

Couplage conduction rayonnement pour la modélisation des procédés de formage du verre.

Luc-Henry Dorey, Lionel Tessé, Arjen Roos, Frédéric Feyel



retour sur innovation

Département d'Énergétique Fondamentale et Appliquée (DEFA)

Plan de la présentation

- Contexte et objectifs
- Rayonnement dans le verre
 - Propriétés radiatives
 - Méthode de Monte Carlo
 - Approches optimisées
- Conduction dans le verre
 - Propriétés thermophysiques du verre
 - Résolution de l'équation de la chaleur
- Méthodes de couplage partitionnées
- Résultats obtenus
- Conclusion

Contexte et objectifs

- Problème industriel : le formage du verre
 - Formage de verre plat, bouteilles ou fibres de verre.
 - Les procédés de production conditionnent la **qualité du produit**.
- Objectif : modéliser en 3D le refroidissement du verre (calcul instationnaire).
- Buts :
 - Améliorer le contrôle des procédés de production
 - Réduire le niveau d'empirisme des procédés de production
- Phénomènes dominants dans le verre à 800K :
 - **rayonnement** (milieu semi-transparent)
 - **conduction**



Rayonnement dans le verre porté à haute température



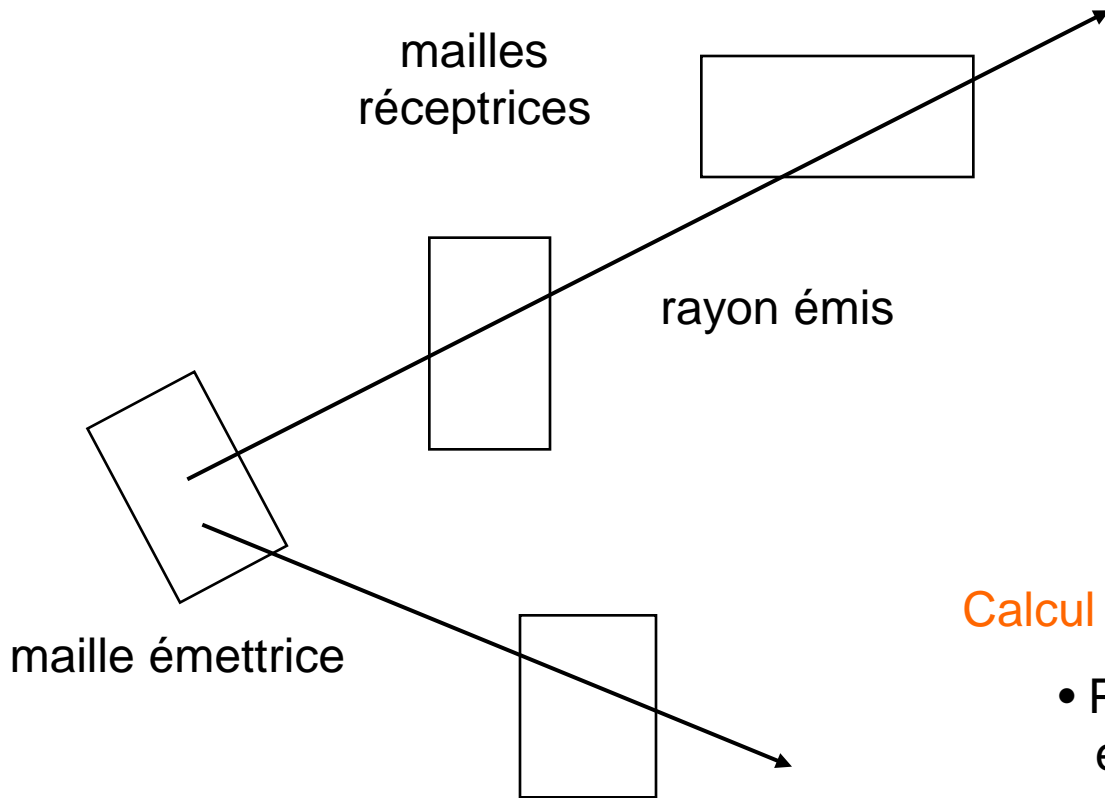
retour sur innovation

Propriétés radiatives du verre

- Milieu semi-transparent **non-diffusant**
- Comportement spectral approché par un **modèle de bandes**:
 - l'indice de réfraction n
 - le coefficient d'absorption κ
sont constants sur chaque bande
- 6 bandes spectrales sur $[200 \text{ cm}^{-1}; 11000 \text{ cm}^{-1}]$
- n varie de 1.43 à 1.50
- κ varie de 16 m^{-1} à **10^5 m^{-1}**

Code ASTRE

- Calcul des transferts radiatifs par la méthode de Monte-Carlo:
 - Construction de rayons de manière aléatoire



Tirage au sort:

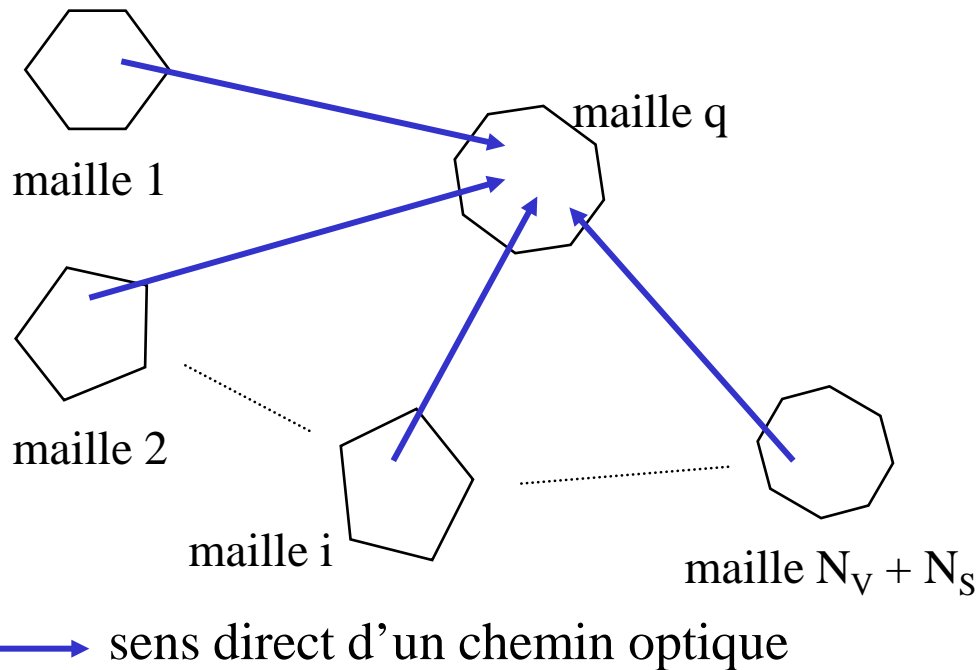
- de la direction
- du nombre d'onde associé
- de la position du point d'émission

Calcul des quantités:

- Puissance radiative volumique en chaque maille
- Flux sur les mailles surfaciques de type « paroi »

Code ASTRE

- Méthode de Monte Carlo conventionnelle:
 - Méthode FM (Forward Method)



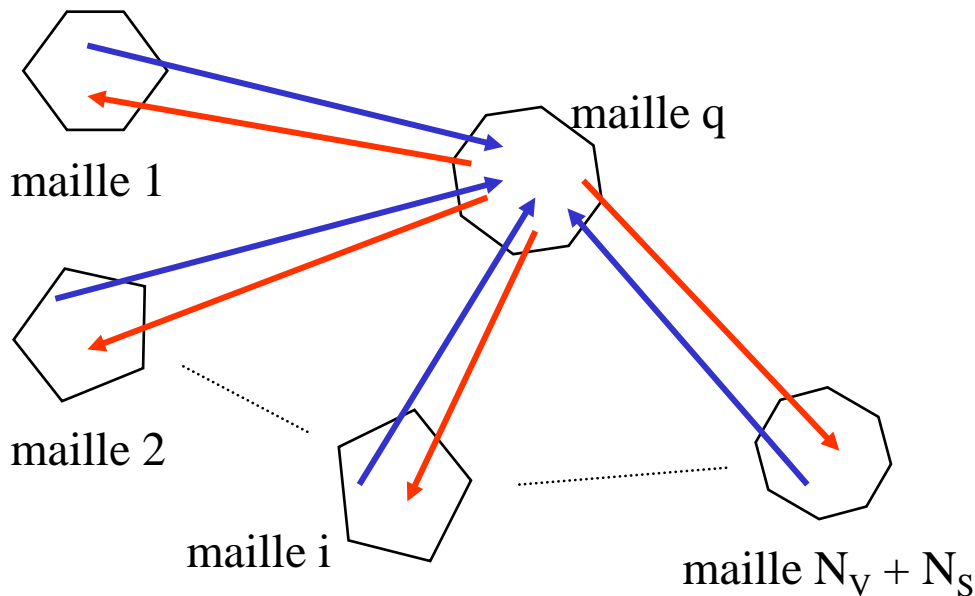
La maille q **reçoit** les rayons

$$P_q^R = \sum_{i=1}^{N_V + N_S} P_{iq}^{ea} - P_q^e$$

Pour mener le bilan sur la maille q, il est nécessaire de **construire tous les rayons** issus de toutes les mailles

