



Techniques de traçage pour la méthode des caractéristiques appliquée à la résolution de l'équation du transport des neutrons

François FÉVOTTE

thèse effectuée sous la direction de :
Richard SANCHEZ,
Simone SANTANDREA

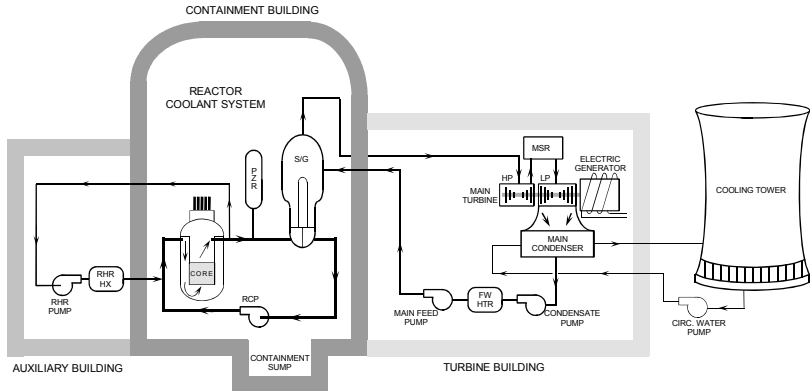
Commissariat à l'Énergie Atomique
CEA/DEN/DANS/DM2S/SERMA/LTSD

8 octobre 2008
Salle des conseils, Institut de Physique Nucléaire d'Orsay



Contexte

Enjeux de la simulation neutronique





Contexte

Enjeux de la simulation neutronique

- ▶ Conception :
 - ▶ assemblages combustibles
 - ▶ dimensionnement du cœur
 - ▶ dossiers de sûreté des centrales
- ▶ Exploitation :
 - ▶ plans de chargements
 - ▶ confrontation avec les détecteurs
- ▶ Démantèlement :
 - ▶ radioprotection
 - ▶ transport des déchets



Plan

Introduction

- Équation du transport des neutrons
- La méthode des caractéristiques

Méthode des macrobandes

- Problèmes de discrétisation et de traçage
- Principe de la méthode des macrobandes
- Résultats numériques

Traçage en géométries périodiques

- Position du problème
- Construction de traçage périodiques
- Résultats numériques



Transport neutronique

Variables et inconnues

► 7 variables :

- \vec{r} : position (3 coord.)
- $\vec{\Omega}$: direction (2 coord.)
- E : energie (ou vitesse : $E = \frac{1}{2} m v^2$)
- t : temps

► Densité neutronique : $N(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) d\vec{r} d\vec{\Omega} dE dt$ $\psi = v N$
 nombre de neutrons présents dans un volume élémentaire.

► Taux de réaction : $\tau(\vec{r}, E, t) d\vec{r} dE dt$ $\tau = \Sigma \psi$
 nombre de réactions se produisant dans un volume élémentaire.



Transport neutronique

Équation de Boltzmann

$$\underbrace{\frac{1}{v} \frac{d\psi}{dt}} =$$

accumulation

$$= 0$$

► ψ : flux neutronique



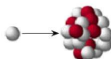
Transport neutronique

Équation de Boltzmann

$$\underbrace{\frac{1}{v} \frac{d\psi}{dt}}_{\text{accumulation}} = \underbrace{-\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{r}} \psi}_{\text{transport}}$$

accumulation

$$= 0$$



- ▶ ψ : flux neutronique
- ▶ v : vitesse des neutrons
- ▶ $\vec{\Omega}$: direction de propagation



Transport neutronique

Équation de Boltzmann

$$\underbrace{\frac{1}{v} \frac{d\psi}{dt}}_{\text{accumulation}} = \underbrace{-\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{r}} \psi}_{\text{transport}} \underbrace{-\Sigma \psi}_{\text{interactions}}$$

accumulation

= 0



- ▶ ψ : flux neutronique
- ▶ v : vitesse des neutrons
- ▶ $\vec{\Omega}$: direction de propagation
- ▶ Σ : section efficace (probabilité d'interaction avec un noyau)



