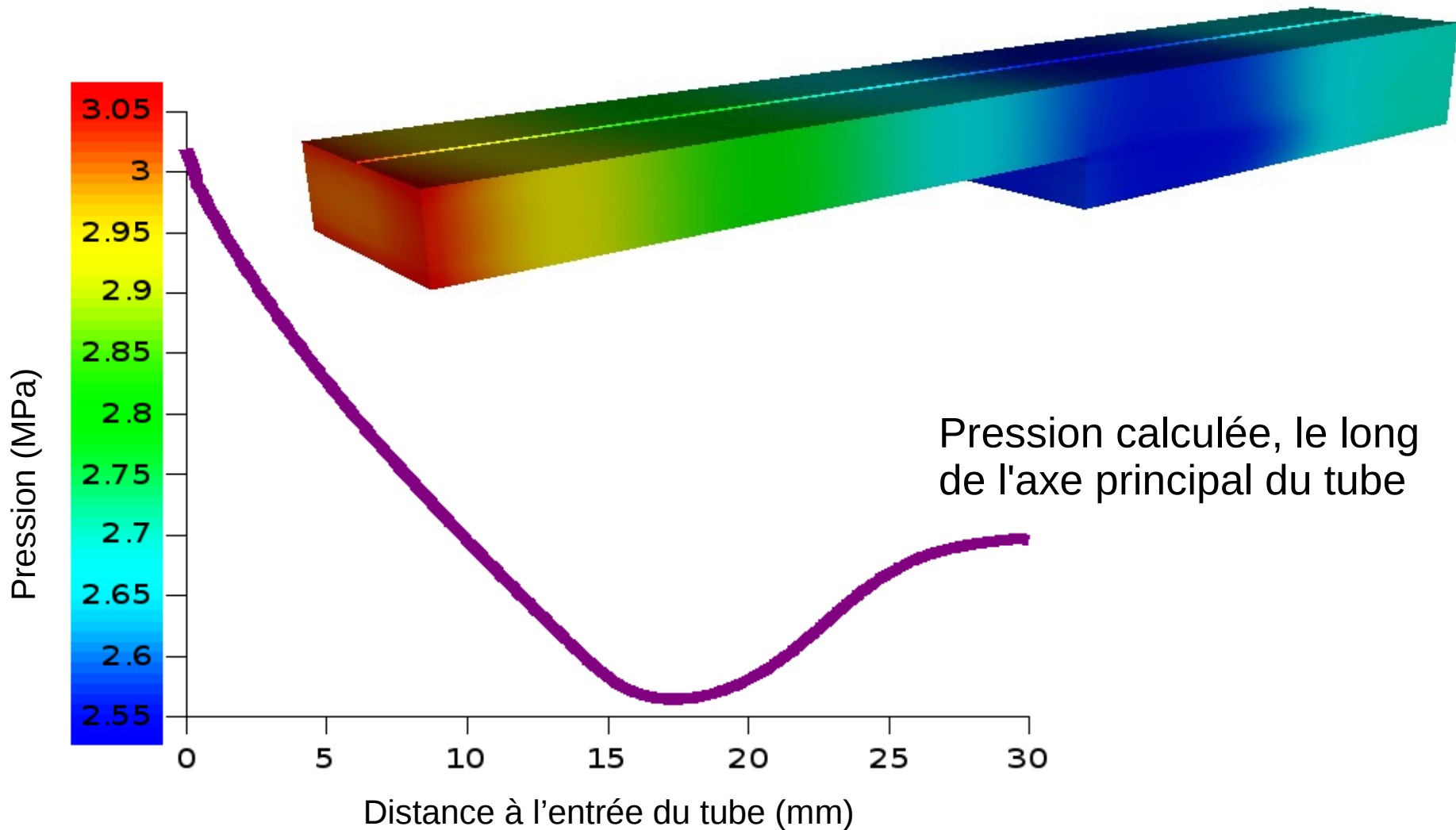
- ~100 000 mailles
- 10 000 itérations (non convergé)
- 1 mois de calcul (PC bureau)

Modèle simplifié



- Rôle de l'insert : accélérer le fluide

Résultat fluide découplé



Calcul solide découplé

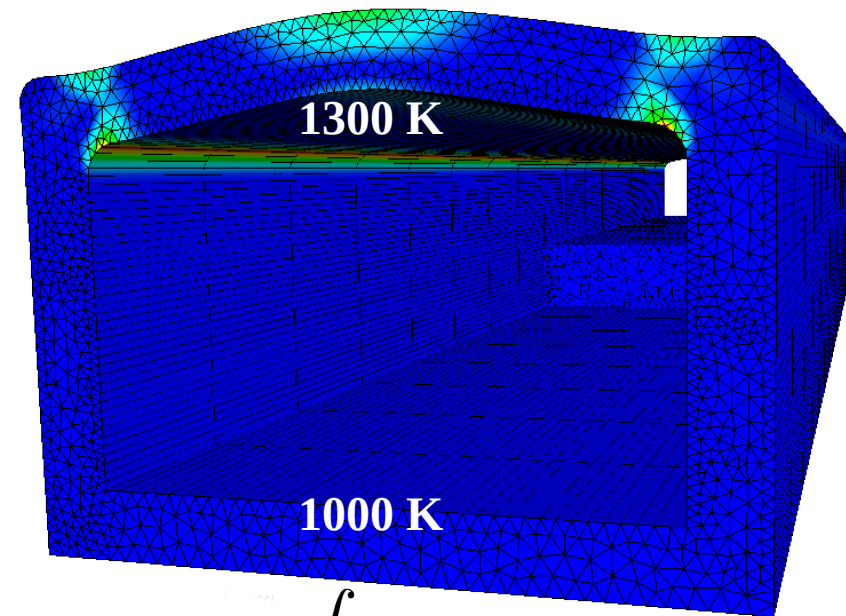
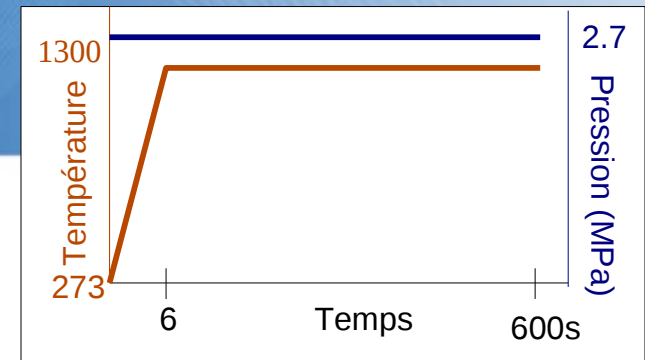
- Loi de comportement élasto-visco-plastique
- Écrouissages isotropes et cinématiques multiples
- Grandes déformations (corotationnel)
- Paramètres dépendant fortement de la température

$$\tilde{\varepsilon}^{tot} = \tilde{\varepsilon}^e + \tilde{\varepsilon}^{th} + \tilde{\varepsilon}^p$$
$$\|\dot{\tilde{\varepsilon}}^p\| = \left\langle \frac{f}{K} \right\rangle^n = \left\langle \frac{\|\tilde{\sigma} - \tilde{\mathbf{X}}\| - R - k}{K} \right\rangle^n$$

[A. Roos, JL. Chaboche, *Vulcain II cooling tubes – progress report 1. Onera Tech. Rep. 2004*]

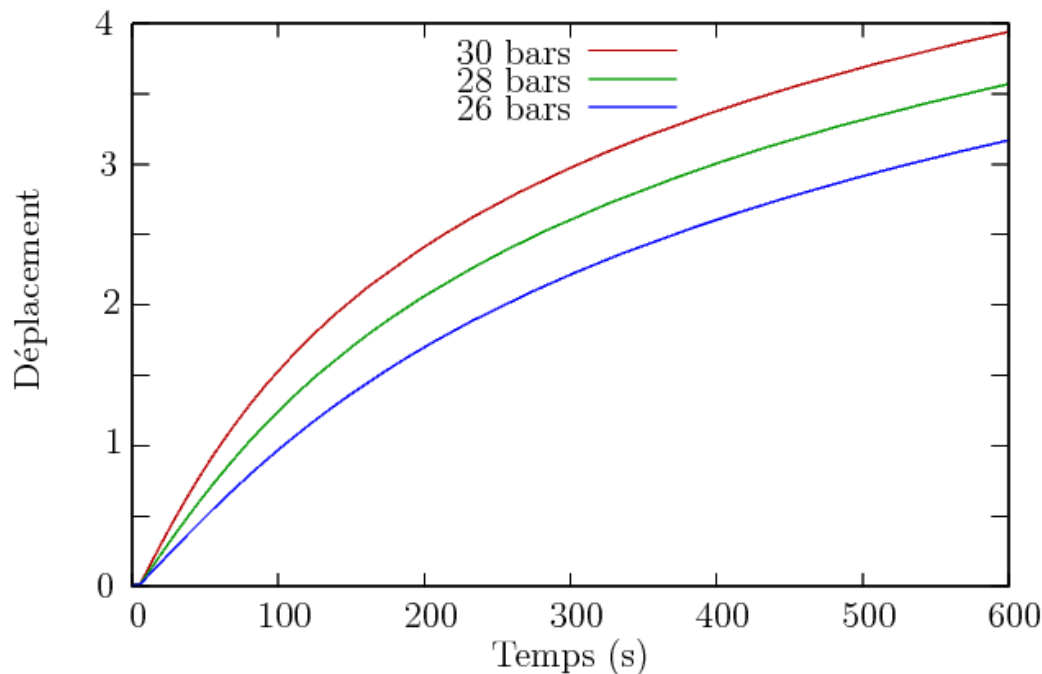
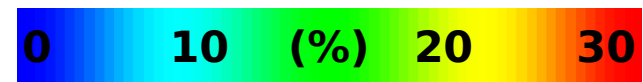
Résultat solide découplé

- Conditions au bord :
 - Pression uniforme & constante : 2.7 MPa
 - Gradient de température ($\Delta=300\text{K}$)
- Déformations principalement dues au fluage



$$\int ||\dot{\tilde{\varepsilon}}^p|| dt$$

déformation plastique cumulée



Plan

- Motivations
- Bibliographie : couplage partitionné
- Conception objet du couplage
- **Couplages à 2 codes**
 - Préparatifs
 - Aéro-mécanique
 - Aéro-thermique
 - Thermo-mécanique
- Couplage aéro-thermo-mécanique
- Conclusions et perspectives

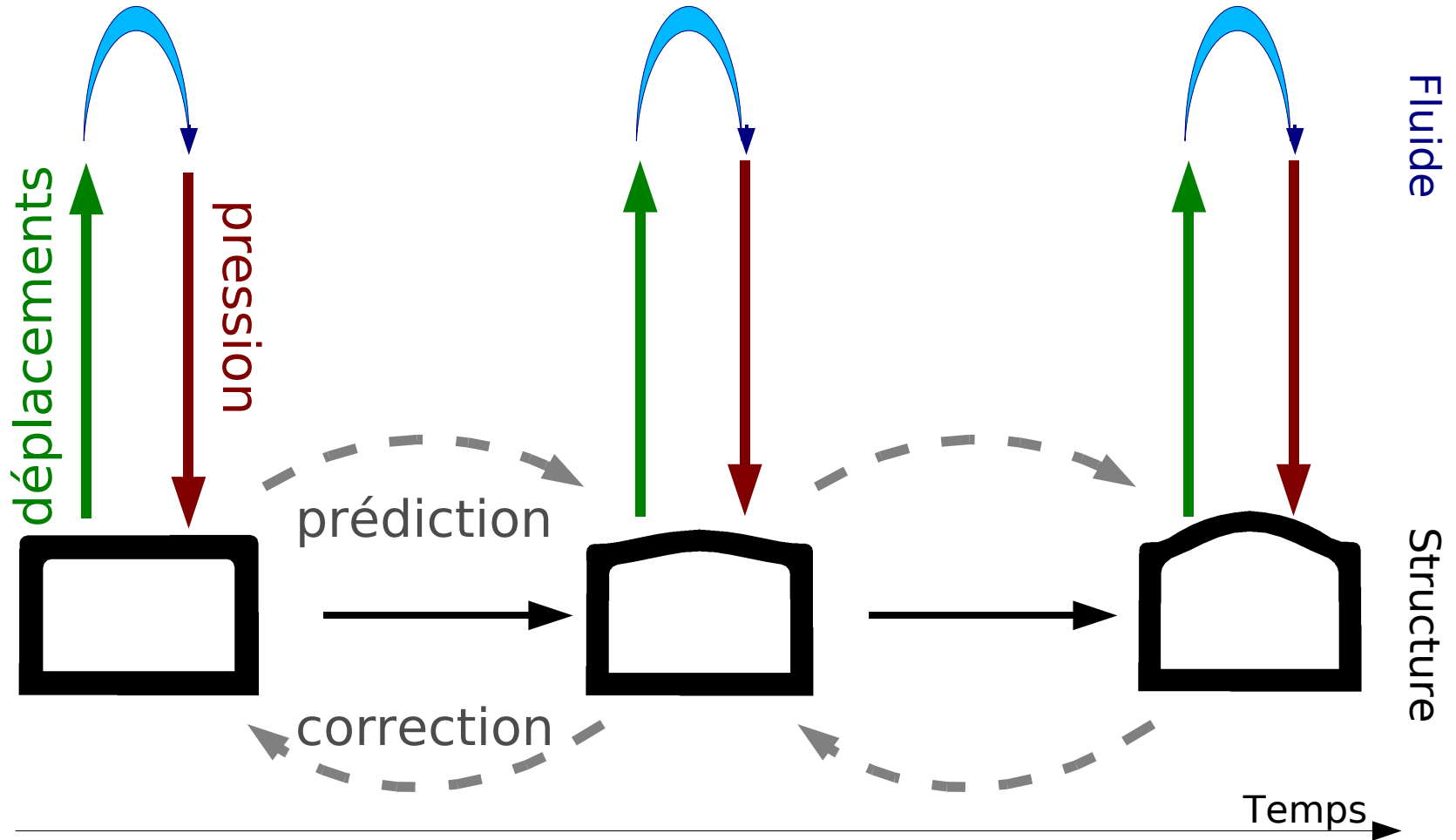
- Situation « agréable » :
 - Solide peu sensible aux variations rapides de pression
 - Déformations lentes
 - Variations faibles du champ de pression



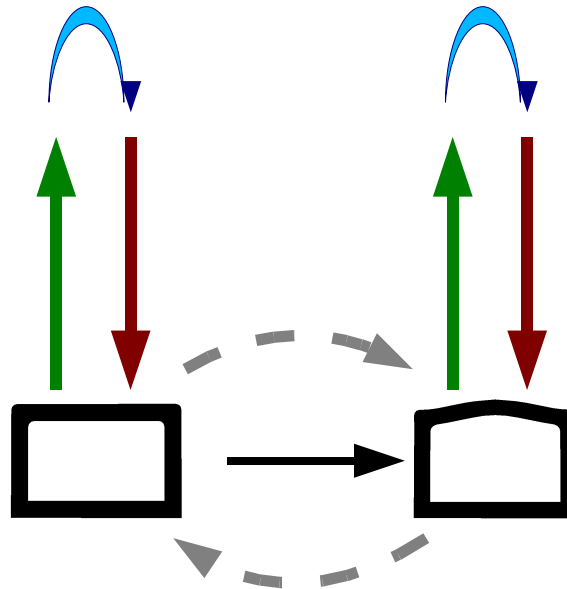
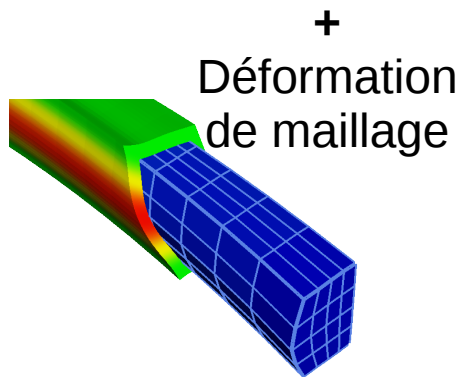
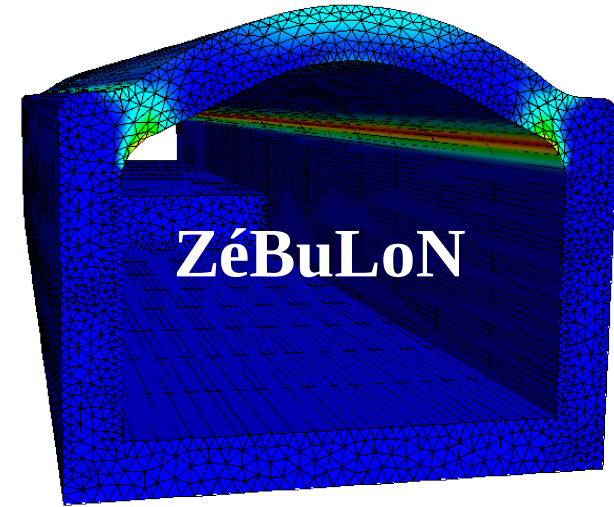
hypothèse de
fluide stationnaire