Code ASTRE

- Méthodes réciproques:
 - Méthode ARM (Absorption-based Reciprocity Method)



La maille q **reçoit** les rayons

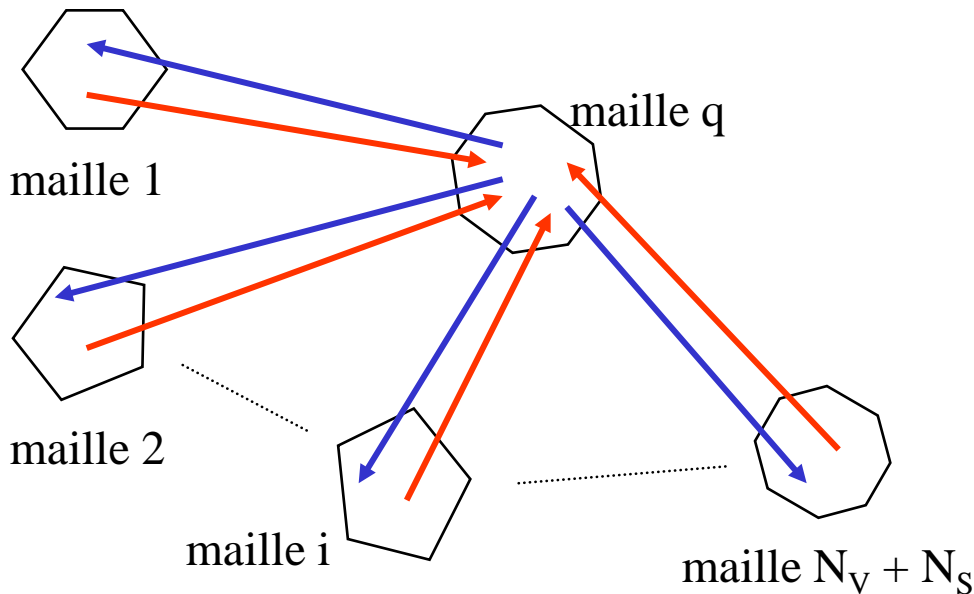
$$P_q^R = \sum_{i=1}^{N_V + N_S} -P_{iq}^{exch}$$

$$P_{viq}^{exch} = P_{viq}^{ea} \left(\frac{L_v^\circ(T_q)}{L_v^\circ(T_i)} - 1 \right)$$

Pour mener le bilan sur la maille q, il est nécessaire de construire tous les rayons issus de toutes les mailles

Code ASTRE

- Méthodes réciproques:
 - Méthode ERM (Emission-based Reciprocity Method)



La maille q émet les rayons

$$P_q^R = \sum_{i=1}^{N_V + N_S} P_{qi}^{exch}$$

$$P_{vqi}^{exch} = P_{vqi}^{ea} \left(\frac{L_v^\circ(T_i)}{L_v^\circ(T_q)} - 1 \right)$$

Pour mener le bilan sur la maille q , il suffit de construire tous les rayons issus de cette maille

- sens direct d'un chemin optique
- sens réciproque d'un chemin optique



Transferts conductifs dans le verre



retour sur innovation

Conduction dans le verre

- Pb de conduction **non linéaire** :
 - Conductivité λ variant de 1 à 2 W.m⁻¹.K⁻¹
 - Capacité calorifique massique c variant de 820 à 1500 J.kg⁻¹.K⁻¹
 - Masse volumique $\rho = 2450$ kg.m⁻³
- Code de thermomécanique ZéBuLoN (ONERA – Ecole des Mines – Northwest Numerics)
- Méthode des éléments finis appliquée à l'équation de la chaleur combinée à la loi de Fourier:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{ grad } T) = p$$

- Calcul instationnaire



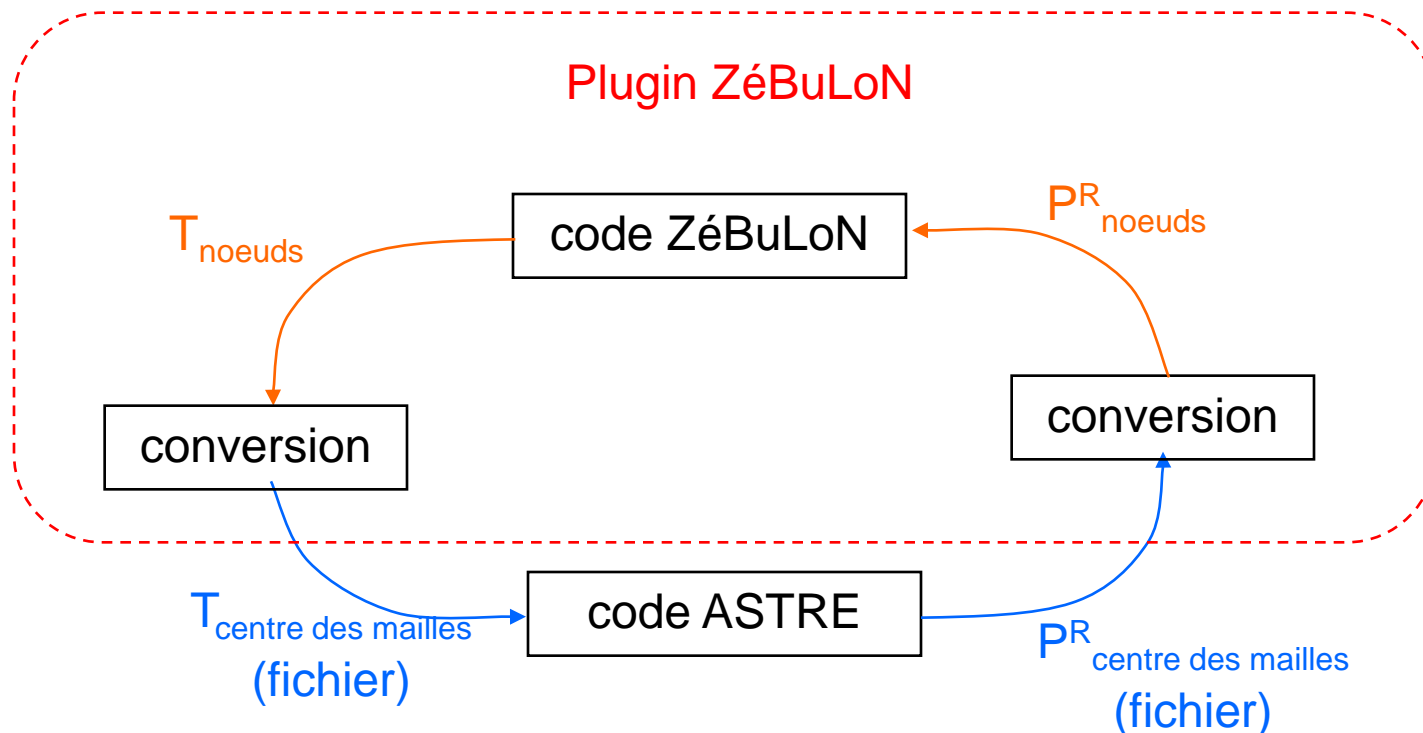
Méthodes de couplage partitionnées



retour sur innovation

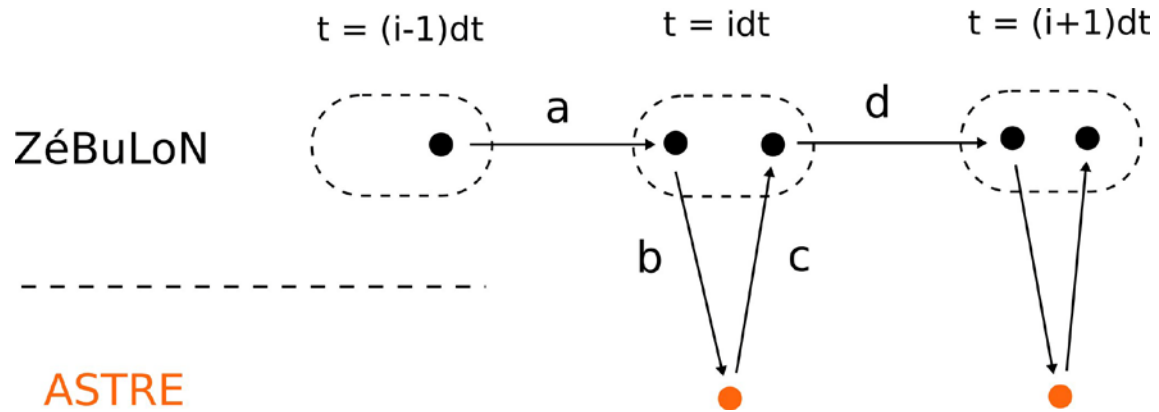
Couplage ASTRE - ZéBuLoN

- Présentation des moyens utilisés:
 - Transmission de données brutes entre les 2 codes par fichiers
 - Attente des résultats du code qui calcule (fichier de déverrouillage créé)