Couplage aéro-mécanique

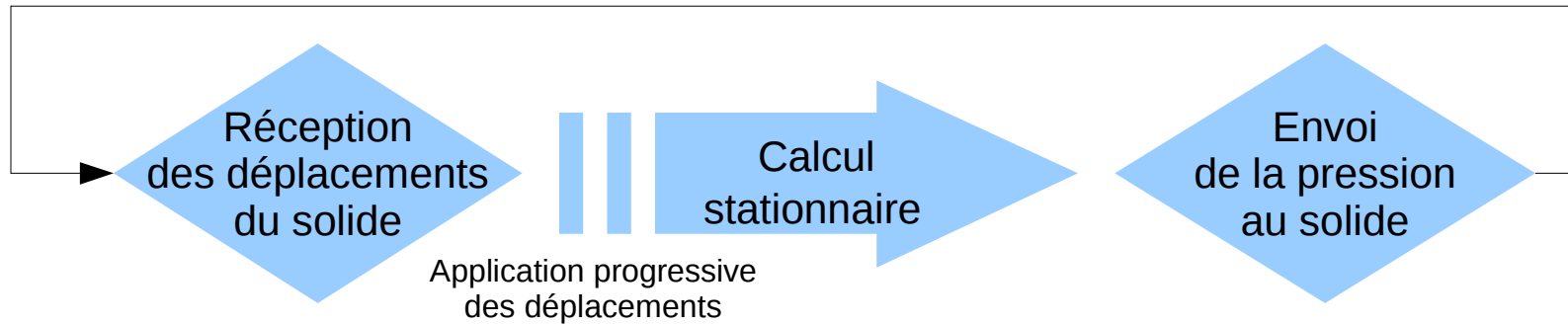
Résolution fluide
stationnaire



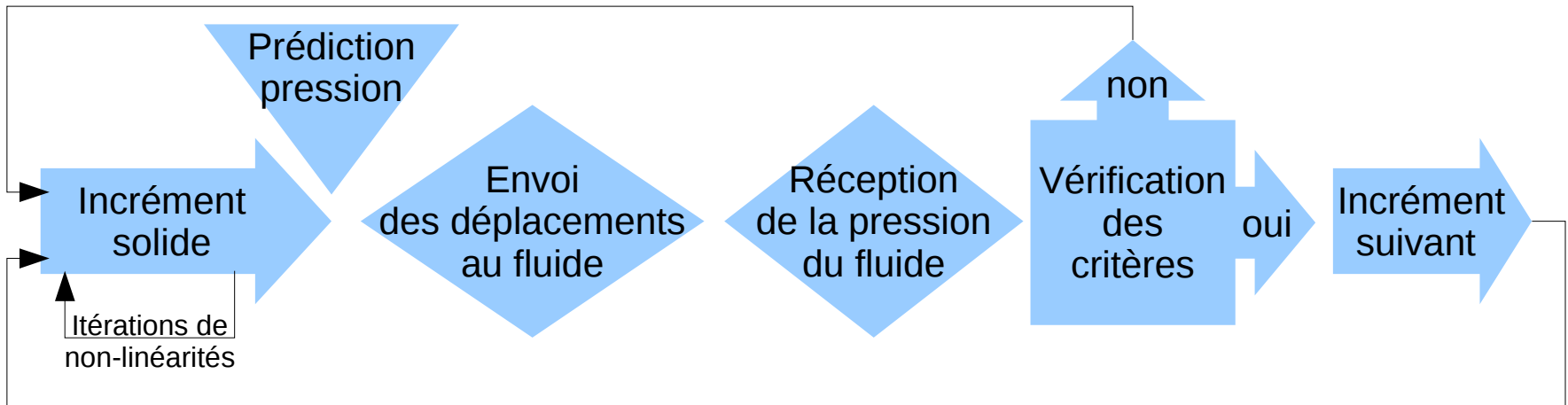
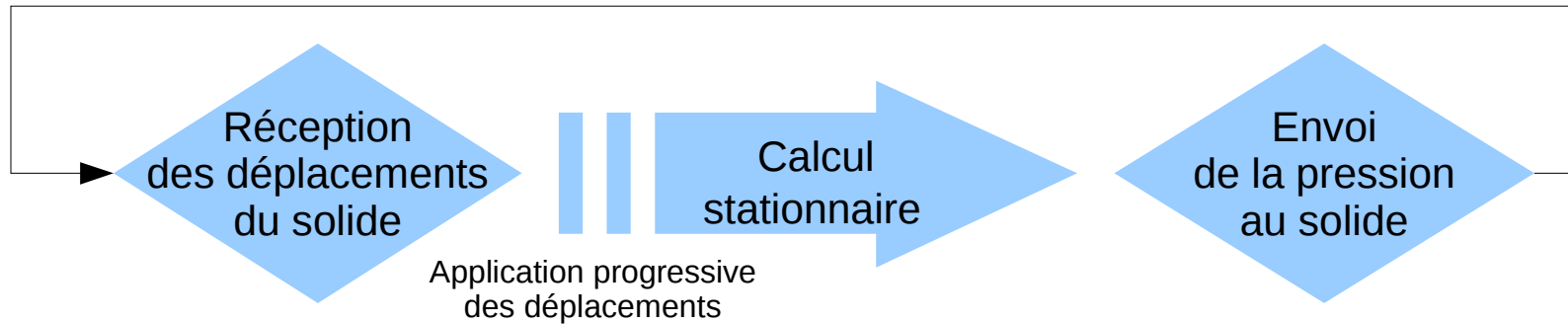
Couplage aéro-mécanique



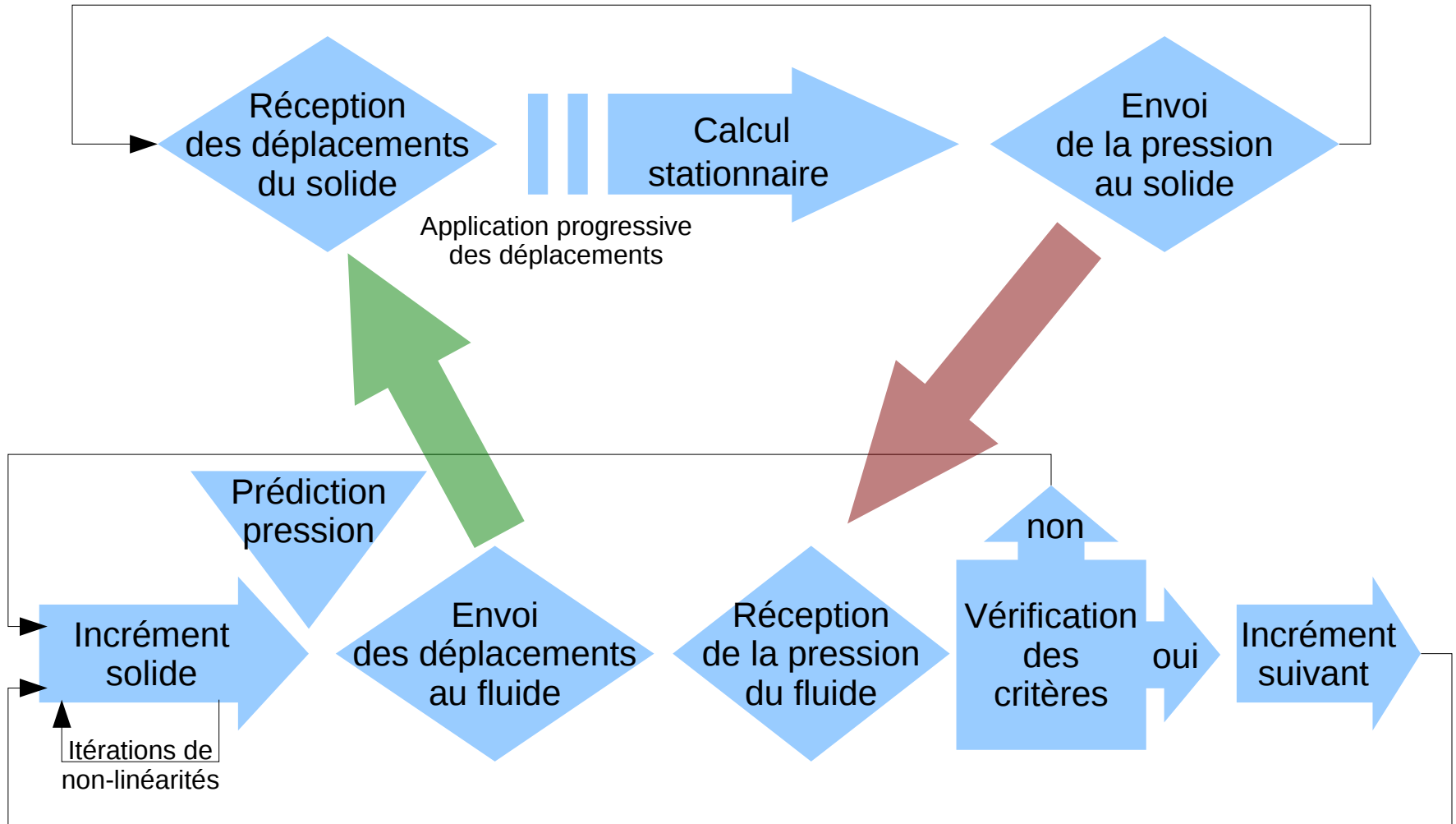
Implémentations de l'algorithme



Implémentations de l'algorithme



Implémentations de l'algorithme



Couplage aéro-mécanique

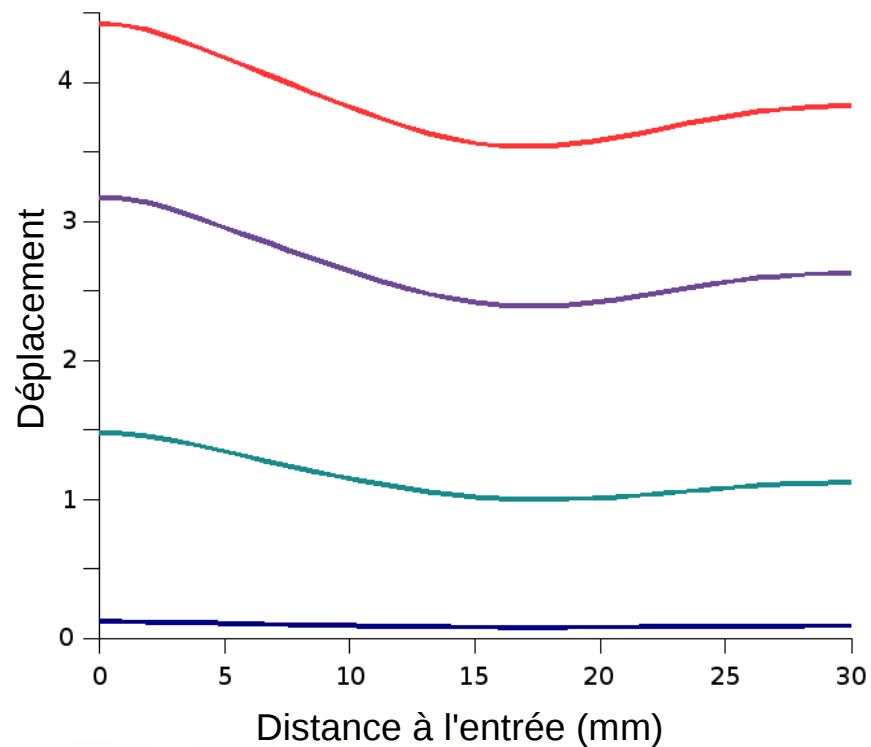
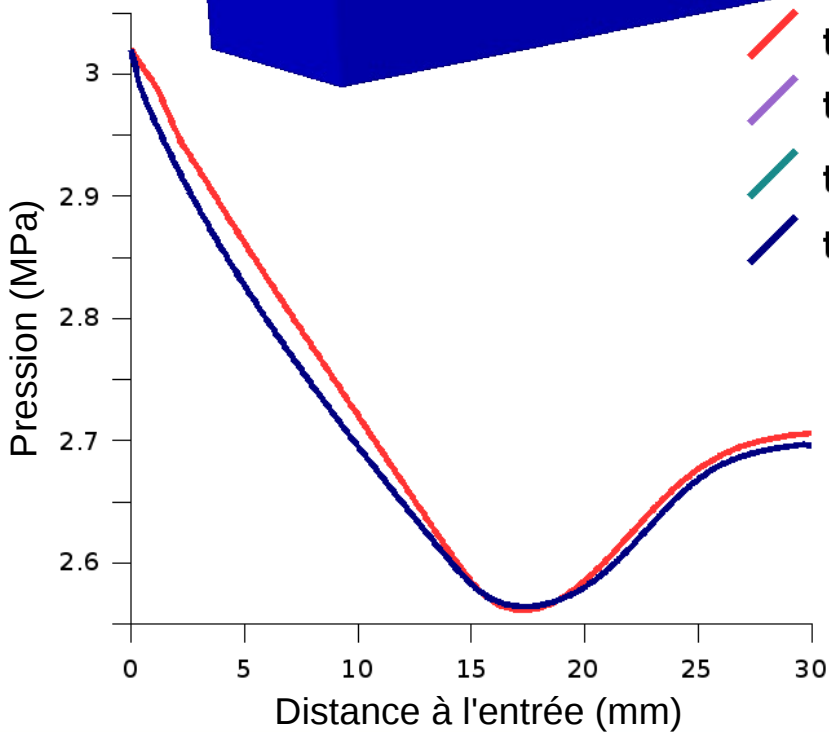
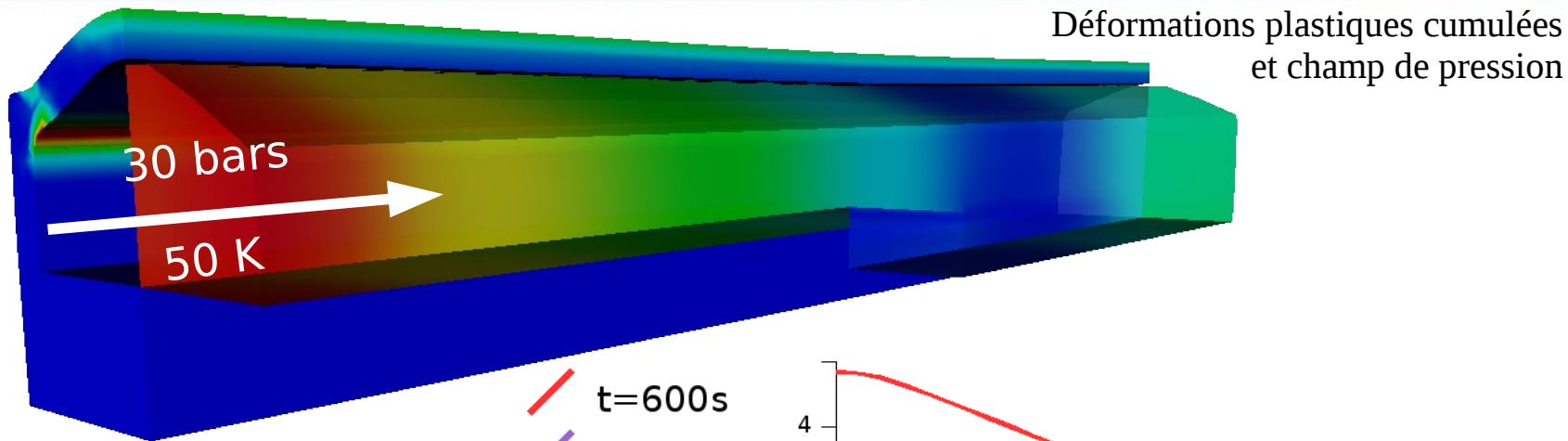
- Prédiction du 1^{er} ordre pour la pression P
- Correction si $|P^{(\text{prédite})} - P^{(\text{calculée})}| > 0,01 \text{ MPa}$

Couplage aéro-mécanique

- Prédiction du 1^{er} ordre pour la pression P
- Correction si $|P^{(\text{prédite})} - P^{(\text{calculée})}| > 0,01 \text{ MPa}$

- Peu de corrections nécessaires
- Algorithme en série bien adapté
- 85 couplages pour 600s (=nb de pas de temps solide)

Résultats couplés aéro-mécaniques

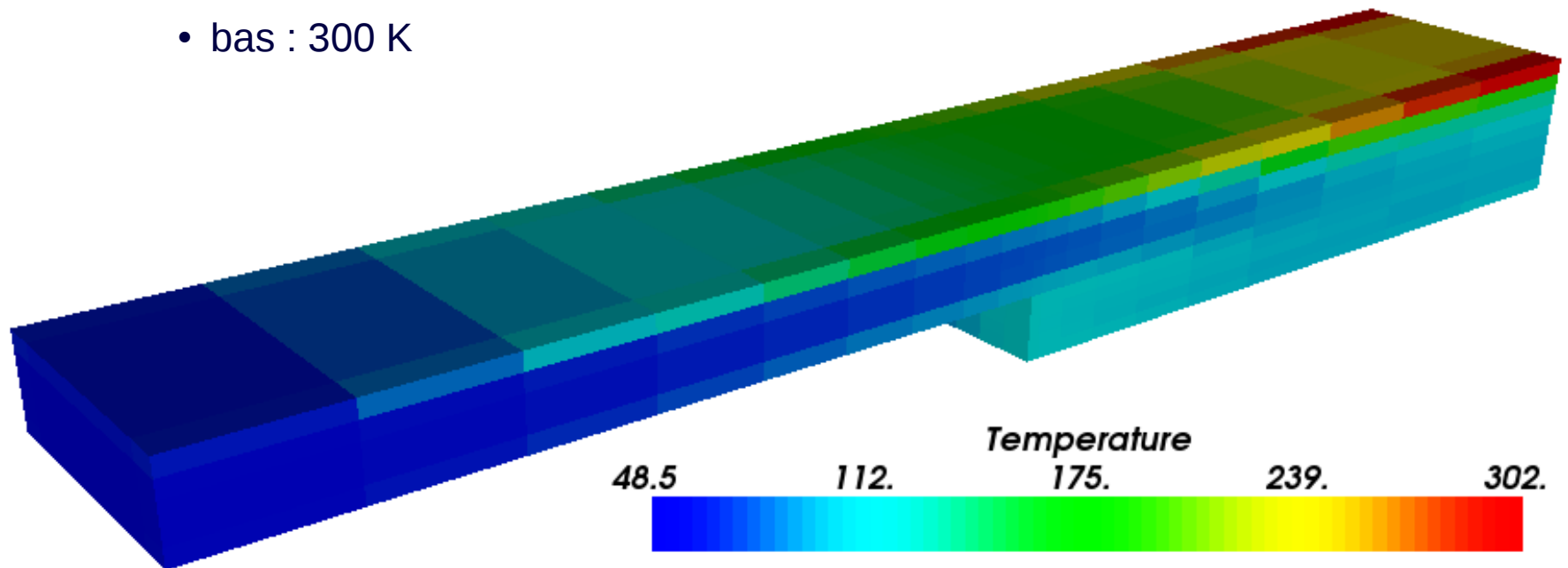


Plan

- Motivations
- Bibliographie : couplage partitionné
- Conception objet du couplage
- Couplages à 2 codes
 - Préparatifs
 - Aéro-mécanique
 - **Aéro-thermique**
 - Thermo-mécanique
- Couplage aéro-thermo-mécanique
- Conclusions et perspectives

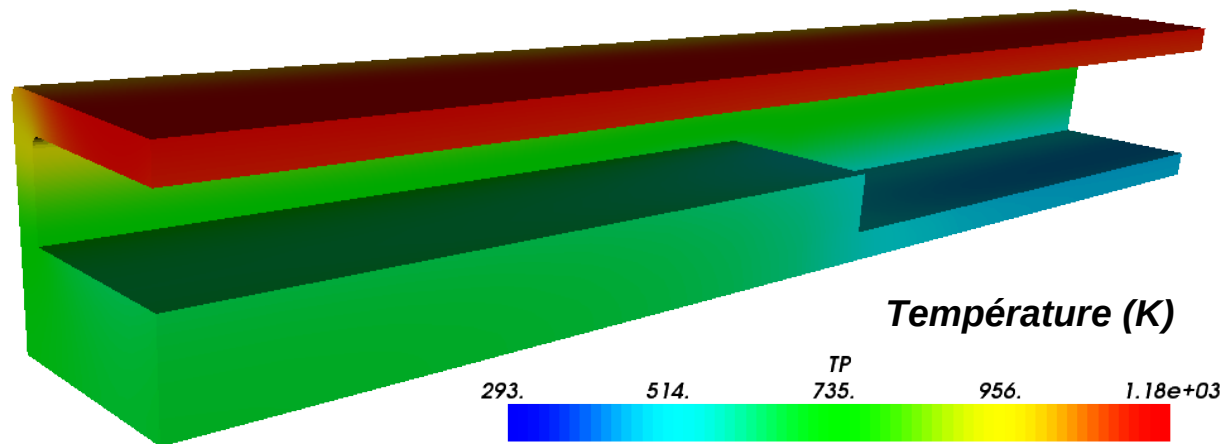
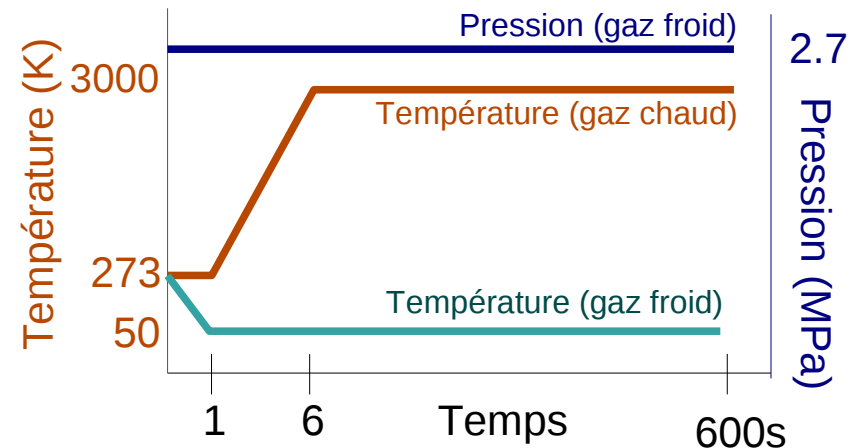
Thermique découplée (fluide)

- Conditions au bord :
 - Entrée : 50 K, 30 bars
 - Sortie : 27 bars
 - Parois :
 - haut : 1300 K
 - latérales : 800 K
 - bas : 300 K

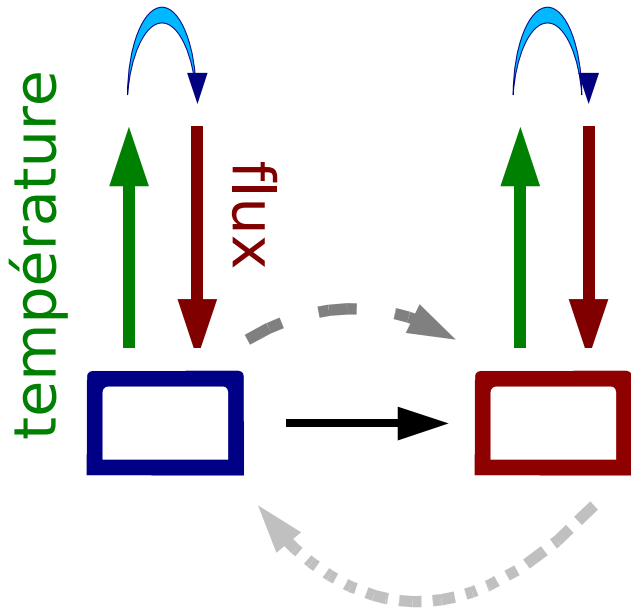


Thermique découplée (solide)

- Conditions aux limites :
 - paroi chaude : Fourier
($T_{\text{ext}} = 3000 \text{ K}$, $h = 1000$)
 - interface fluide : Fourier
($T_{\text{ext}} = 50 \text{ K}$, $h = 1000$)
 - flux nul sur les autres faces



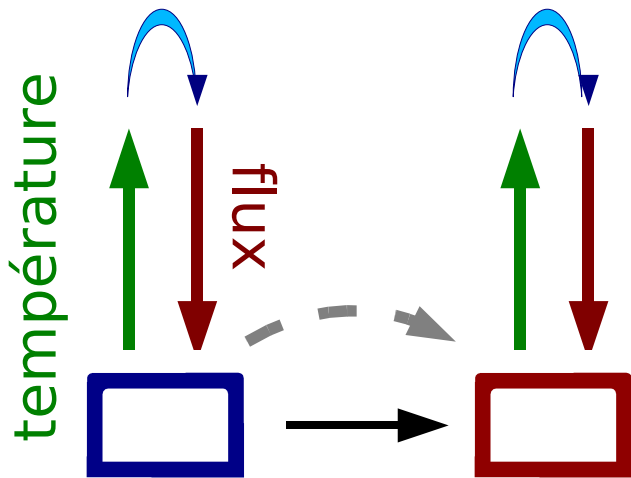
Couplage aéro-thermique : Dirichlet-Neumann sans correction



Fréquence de couplage théorique :

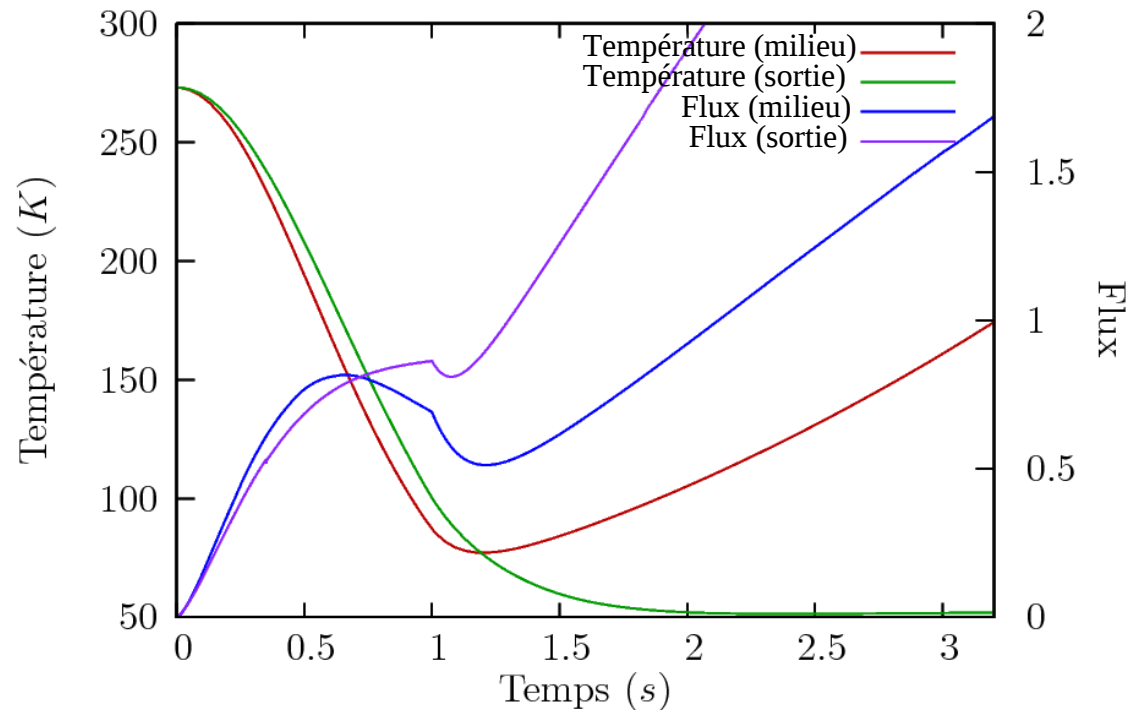
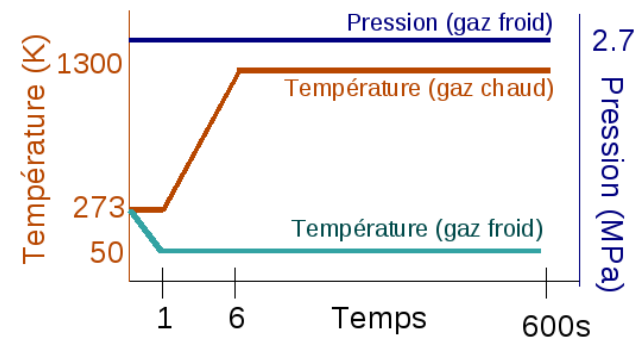
$$\tau_S = \frac{\rho_S C_S d_S^2}{k_S} \simeq 10^{-3} s$$

Couplage aéro-thermique : Dirichlet-Neumann sans correction



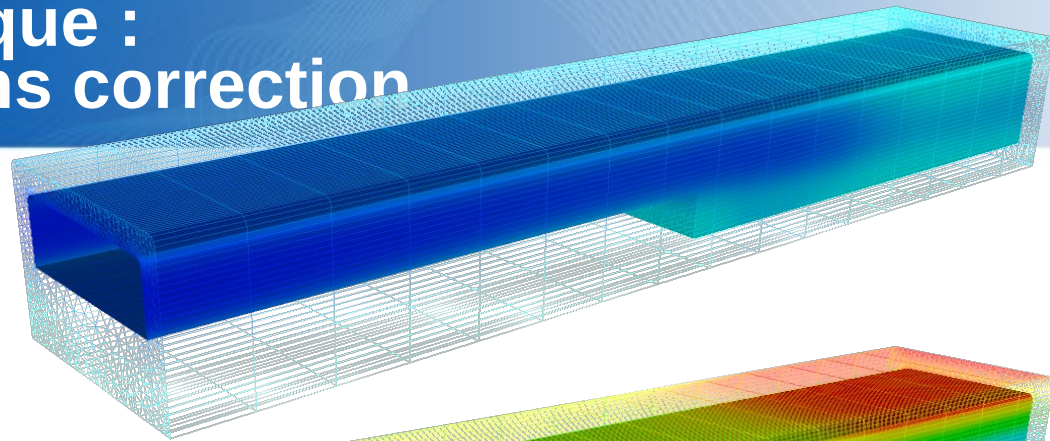
Fréquence de couplage théorique :