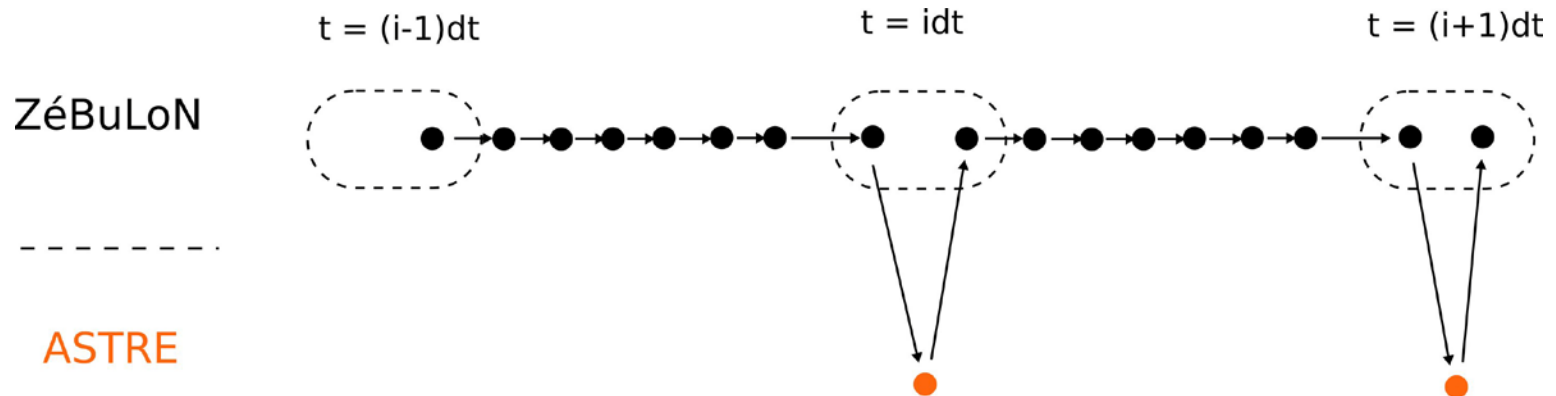


Couplage ASTRE - ZéBuLoN

- Méthodes de couplage:
 - couplage faible



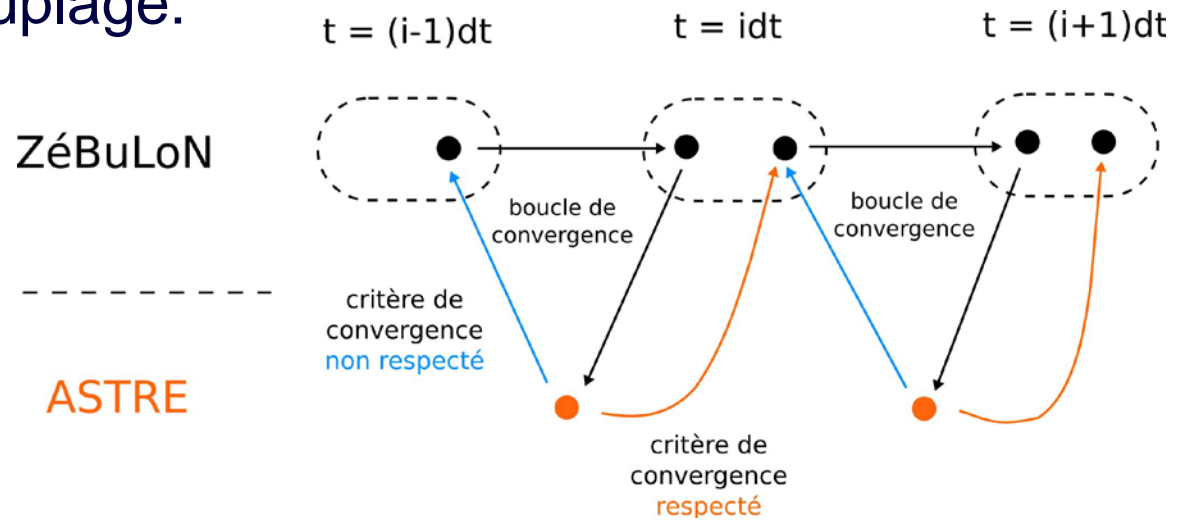
- sous-cyclage:



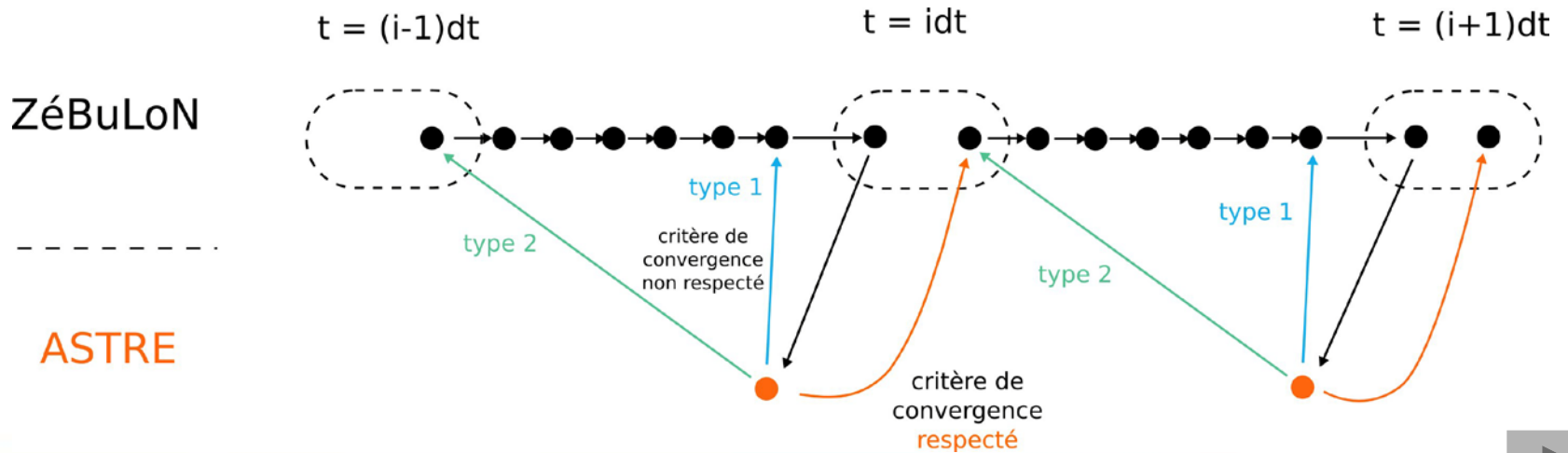
Couplage ASTRE - ZéBuLoN

- Méthodes de couplage:

- couplage fort**



- sous-cyclage:**



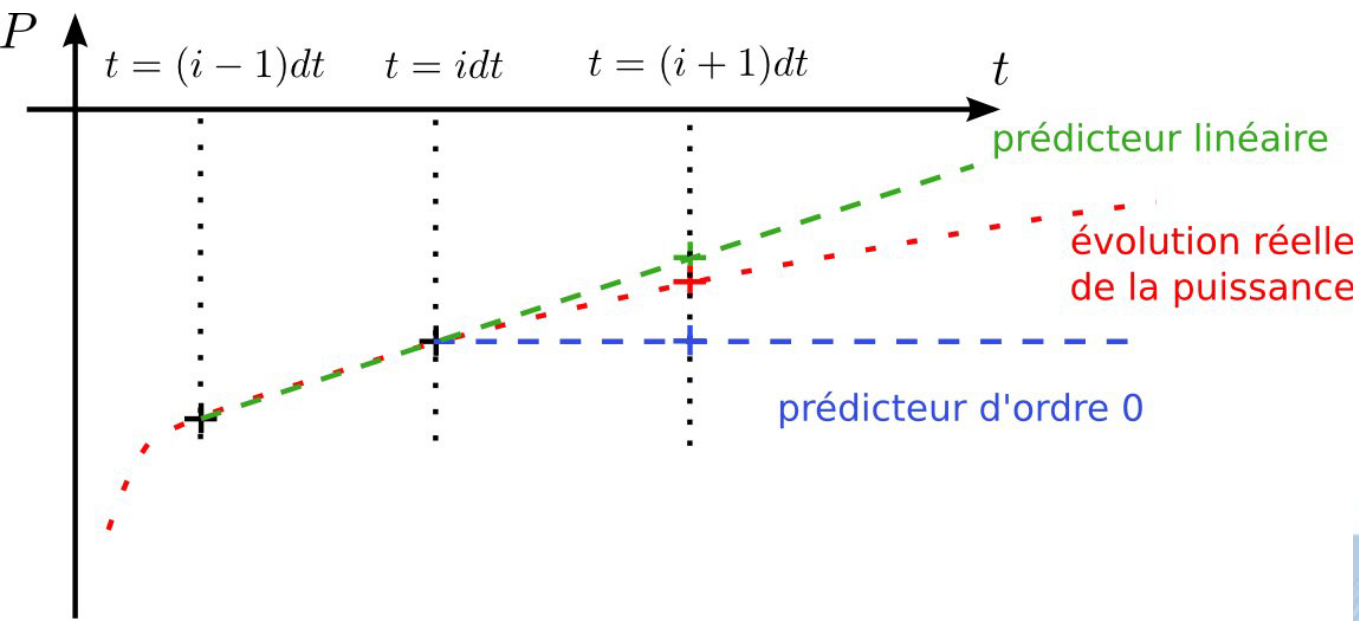
Couplage ASTRE - ZéBuLoN

- Prédicteurs:

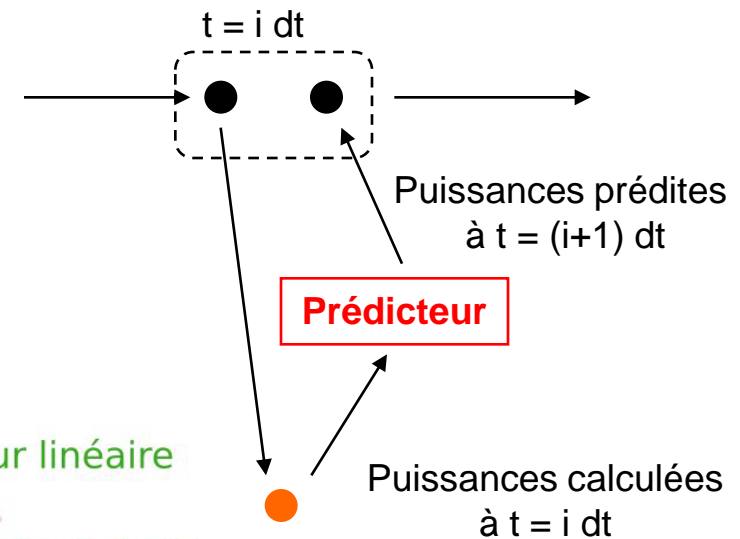
- Aide à la convergence entre les deux codes
- La prédiction s'effectue sur les **puissances radiatives** calculées par Astre

ordre 0: $\tilde{P}_{(i+1)\Delta t} = P_{i\Delta t}$

ordre 1: $\tilde{P}_{(i+1)\Delta t} = P_{i\Delta t} + \left. \frac{\partial P}{\partial t} \right|_{i\Delta t} \Delta t$



Exemple sur le **couplage faible**:



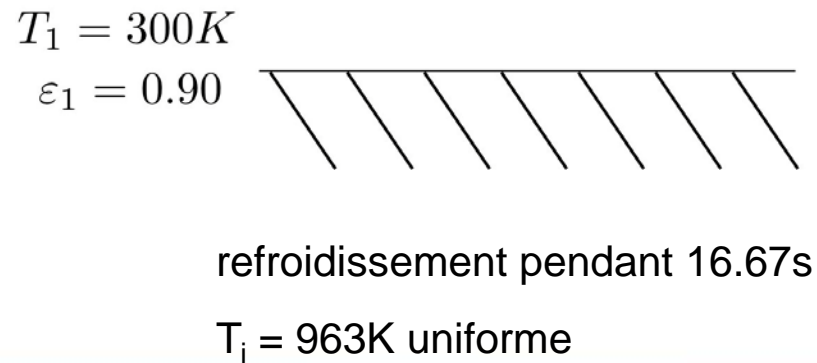
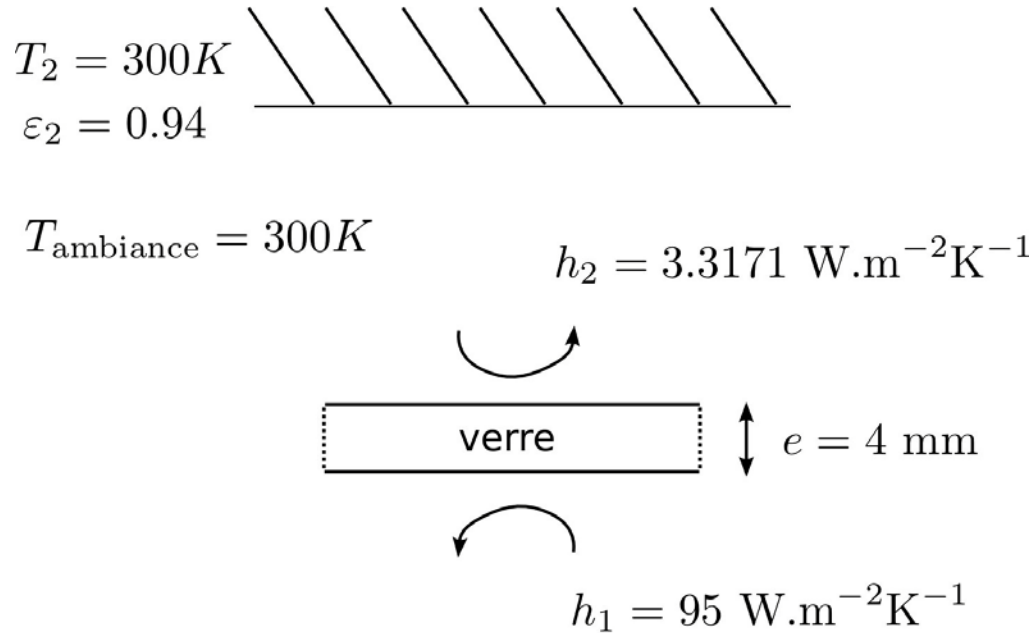


Validation en configuration 1D

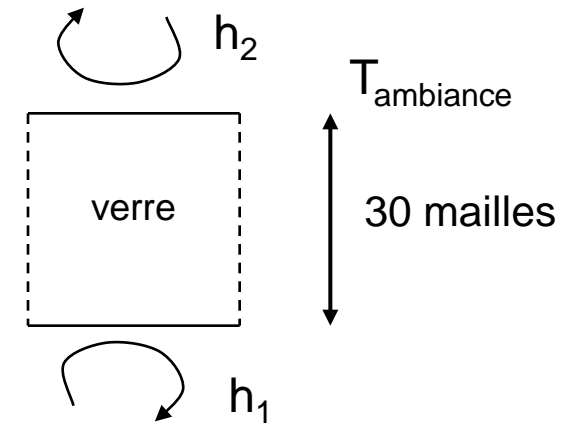


retour sur innovation

Cas de simulation 1D

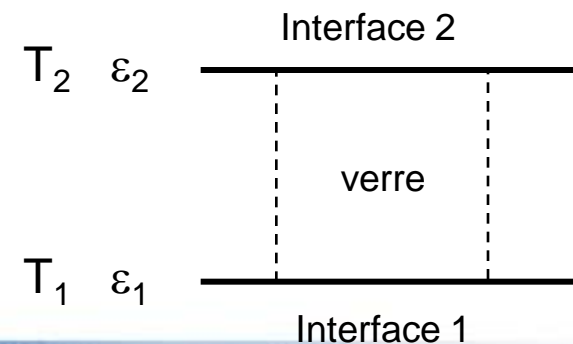


Code ZéBuLoN



$\Delta t_{\text{conduction}} = 0.1s$

Code ASTRE



Modélisation de la bande optiquement épaisse

$$\kappa = 100\,000\text{ m}^{-1}$$

- Convergence plus lente de la méthode de Monte Carlo, mais calcul possible.

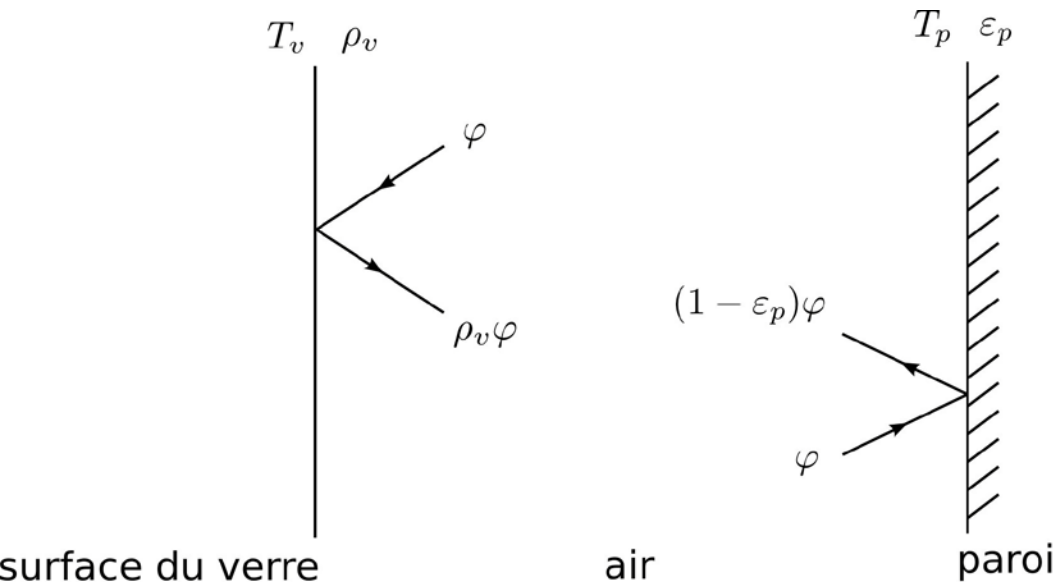


- Modélisation dans le code ZéBuLoN par une condition de flux surfacique imposé.

Modélisation de la bande optiquement épaisse

- Modélisation par ZéBuLoN:

- Flux surfacique imposé comme condition aux limites:

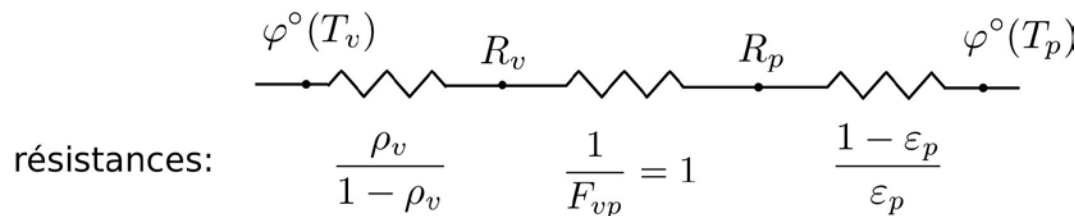


en incidence normale:

$$\rho_v = \frac{(1-n)^2}{(1+n)^2}$$

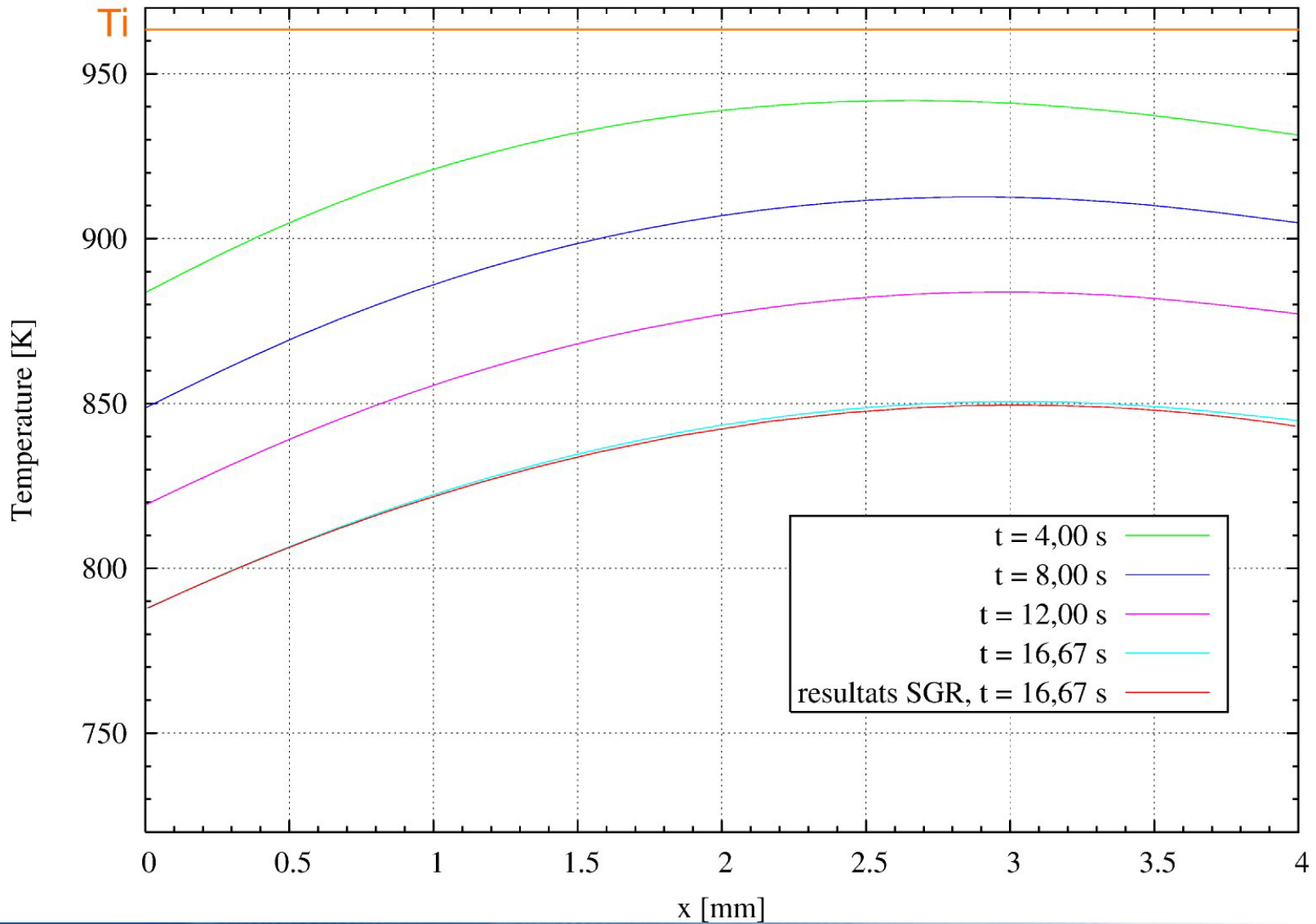
Flux perdu par le verre si $T_v > T_p$:

$$\varphi = \frac{\epsilon_p (1 - \rho_v)}{1 - \rho_v (1 - \epsilon_p)} \int_{v_1}^{v_2} [\pi L_v^0(T_v) - \pi L_v^0(T_p)] dv$$