$$\tau_S = \frac{\rho_S C_S d_S^2}{k_S} \simeq 10^{-3} s$$

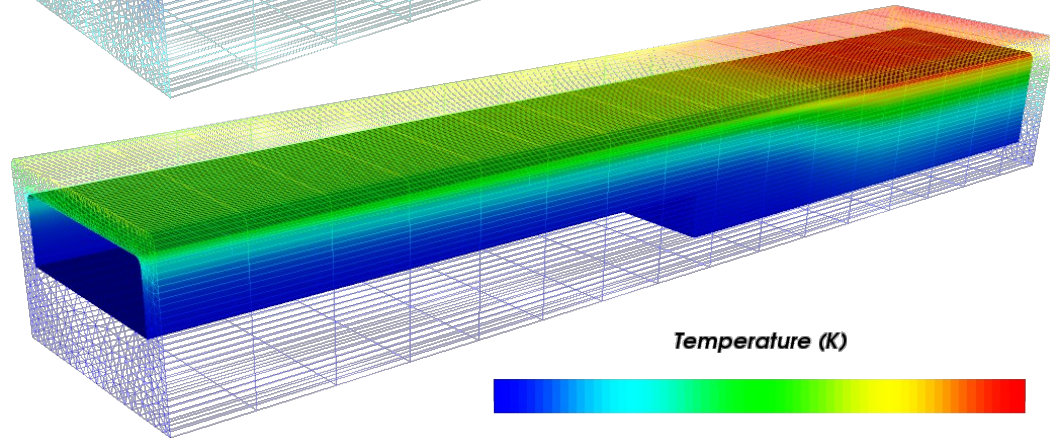


Couplage aéro-thermique : Dirichlet-Neumann sans correction

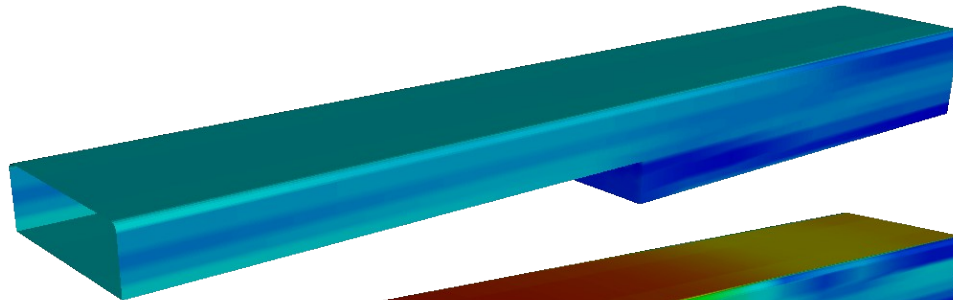
Température@1s



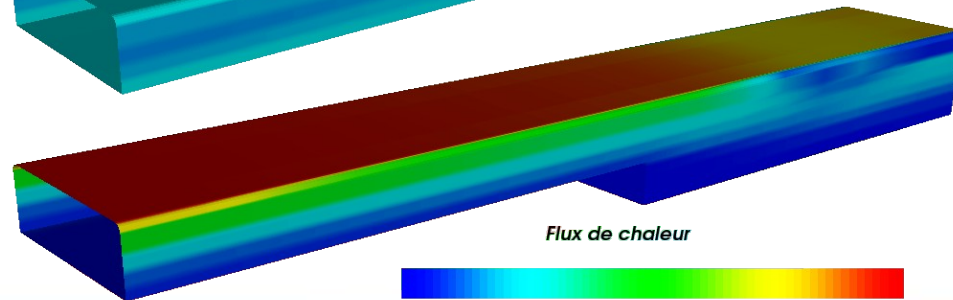
Température@3s



Flux de chaleur@1s

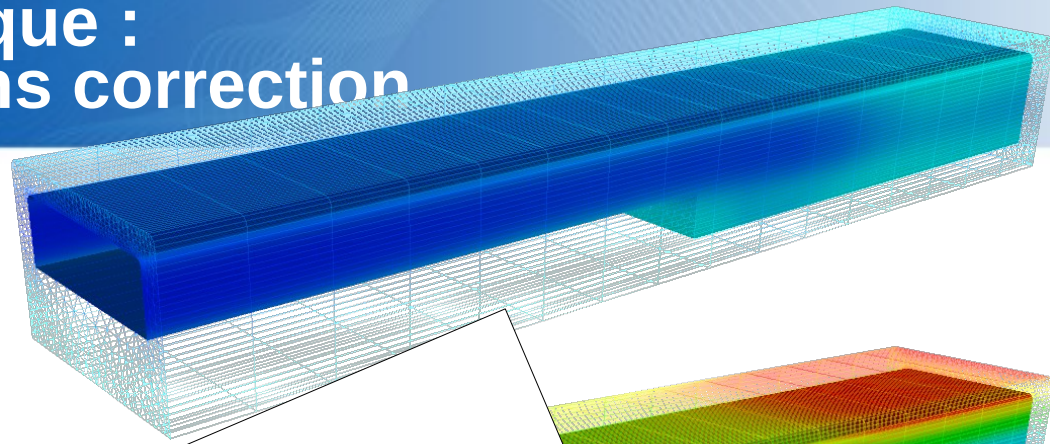


Flux de chaleur@3s



Couplage aéro-thermique : Dirichlet-Neumann sans correction

Température@1s



Température

*1 semaine de calculs
3,5 secondes de simulation*

Temperature (K)



Flux de chaleur@1s

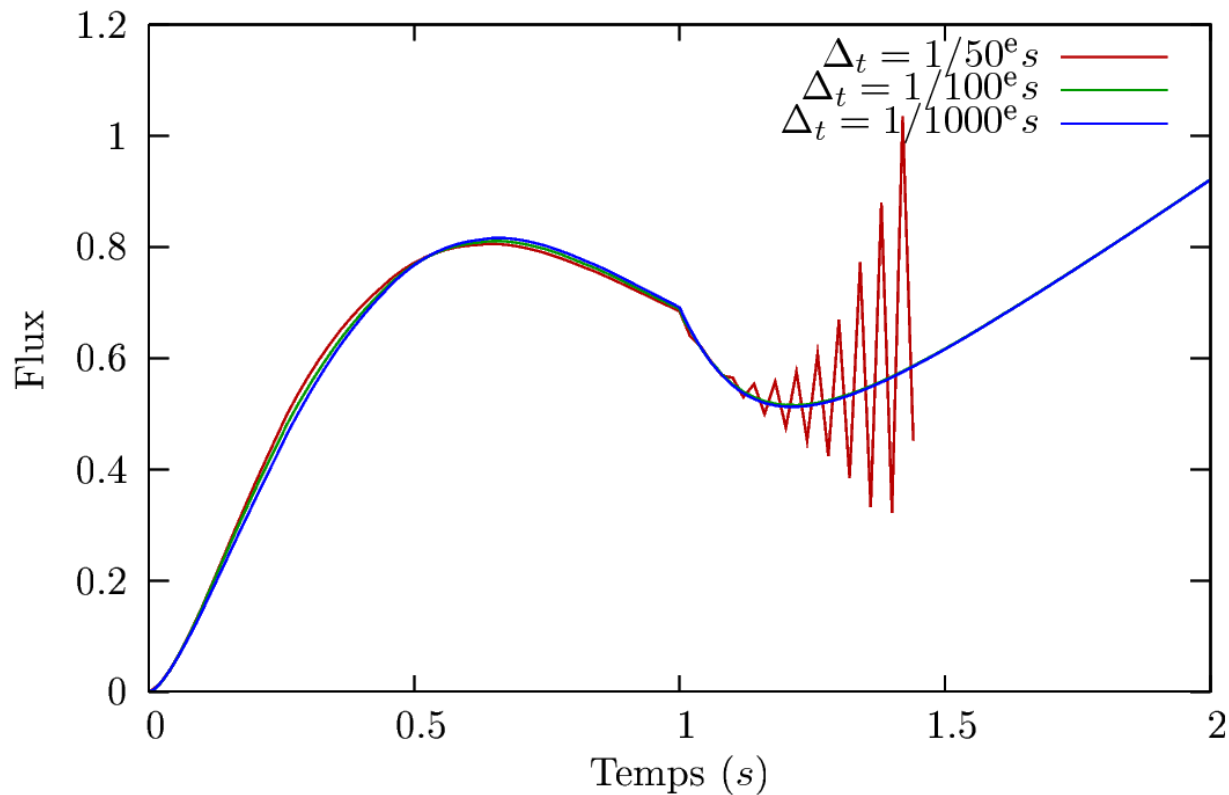
Flux de chaleur@3s

Flux de chaleur



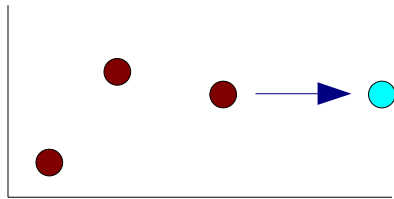
Accélération de la résolution

- Calculs à fréquences réduites, sans corrections

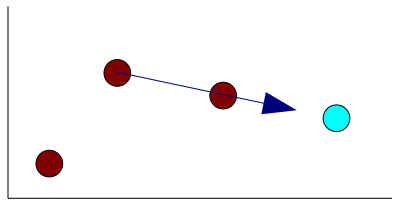


Prédicteur

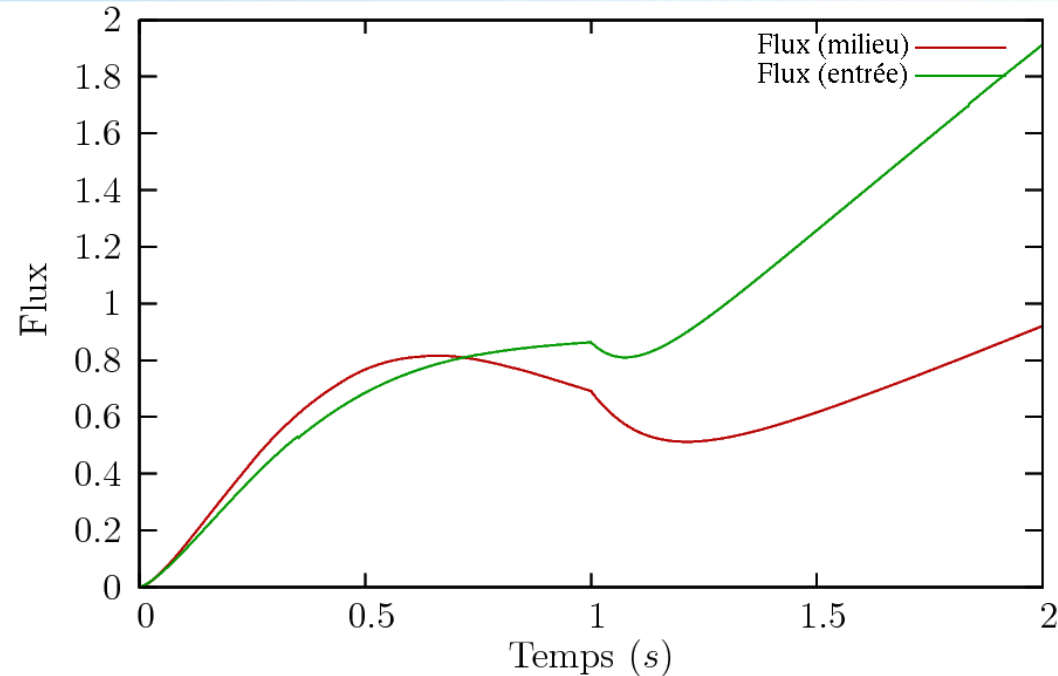
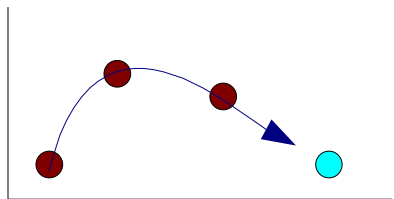
- Constant (ordre 0)



- Linéaire (ordre 1)



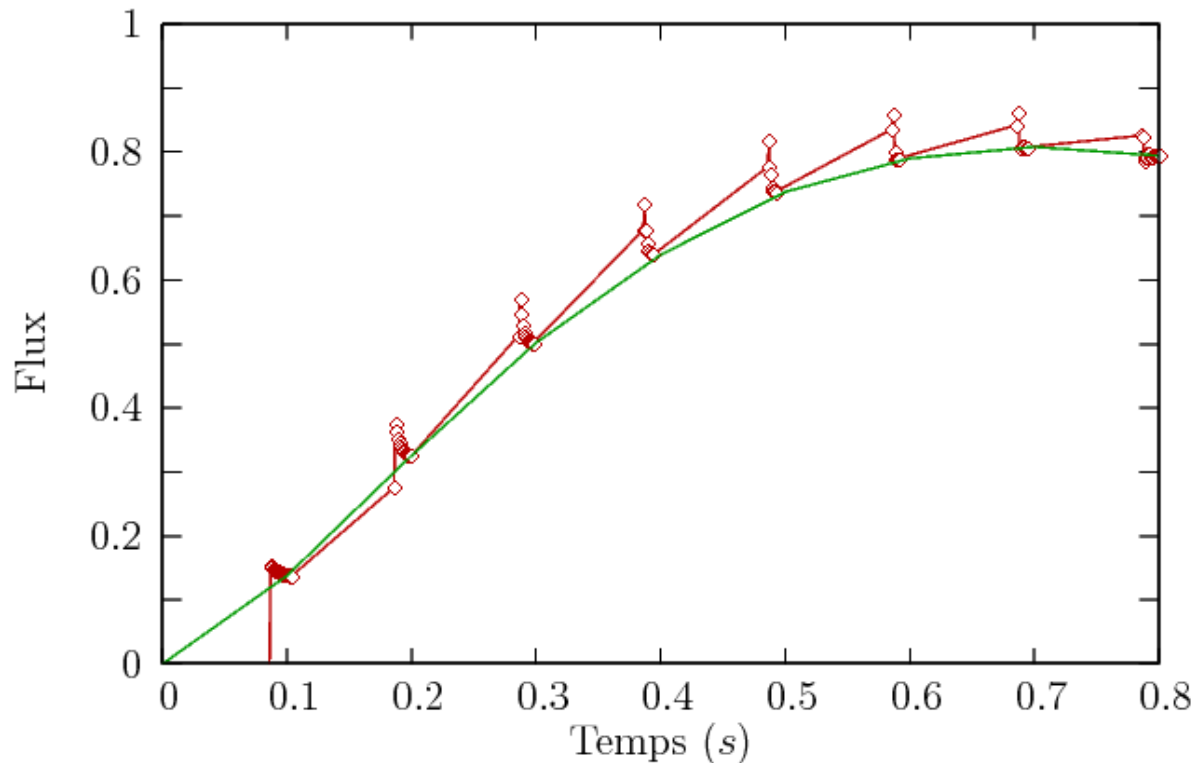
- Quadratique (ordre 2)



- Ordre 0 est conservateur :
 - moins efficace avant la 6^e seconde
 - parfait à partir de la 6^e seconde
- Ordre 2 est très sensible :
 - accélère dans zones faciles
 - diverge plus vite dans zones difficiles

Critère de convergence & corrections

- Critère de convergence : $\frac{\max |\Phi^r - \Phi^p|}{\max |\Phi^r|} < 1\%$
- N_t corrections, jusqu'à satisfaire le critère

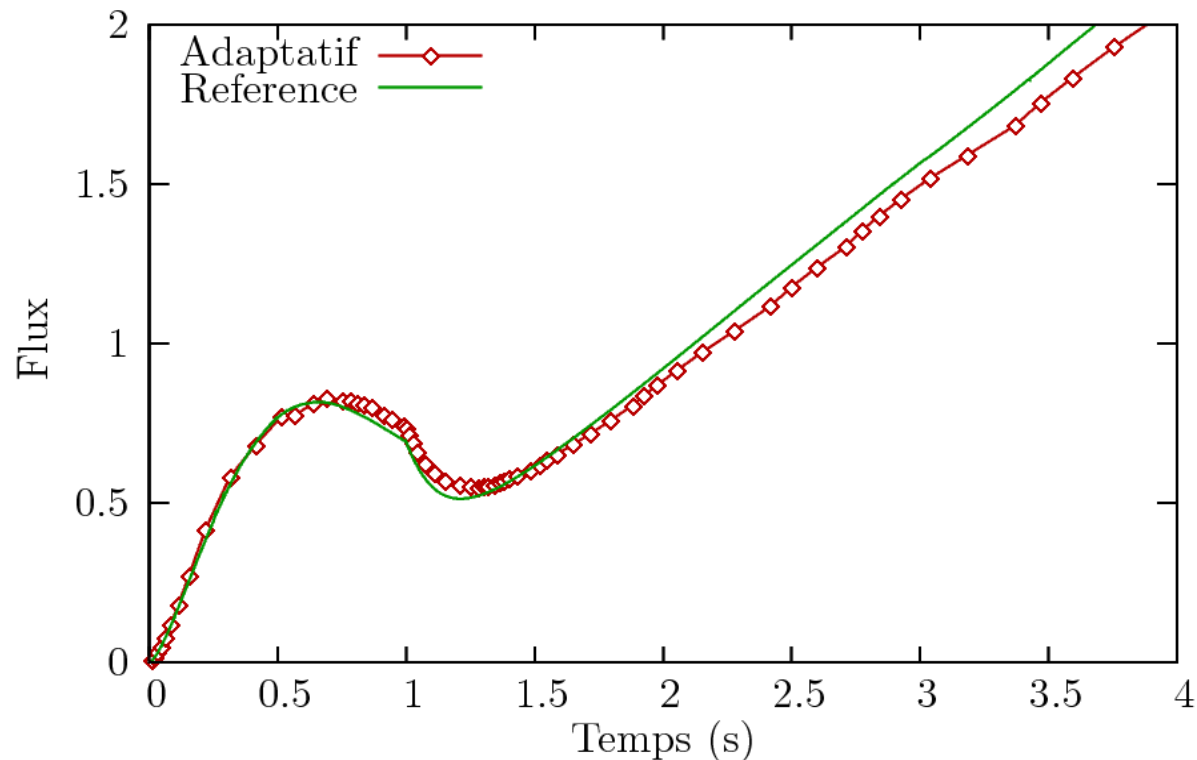


Évolution du flux à l'interface au cours des itérations de couplage

Pas de temps adaptatif

- Pas initial : $\Delta_t^{\text{ini}} = 1/100^{\text{e}} \text{ s}$
- Pas suivants : $\Delta_t^{\text{suiv}} = r \cdot \Delta_t^{\text{prev}}$
 - $r < 1$ si $N_{\text{opt}} < N_t$
 - $r > 1$ sinon

$$r = \begin{cases} 1 + \frac{s-1}{10} & \text{si } N_{\text{prev}} = N_{\text{opt}} \\ \min\left(\sqrt{\frac{N_{\text{opt}}}{N_{\text{prev}}}}, s\right) & \text{si } N_{\text{prev}} \neq N_{\text{opt}} \end{cases}$$