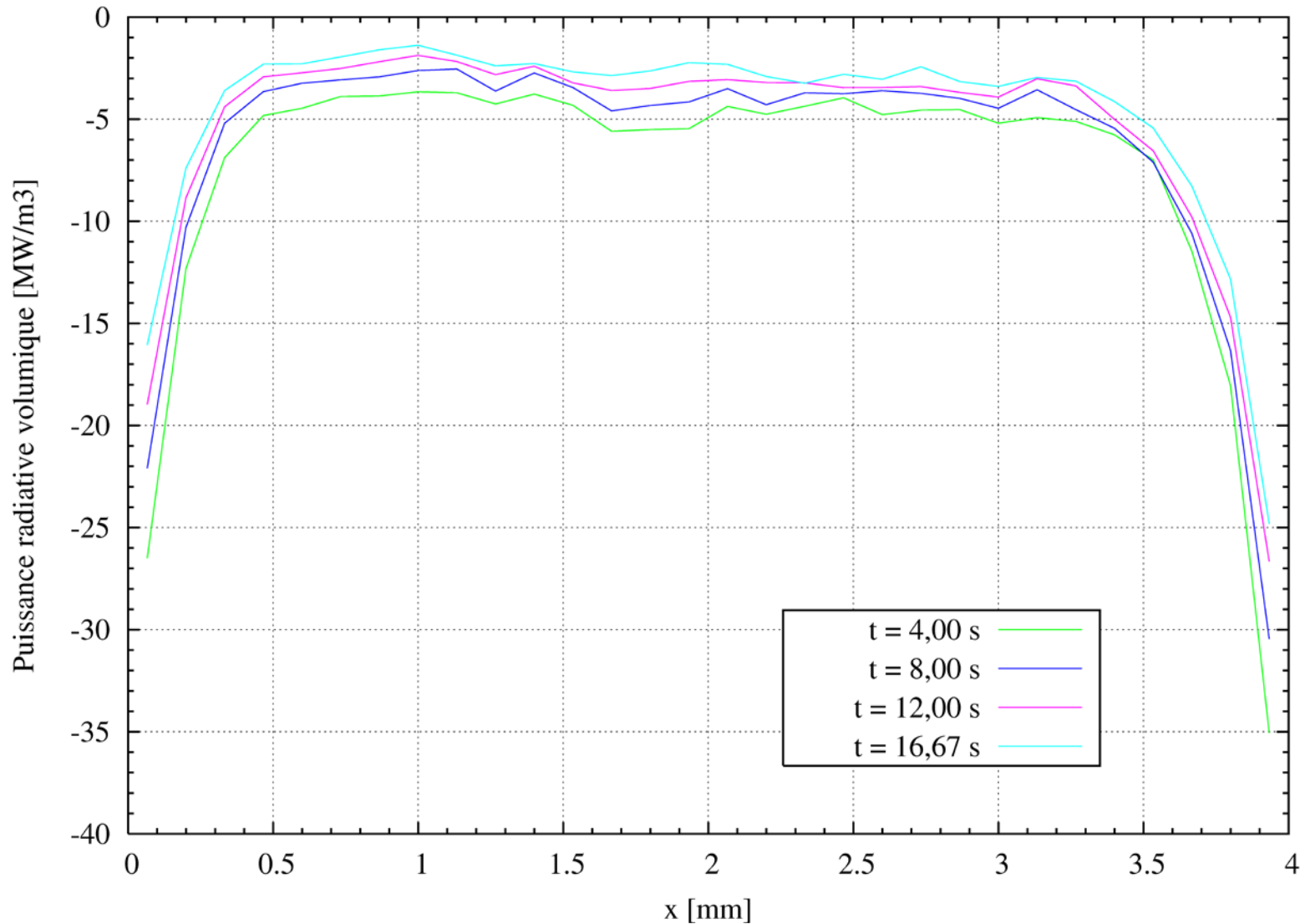


Remarque: prise en compte des réflexions multiples sur le verre, pour cette bande épaisse

Résultats

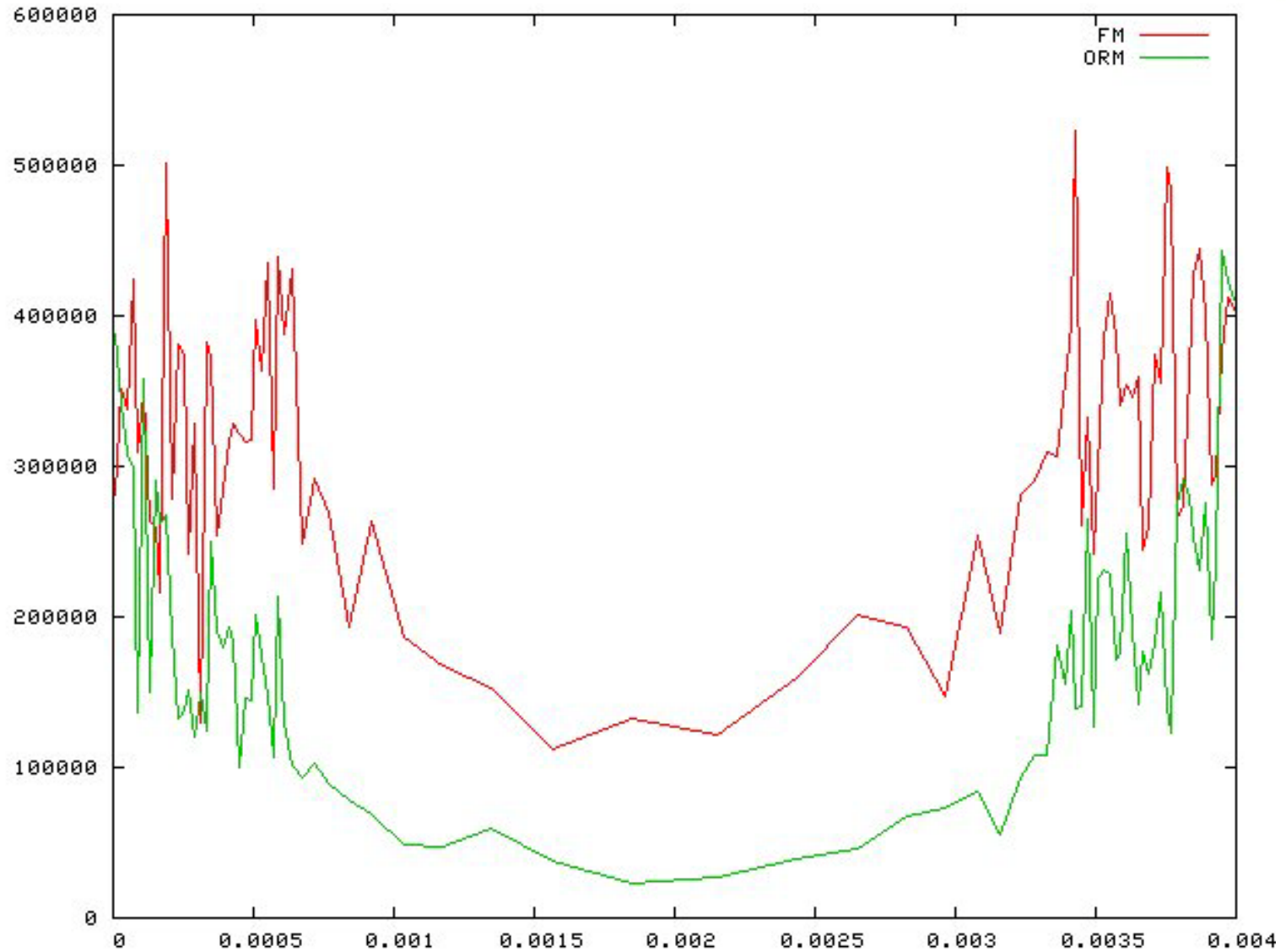


Résultats



Nombre de rayons tirés: 100 000 dans 30 mailles

Résultats: écarts types

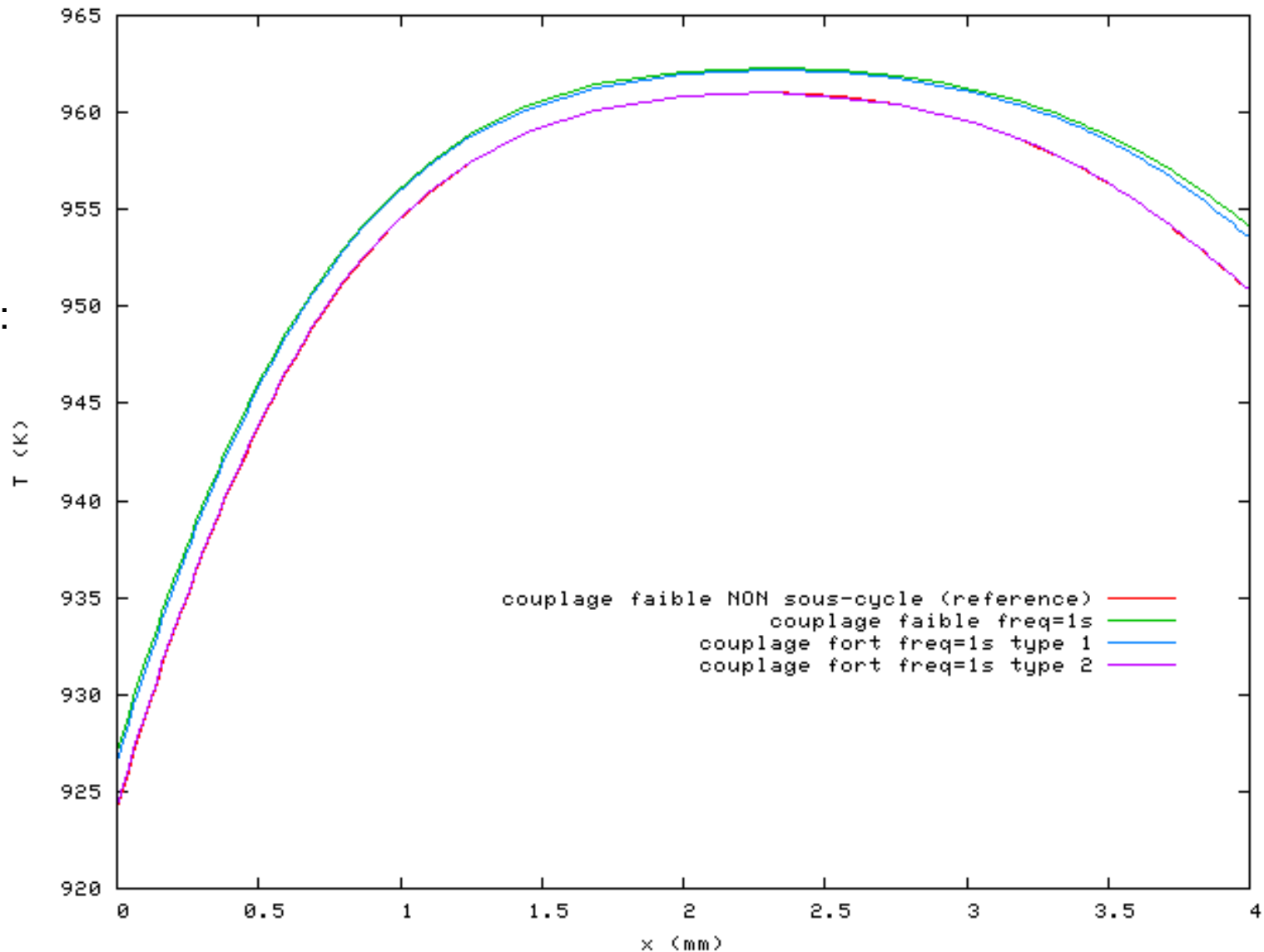


Optimisation du couplage:

Profils de température à 1s :

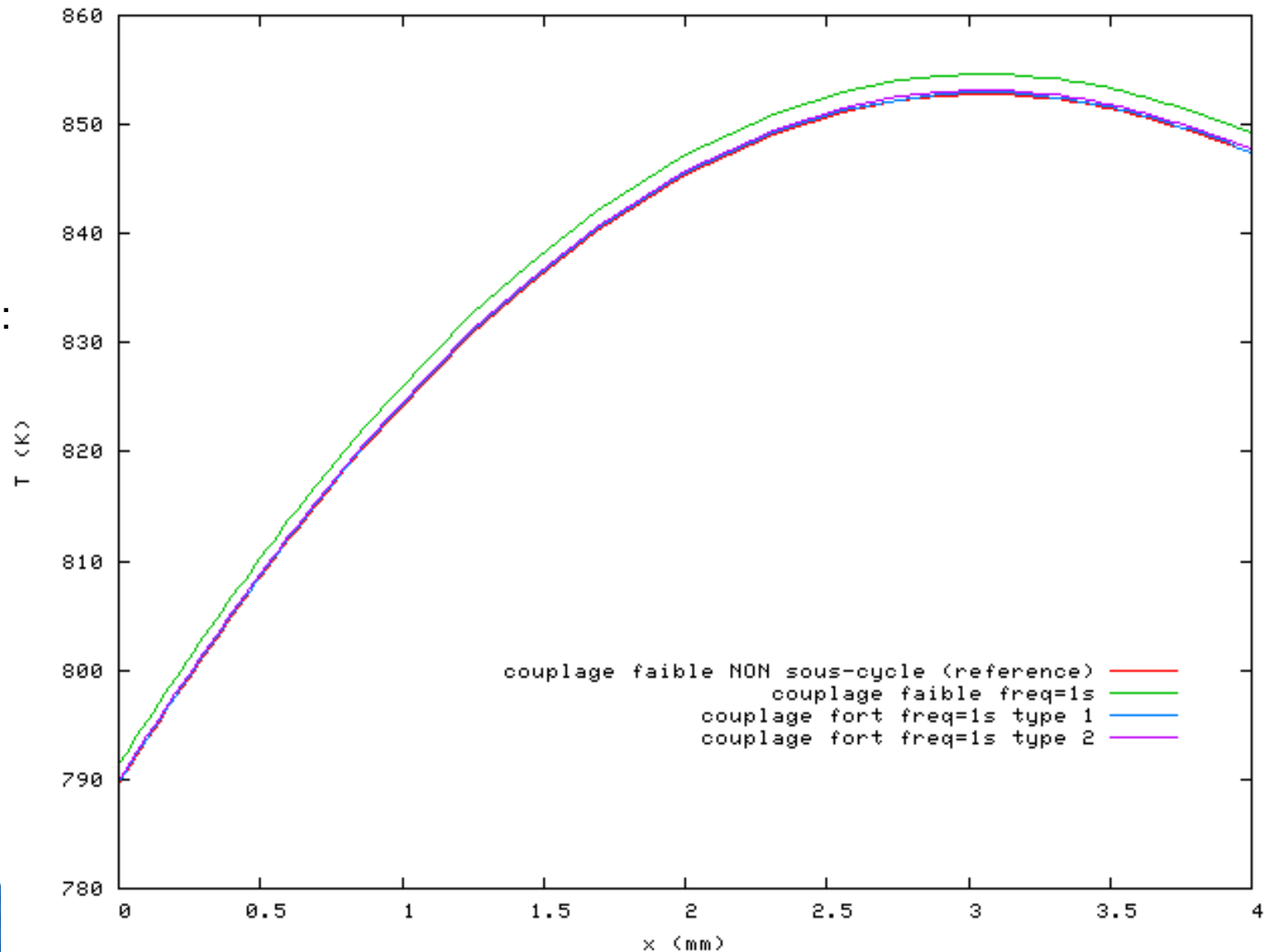
fréquence de couplage: 1s

erreur maximale: 0.4%



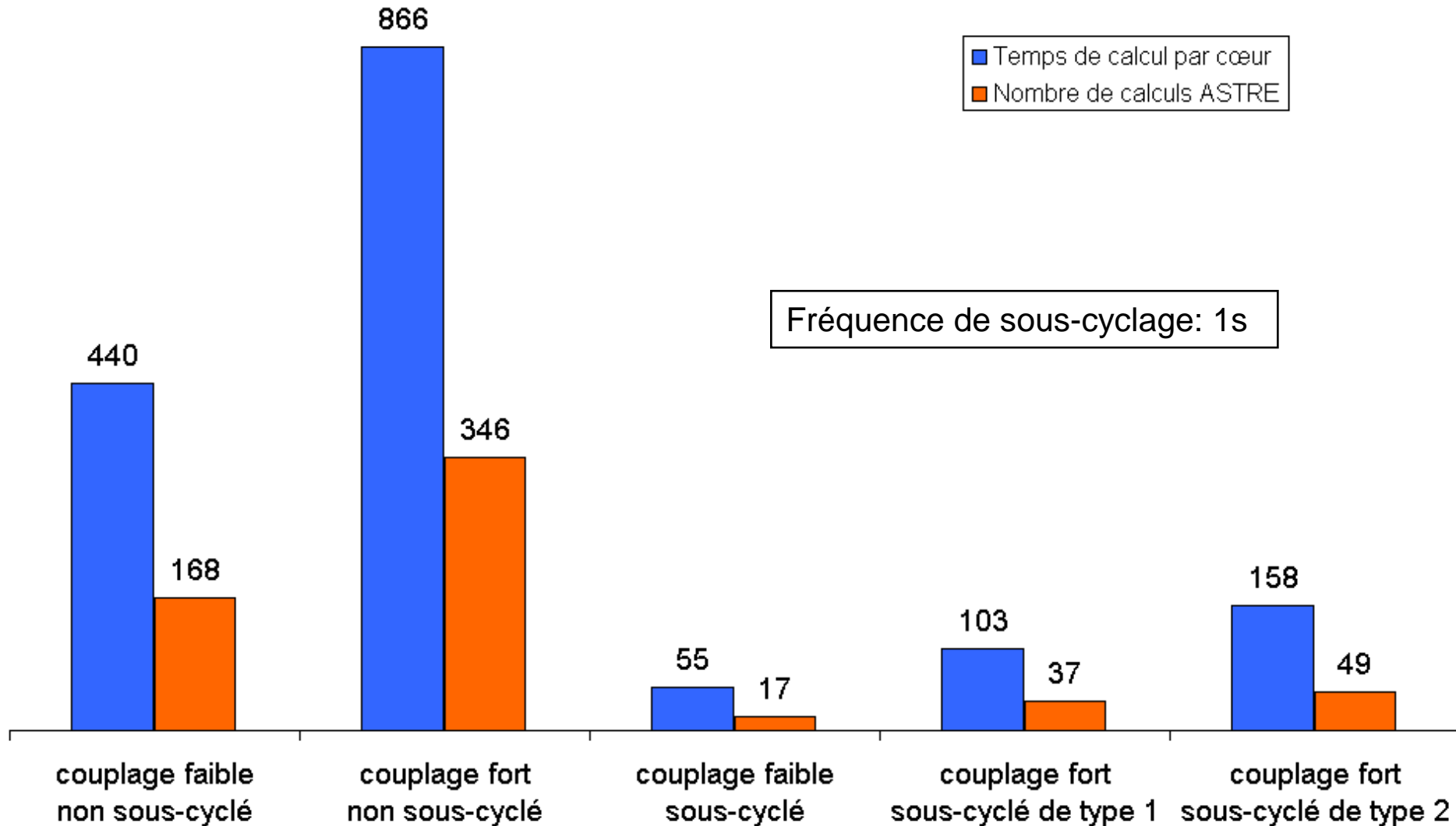
Optimisation du couplage: méthode de couplage

Profils de température à 16.67s :



Optimisation du temps de calcul

Calculs sur 32 cœurs



Conclusions

- Le calcul réalisé fournit des résultats précis.
- Les algorithmes de couplage ont permis une **forte réduction du temps de calcul** sans perdre de précision (0.4% maximum).
- Des calculs 3D industriels ont été réalisés avec succès (résultats confidentiels).