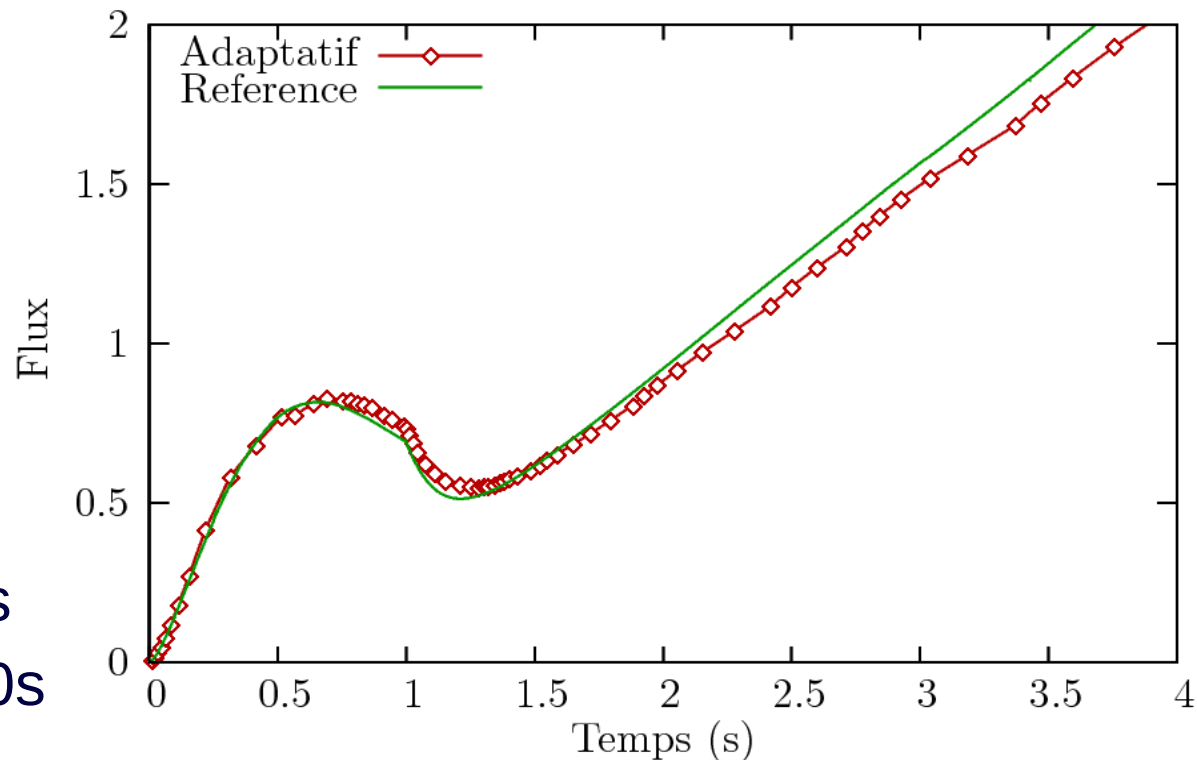


Pas de temps adaptatif

- Pas initial : $\Delta_t^{\text{ini}} = 1/100^{\text{e}} \text{ s}$
- Pas suivants : $\Delta_t^{\text{sui}} = r \cdot \Delta_t^{\text{prev}}$
 - $r < 1$ si $N_{\text{opt}} < N_t$
 - $r > 1$ sinon

$$r = \begin{cases} 1 + \frac{s-1}{10} & \text{si } N_{\text{prev}} = N_{\text{opt}} \\ \min\left(\sqrt{\frac{N_{\text{opt}}}{N_{\text{prev}}}}, s\right) & \text{si } N_{\text{prev}} \neq N_{\text{opt}} \end{cases}$$

- 450 itérations pour 3s
- 800 itérations pour 10s

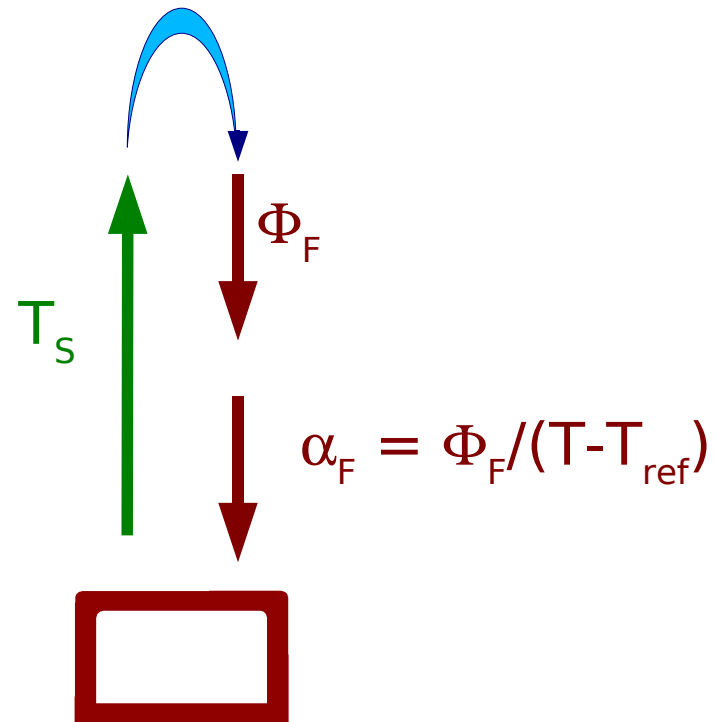


Condition de raccord mixte (Dirichlet-Fourier)

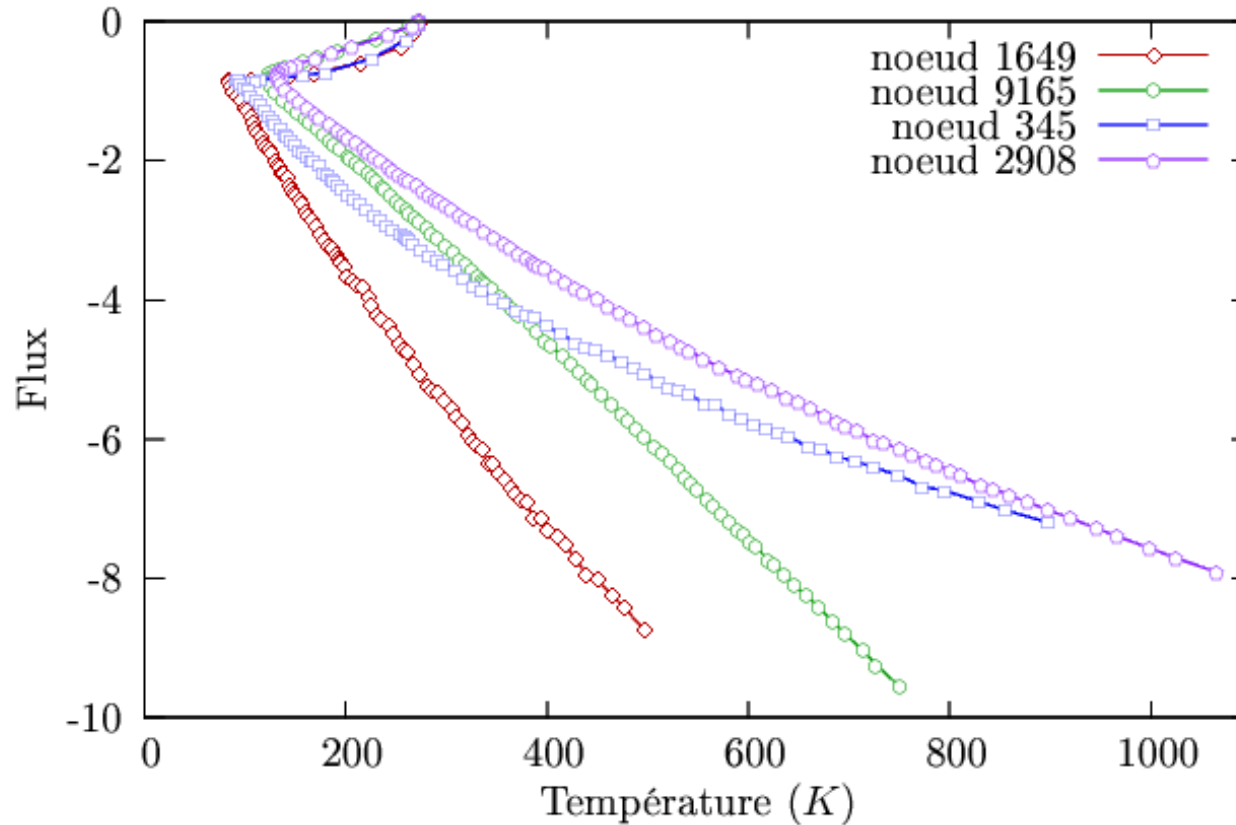
- Condition de Fourier

$$\Phi = \alpha (T - T_{\text{ref}})$$

- Choix optimal de T_{ref} :
Température adiabatique
de frottement [Chemin]

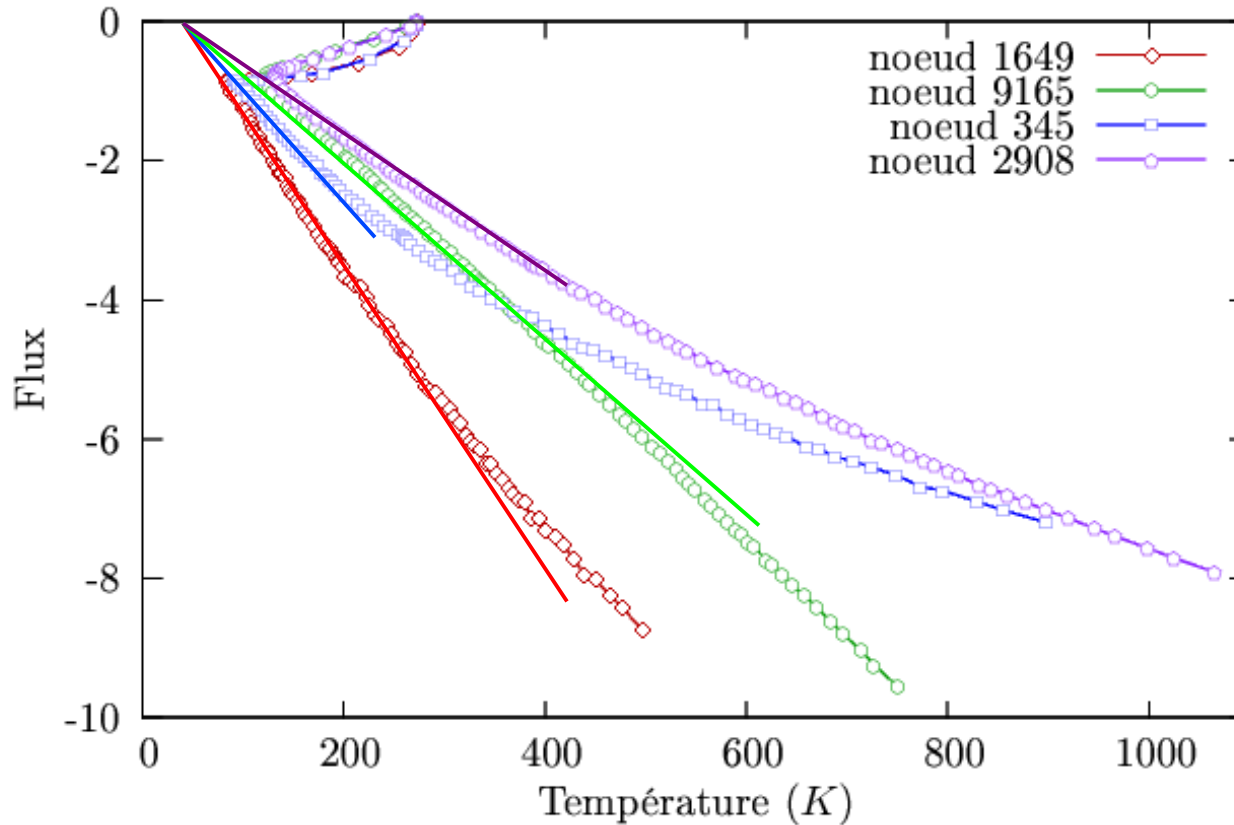


Condition de raccord mixte (Dirichlet-Fourier)



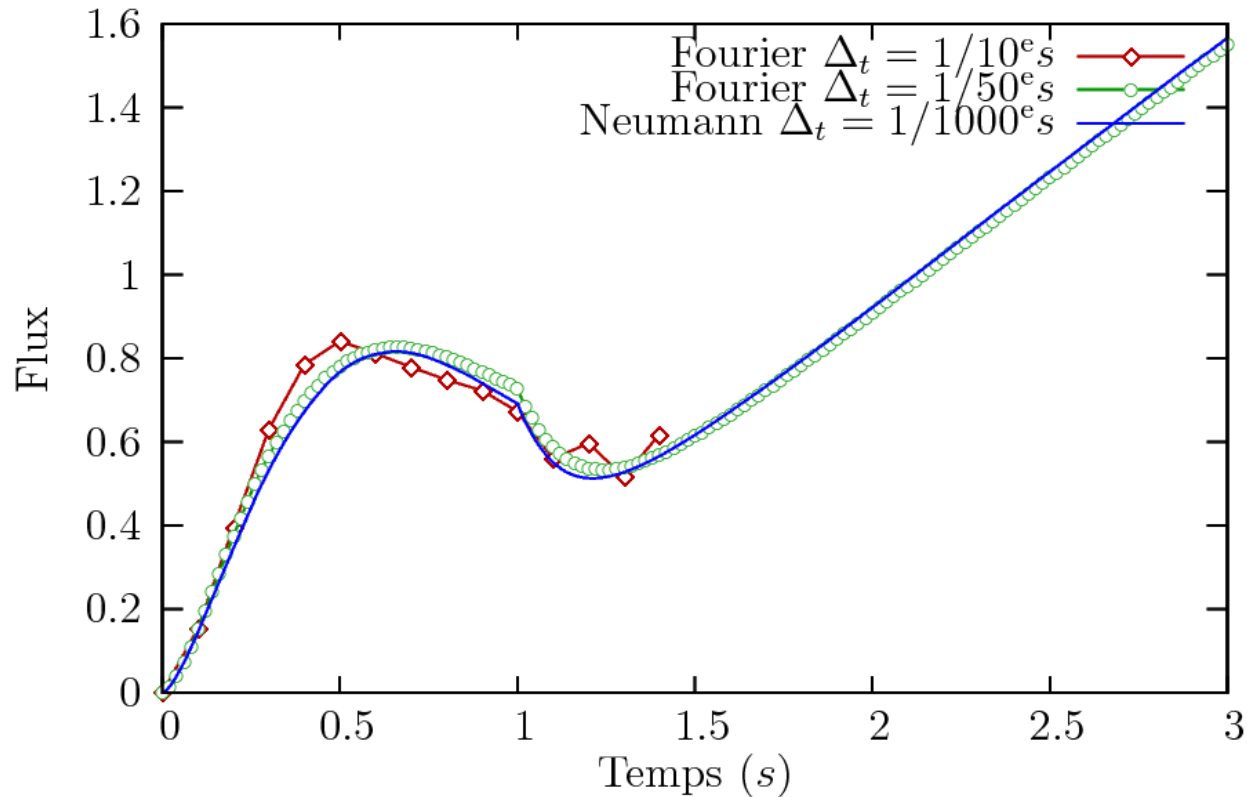
Relation Flux-Température obtenue à partir du calcul de référence

Condition de raccord mixte (Dirichlet-Fourier)



- Caractère *local* de α

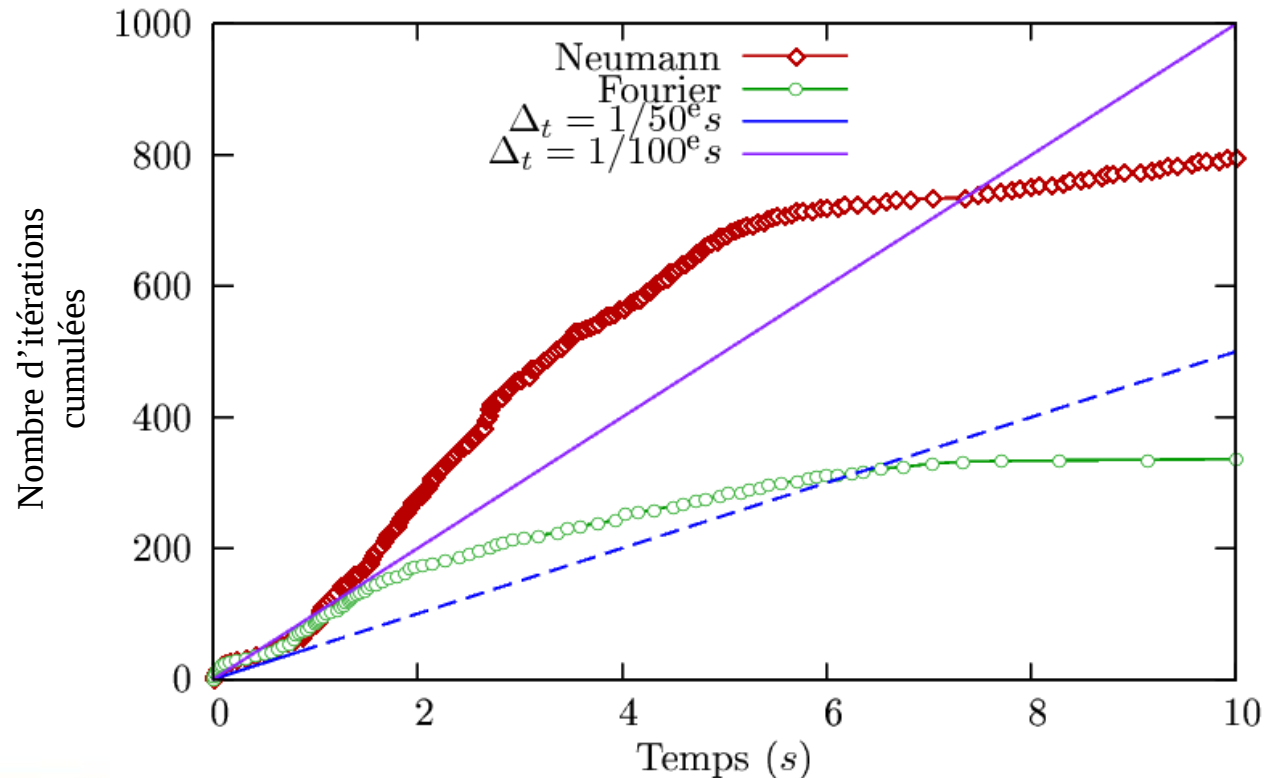
Condition de raccord mixte (Dirichlet-Fourier)



- Calculs sans correction (explicite)

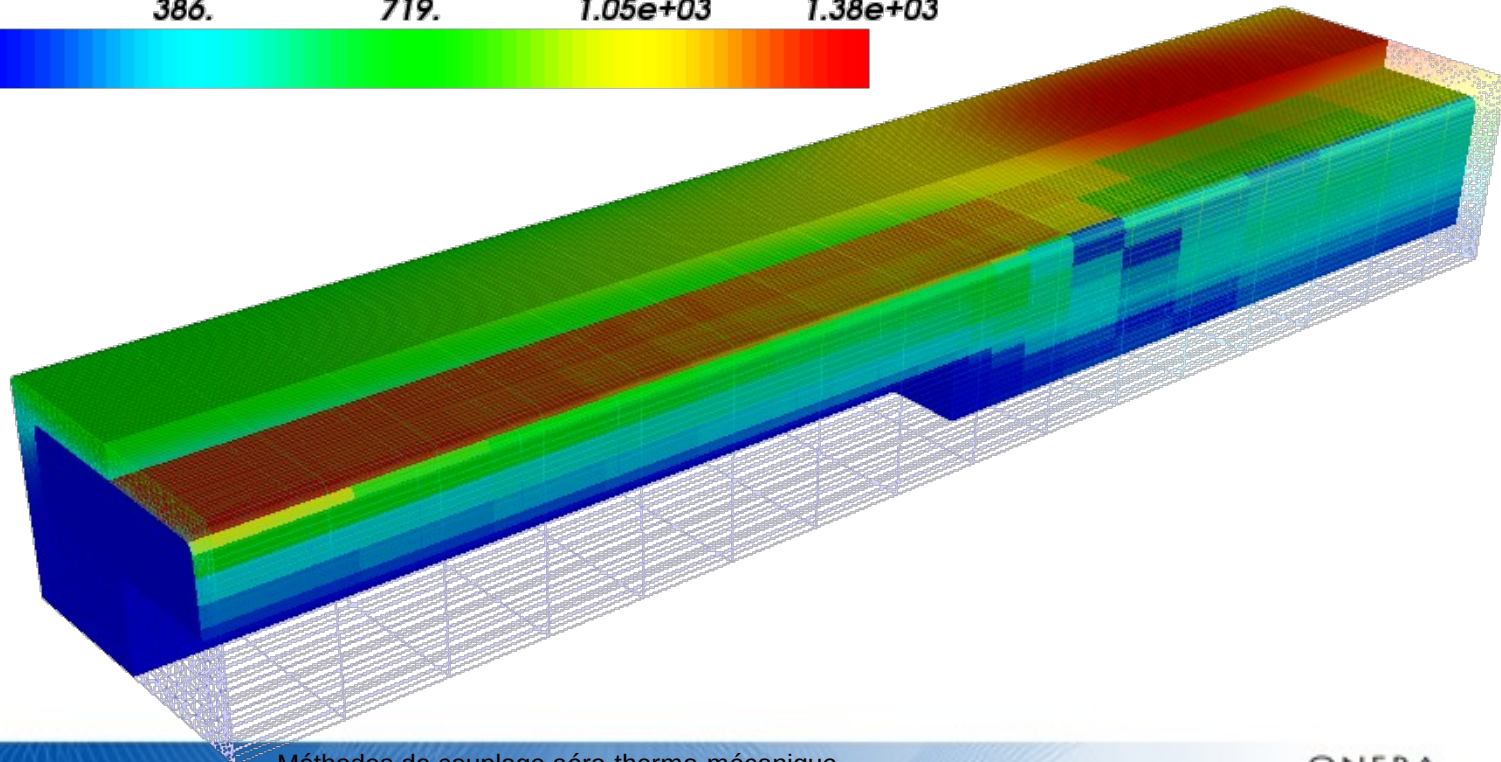
Couplage aéro-thermique : meilleure solution

- Critère de convergence : $\frac{\max |\Phi^r - \Phi^p|}{\max |\Phi^r|} < 1\%$
- Pas de temps de couplage adaptatif ($N_{\text{opt}} = 5$)
- Condition de raccord mixte (Fourier)
- Prédiction d'ordre 0



Couplage aéro-thermique : meilleure solution

- Solution à 600s
 - 126 pas de temps
 - 363 itérations
 - 20h de calcul

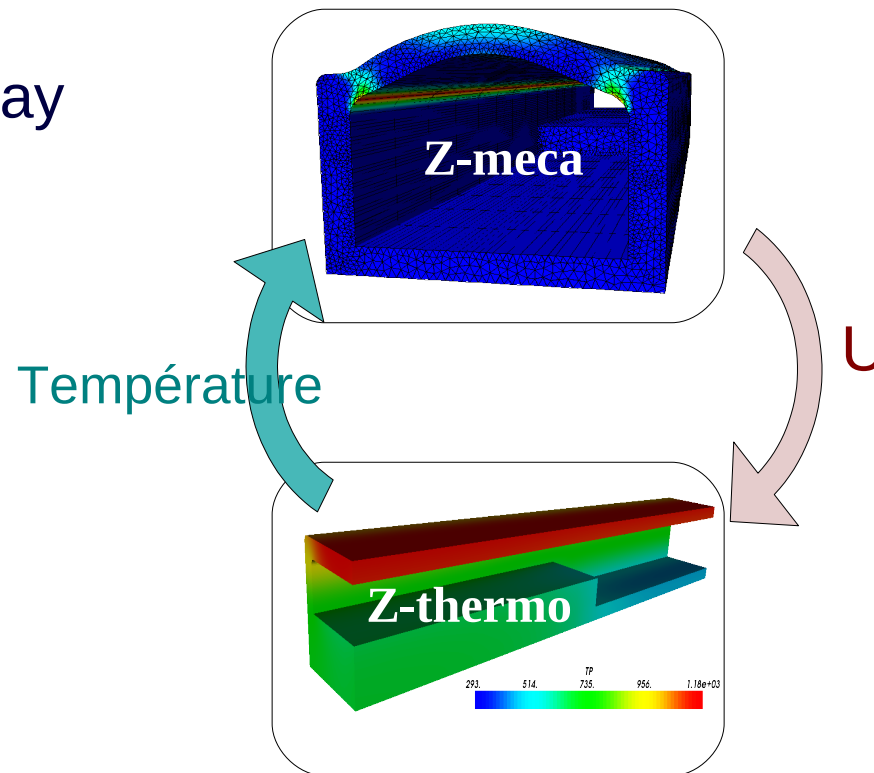


Plan

- Motivations
- Bibliographie : couplage partitionné
- Conception objet du couplage
- Couplages à 2 codes
 - Préparatifs
 - Aéro-mécanique
 - Aéro-thermique
 - Thermo-mécanique
- Couplage aéro-thermo-mécanique
- Conclusions et perspectives

Couplage thermo-mécanique du solide

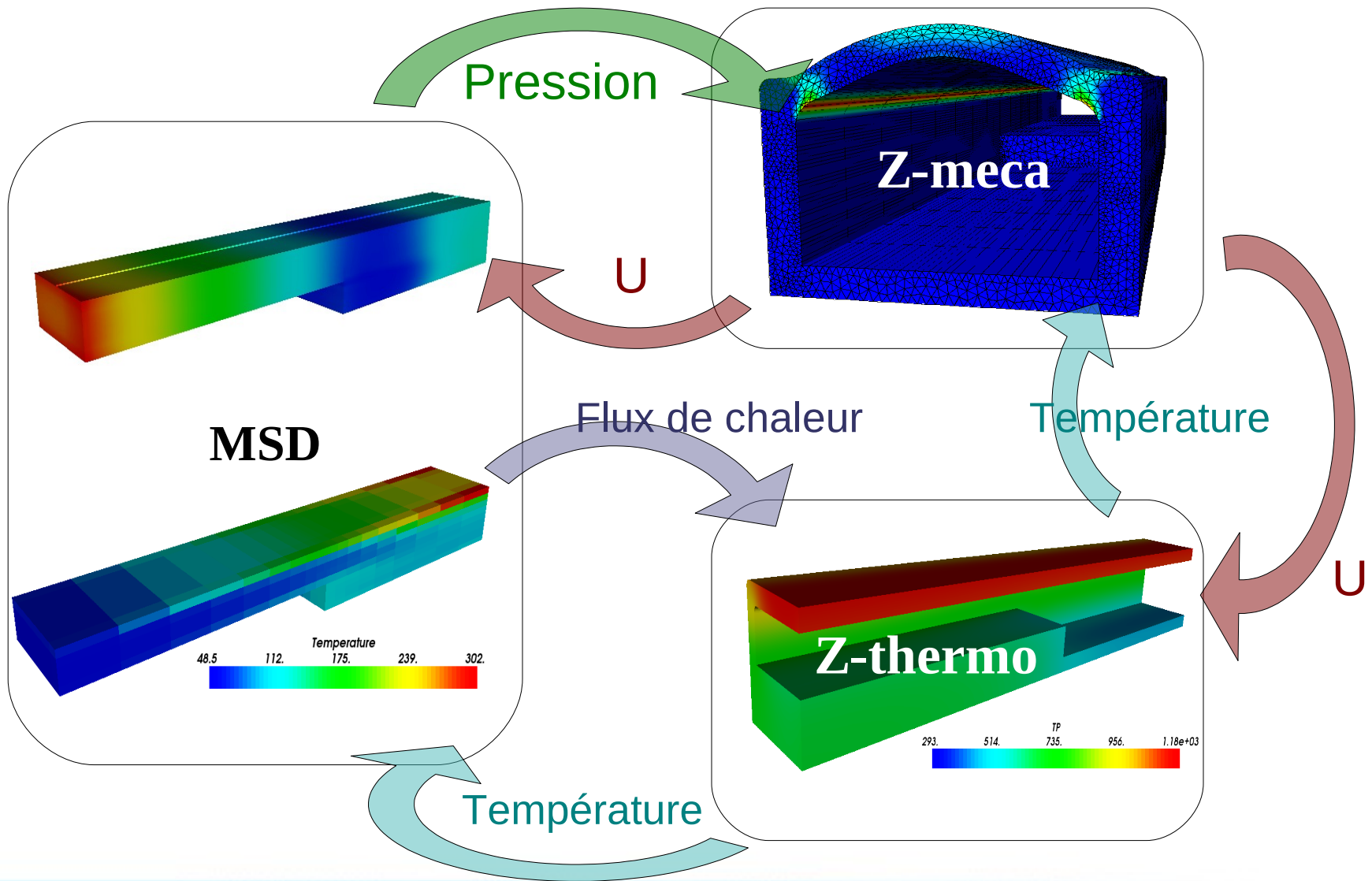
- Déjà existant, dans le cas coïncidant
- MpCCI apporte les maillages non-coïncidants
 - mais nécessite une linéarisation des champs volumiques quadratiques
- Couplage $(1+\epsilon)$ -way



Plan

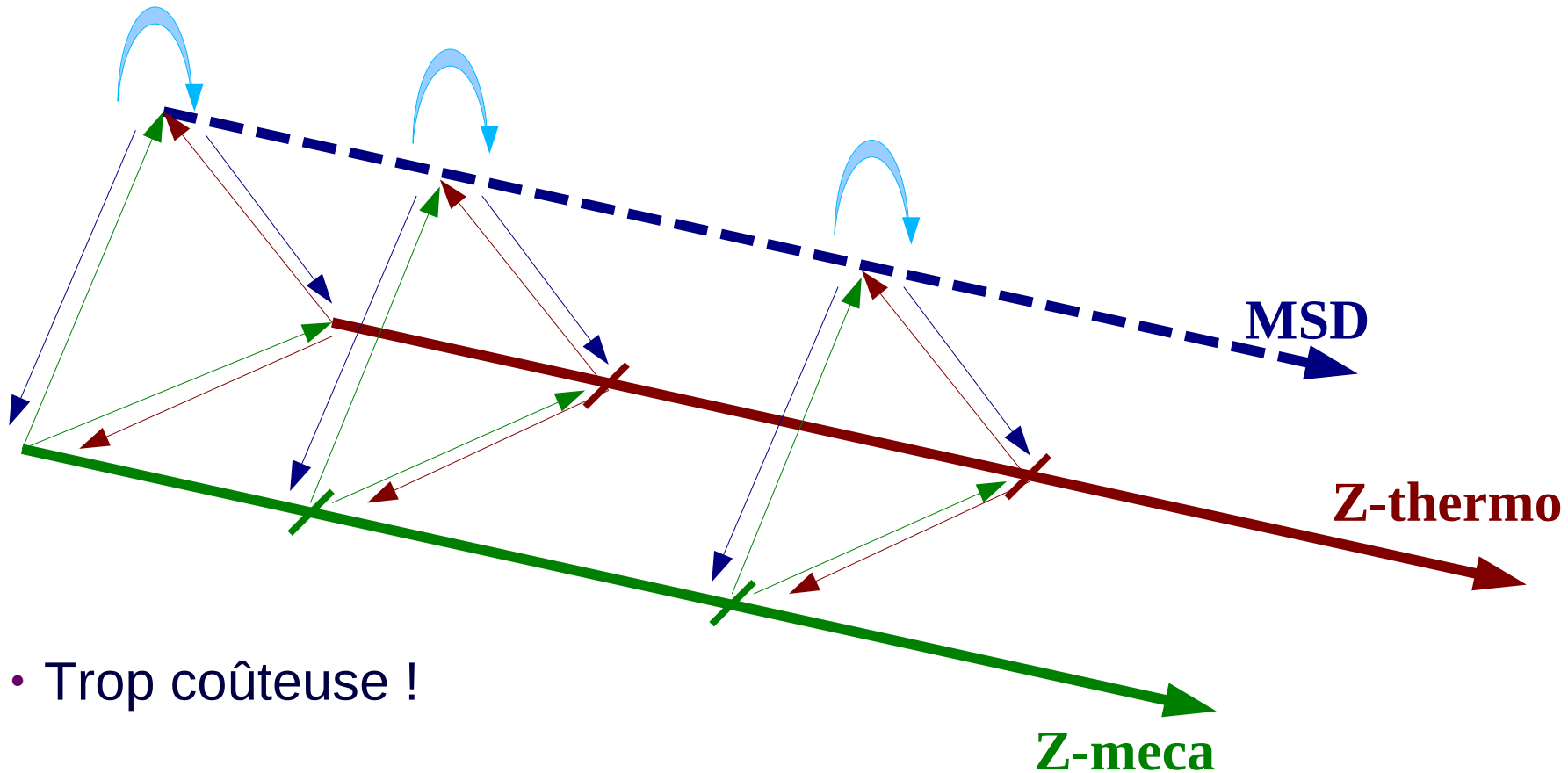
- Motivations
- Bibliographie : couplage partitionné
- Conception objet du couplage
- Couplages à 2 codes
 - Préparatifs
 - Aéro-mécanique
 - Aéro-thermique
 - Thermo-mécanique
- **Couplage aéro-thermo-mécanique**
 - Désynchronisation des codes
 - Applications au tube
- Conclusions et perspectives