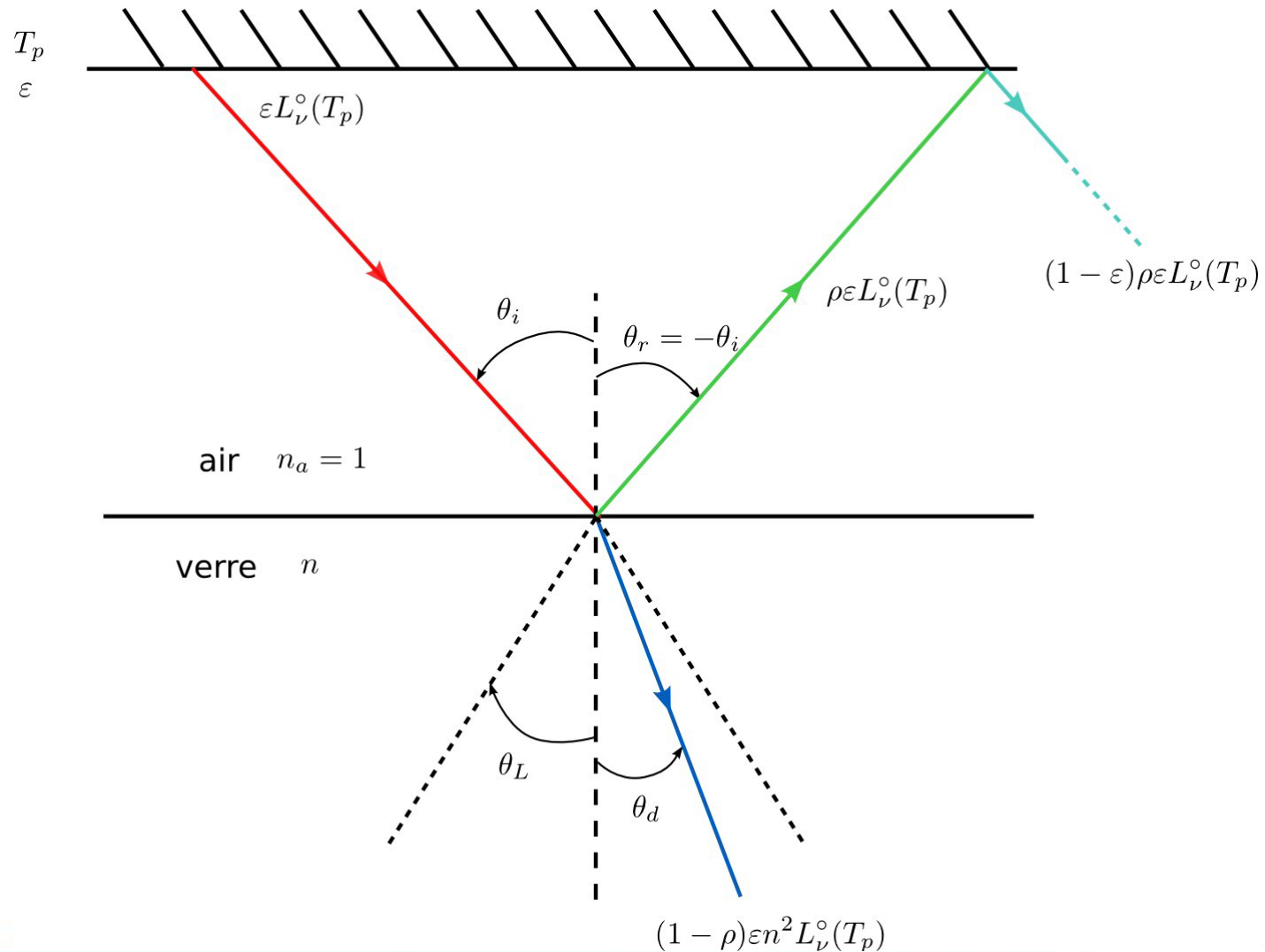
Condition de type *interface*



retour sur innovation

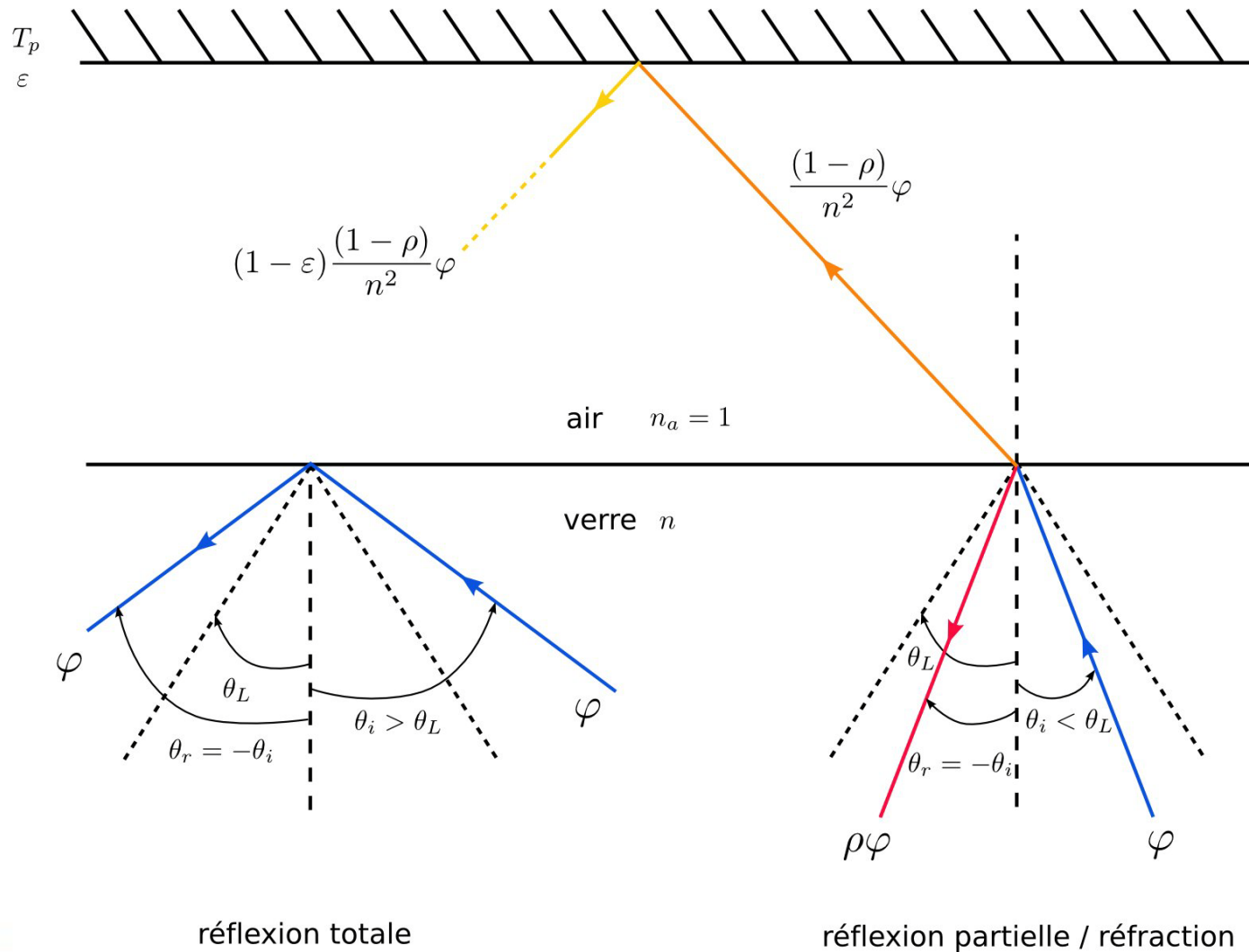
Phénomènes à l'interface air/verre

- Modélisation par condition aux limites *interface*:



Phénomènes à l'interface air/verre

- Modélisation par condition aux limites *interface*:





Détails sur le couplage



retour sur innovation

Couplage ASTRE - ZéBuLoN

- Critère de convergence pour **couplage fort**
 - Critère choisi sur les **puissances radiatives**
 - Calcul de l'erreur à l'itération k de la boucle de convergence:

dans une maille:
$$\varepsilon_k(x_i) = \frac{P_k(x_i) - P_{k-1}(x_i)}{P_k(x_i)}$$

sur toutes les mailles:
$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_k(x_i)}{N}$$

N : nombre total de mailles

Critère de convergence:
$$\bar{\varepsilon}_k \leq 1\%$$