Couplage aéro-thermo-mécanique



Aéro-thermo-mécanique : discrétisation en temps

- Solution synchrone

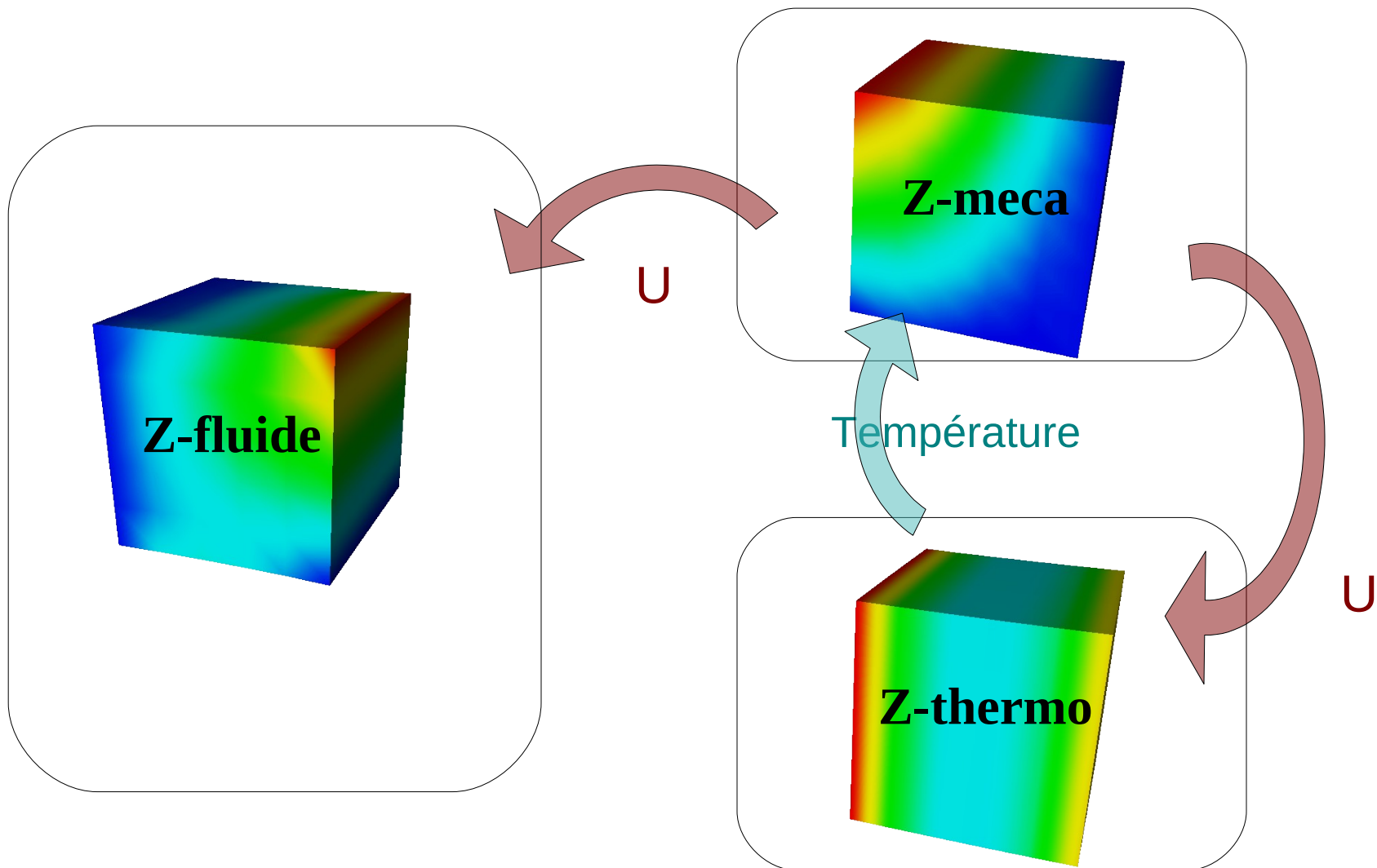


- Trop coûteuse !

Plan

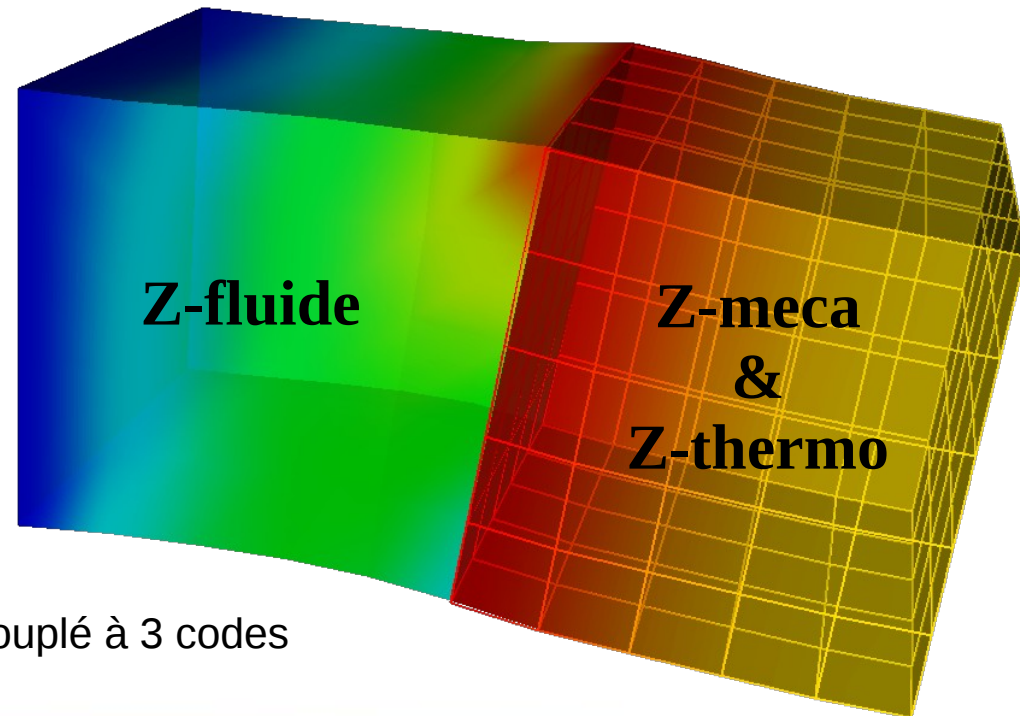
- Motivations
- Bibliographie : couplage partitionné
- Conception objet du couplage
- Couplages à 2 codes
 - Préparatifs
 - Aéro-mécanique
 - Aéro-thermique
 - Thermo-mécanique
- **Couplage aéro-thermo-mécanique**
 - Désynchronisation des codes
 - Applications au tube
- Conclusions et perspectives

Désynchronisation : couplage de 3 ZéBuLoNs



Difficultés liées au « 3 codes »

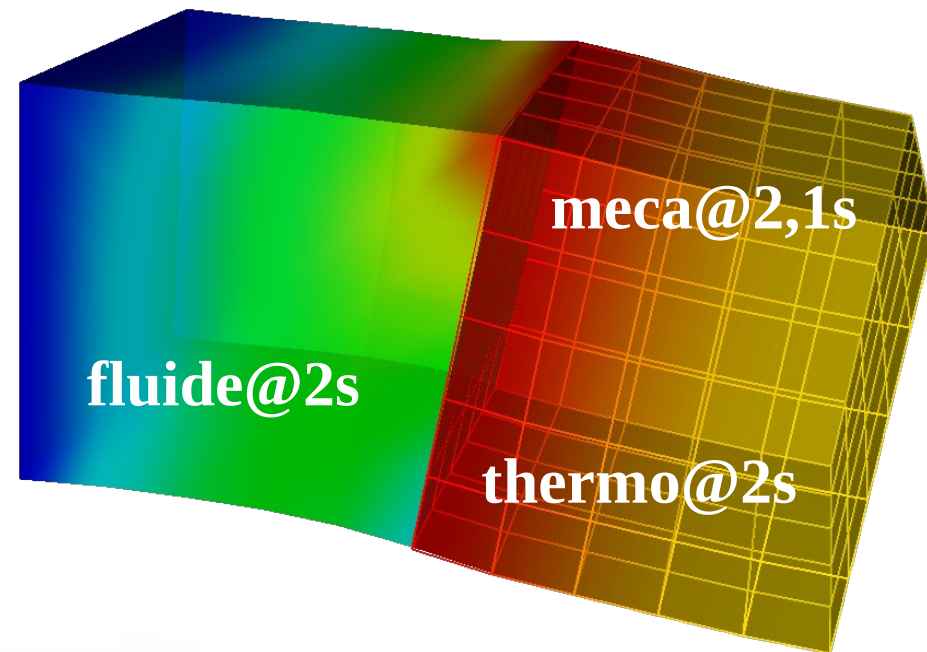
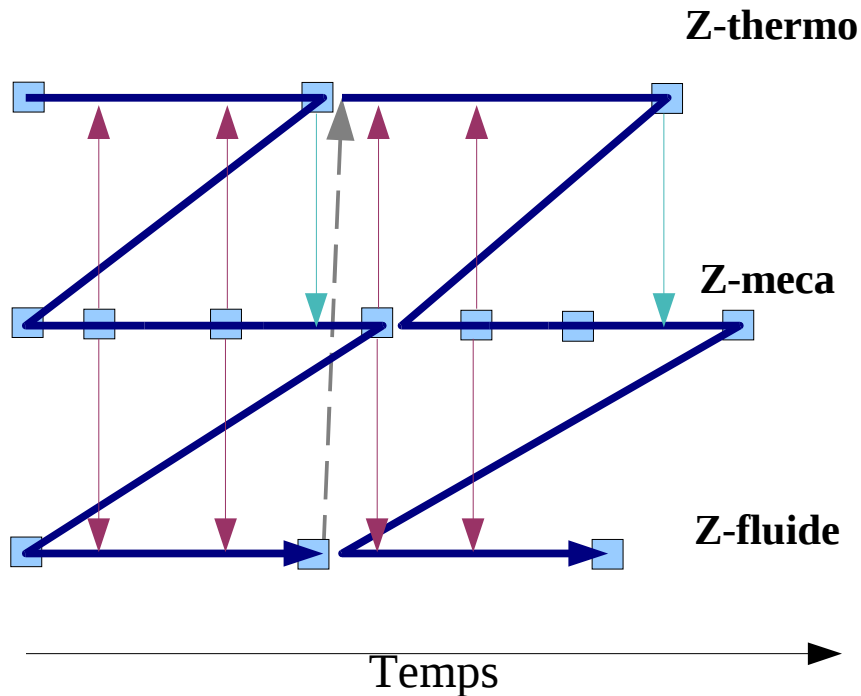
- Logicielles (MpCCI)
 - Communicateurs par défaut non utilisables
 - Couplage par « points de synchronisations » difficile
 - Éléments volumiques quadratiques inexistant



Calcul couplé à 3 codes

Difficultés liées au « 3 codes »

- Conceptuelles : désynchronisation des codes

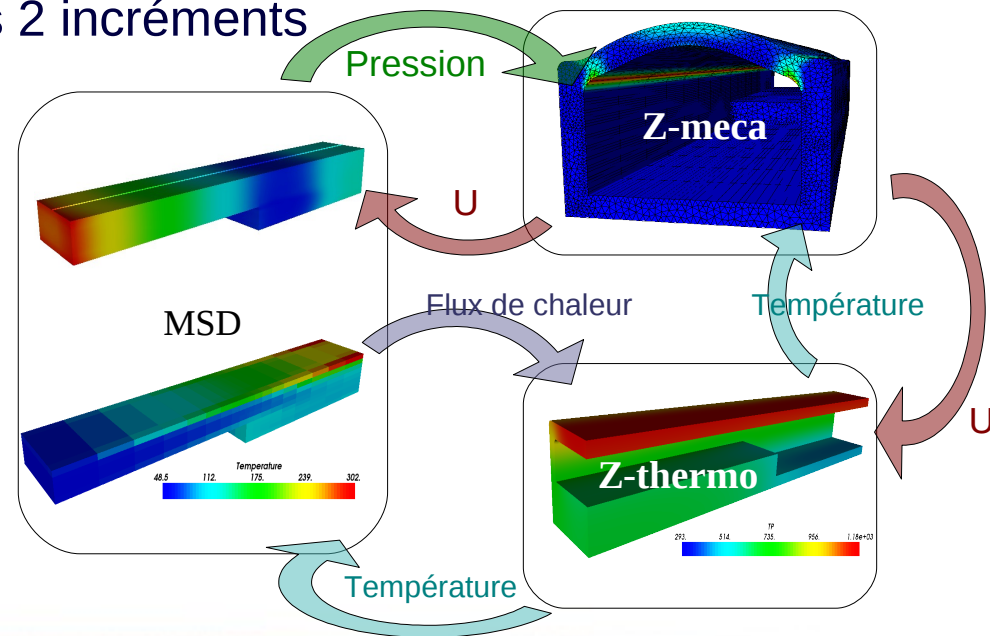


Plan

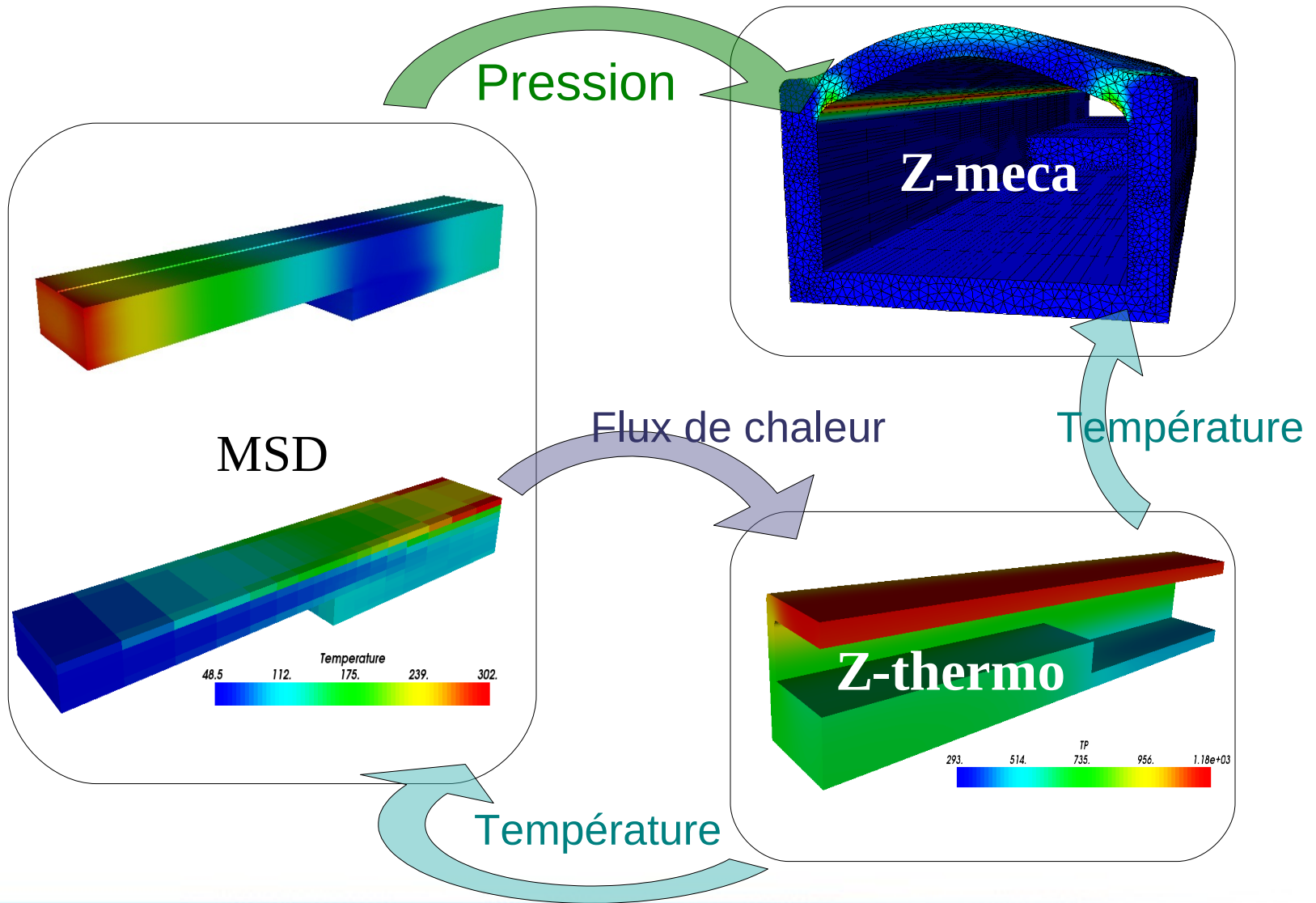
- Motivations
- Bibliographie : couplage partitionné
- Conception objet du couplage
- Couplages à 2 codes
 - Préparatifs
 - Aéro-mécanique
 - Aéro-thermique
 - Thermo-mécanique
- **Couplage aéro-thermo-mécanique**
 - Désynchronisation des codes
 - Applications au tube
- Conclusions et perspectives

Couplage aéro-thermo-mécanique du tube

- Désynchronisation des deux codes solides
- Pas d'asynchronisme dans MSD :
 - solution 1 : à développer (long ?)
 - solution 2 : synchroniser les deux codes solides
- Assujettir la mécanique aux pas de temps thermiques
 - très coûteux
 - Blocage (algorithmique) après 2 incréments

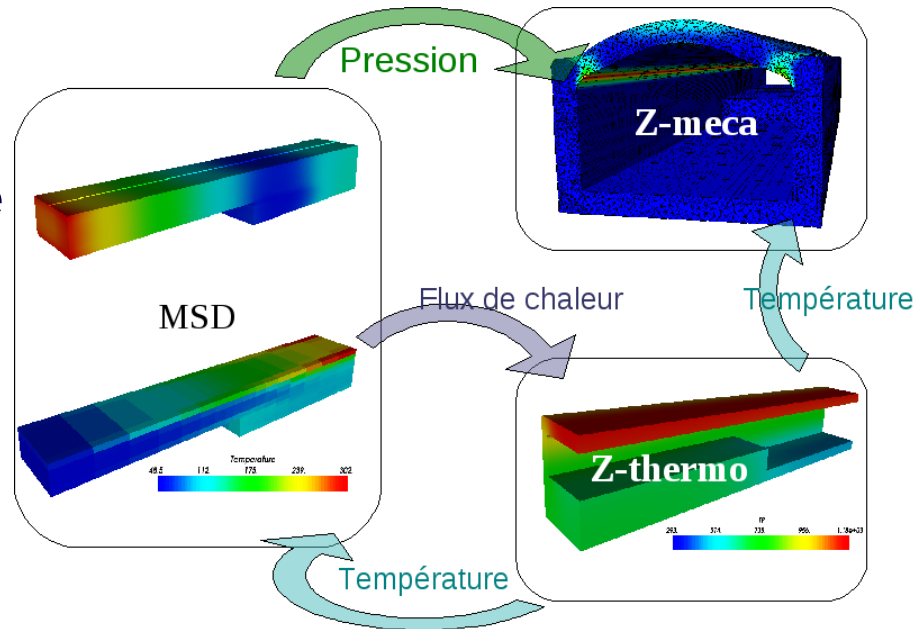


Couplage simplifié à 3 codes



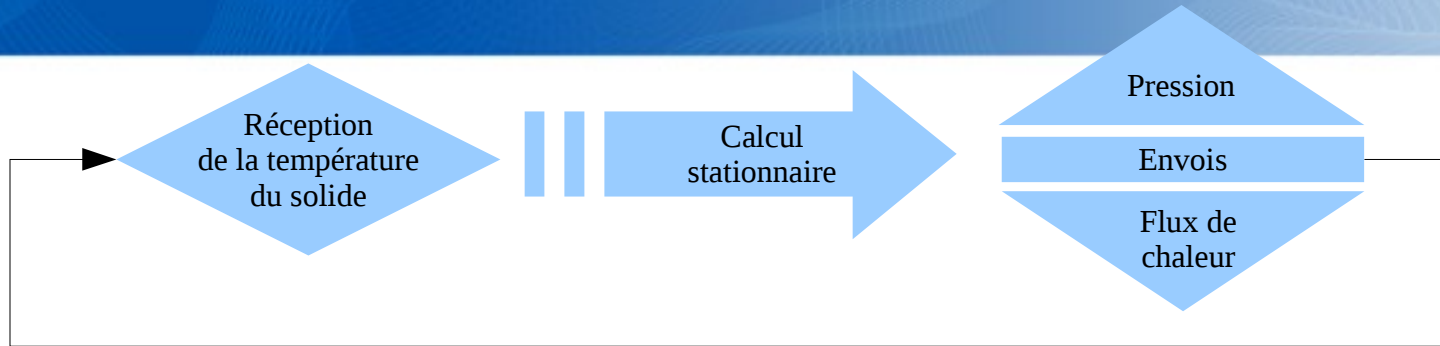
Difficultés liées au « 3 codes » sur le tube

- Logicielles (MpCCI)
 - Communicateurs par défaut non utilisables
 - Couplage par « points de synchronisations » difficile
 - Éléments volumiques quadratiques inexistant
- Conceptuelles
 - désynchronisation des codes
 - couplage aéro-mécanique renforcé
 - équilibrage de charges

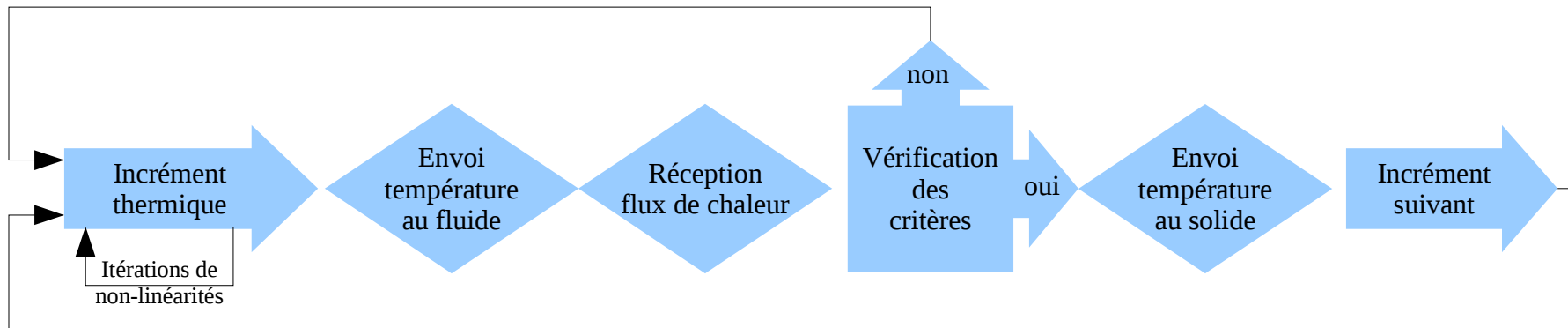


Implémentation du couplage à 3 codes

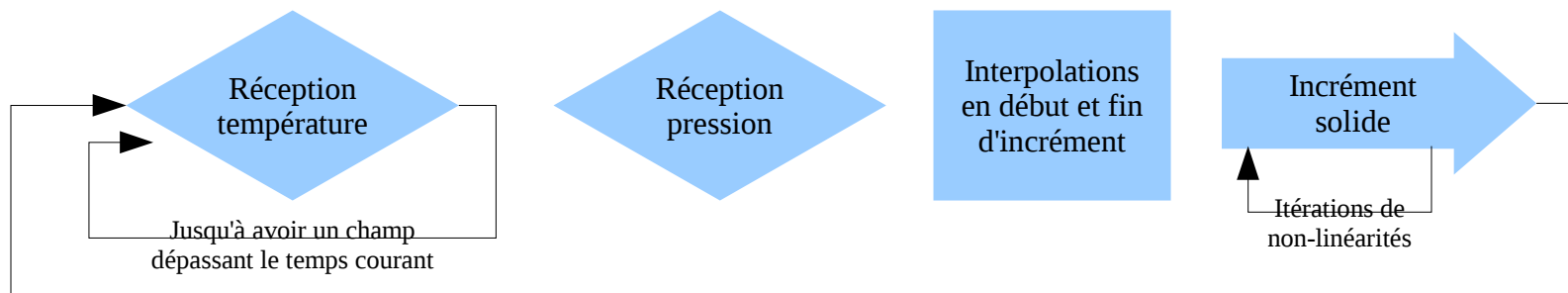
Fluide



Thermique

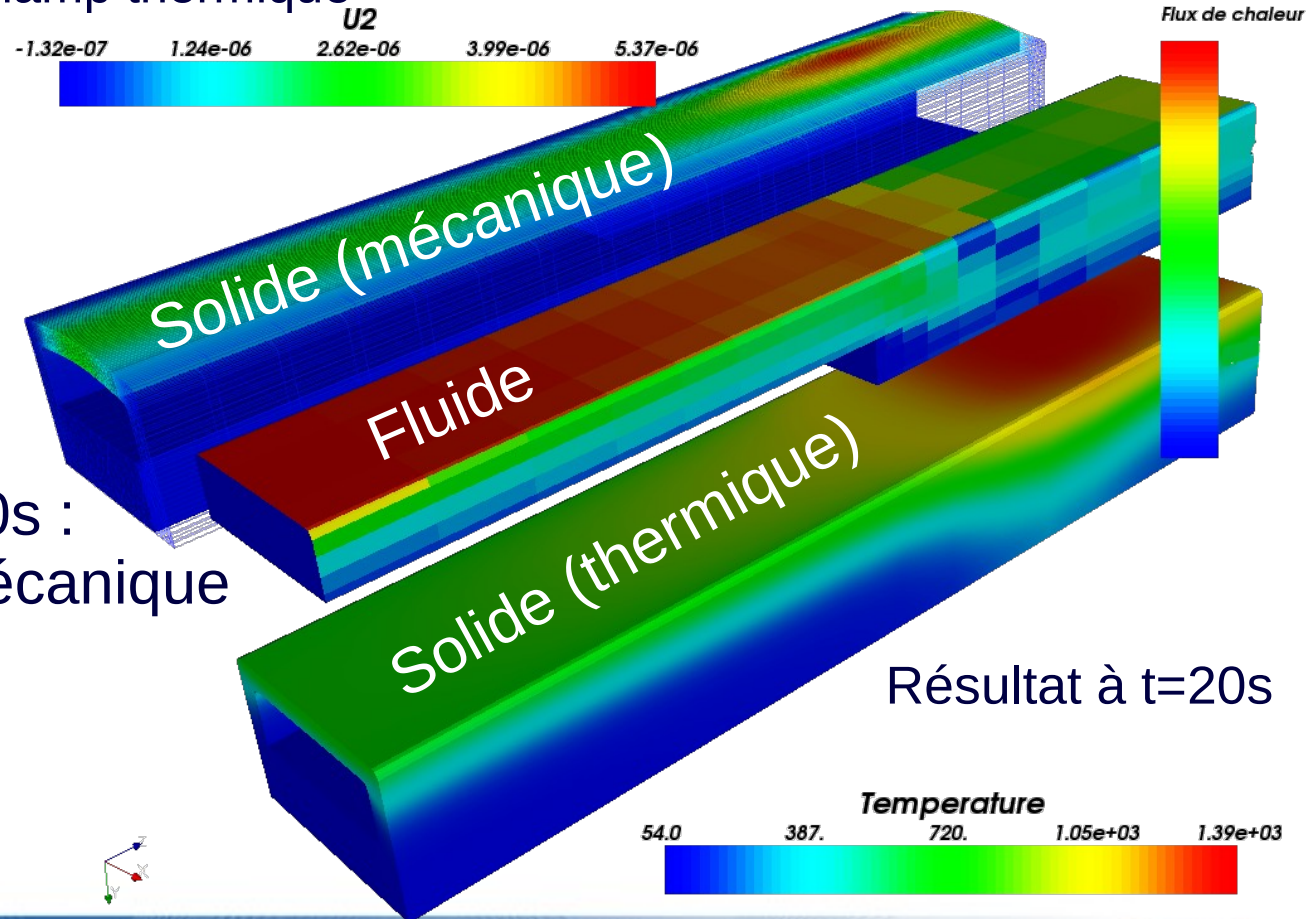


Mécanique



Couplage simplifié à 3 codes

- Déformations encore faibles :
 - température moindre
 - forte influence du champ thermique

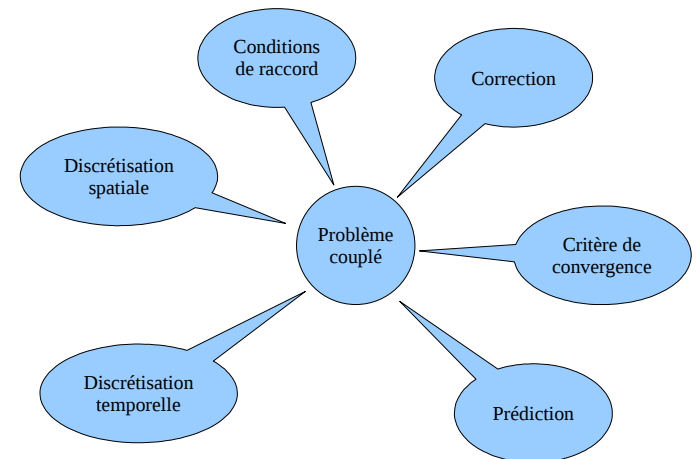


- Arrêt du calcul à 20s :
divergence LdC mécanique
 - Gradient thermique trop important ?



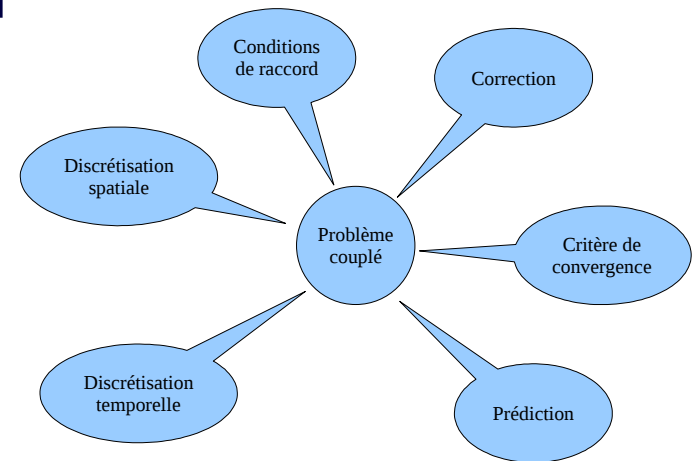
Conclusion

- Atelier de couplage, adapté aux spécificités aérospatiales
 - Non-linéaire mécanique de solide
 - Couplage à la fois thermique et mécanique
- La mécanique *seule* est peu couplée
 - La méthode simple est la mieux adaptée
- La thermique nécessite :
 - Pas de temps adapté
 - Raccord mixte
 - Prédicteur
 - ... ou du temps de calcul



Conclusion

- Méthode de résolution dépendante du problème
- Algorithme spécialisé pour chaque application
- Couplage 3 codes
 - Nécessite de désynchroniser les codes
 - Fonctionnel sur des cas tests 3-ZéBuLoN
 - Fonctionnel sur couplage simplifié
- Inter-branches (solide / fluide / numérique)
 - Langage
 - Spécialités différentes
 - Apports mutuels



- Solution à approfondir : désynchronisation du code fluide
- Des difficultés d'origine physiques apparaissent
- Ajouter plus de physique dans les différentes stratégies
- Autres cas d'application
 - Autres phénomènes, autres échelles
 - Validité de l'atelier de couplage