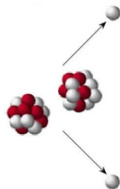
Transport neutronique

Équation de Boltzmann

$$\underbrace{\frac{1}{v} \frac{d\psi}{dt}}_{\text{accumulation}} = \underbrace{-\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{r}} \psi}_{\text{transport}} \underbrace{-\Sigma \psi}_{\text{interactions}} + \underbrace{S}_{\text{sources}}$$

$= 0$

– transfert
– fission
– (externes)



- ▶ ψ : flux neutronique
- ▶ v : vitesse des neutrons
- ▶ $\vec{\Omega}$: direction de propagation
- ▶ Σ : section efficace (probabilité d'interaction avec un noyau)



Transport neutronique

Discrétisation

- ▶ variable énergétique : formalisme multigroupe

$$\Sigma \rightarrow \Sigma_g$$

- ▶ variable angulaire : formule S_N

$$\Omega \rightarrow \Omega_d$$

- ▶ équation multigroupe S_N :

$$\left(\vec{\Omega}_d \cdot \vec{\nabla}_{\vec{r}} + \Sigma_g \right) \psi = Q_{g,d}$$



Transport neutronique

Discrétisation

- ▶ variable énergétique : formalisme multigroupe

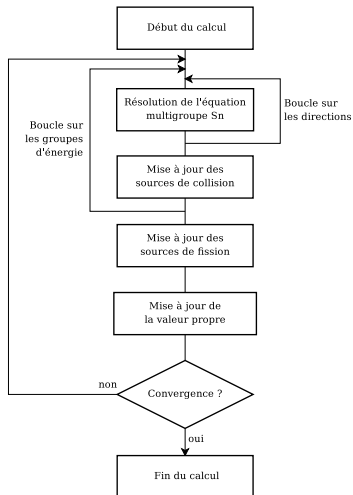
$$\Sigma \rightarrow \Sigma_g$$

- ▶ variable angulaire : formule S_N

$$\Omega \rightarrow \Omega_d$$

- ▶ itérations sur les sources :

$$\left(\vec{\Omega}_d \cdot \vec{\nabla}_{\vec{r}} + \Sigma_g \right) \psi^{i+1} = Q_{g,d}^i$$

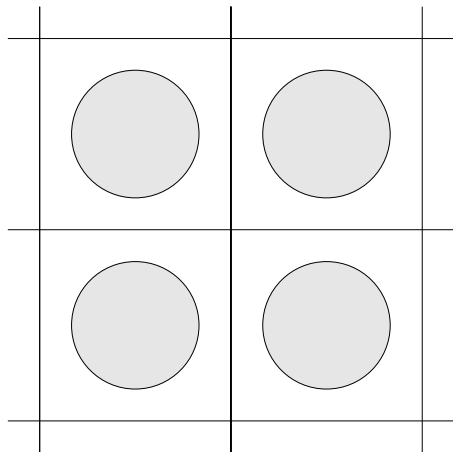




La méthode des caractéristiques

Approche classique

- Découpage du domaine de calcul en régions.





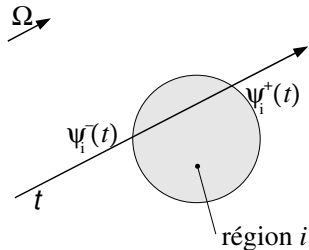
La méthode des caractéristiques

Approche classique

- ▶ Découpage du domaine de calcul en régions.
- ▶ Appui sur des trajectoires neutroniques rectilignes.

- ▶ Lors de la traversée d'une région :

$$\psi_i^+(t) = \psi_i^-(t)$$





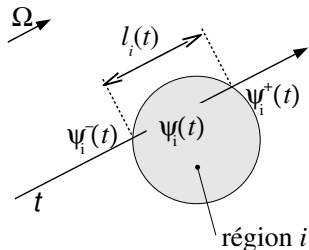
La méthode des caractéristiques

Approche classique

- ▶ Découpage du domaine de calcul en régions.
- ▶ Appui sur des trajectoires neutroniques rectilignes.
- ▶ Hypothèse : régions homogènes
 - ▶ $\Sigma(\vec{r}) = \Sigma_i, \quad \forall \vec{r} \in \text{région } i$

- ▶ Lors de la traversée d'une région :

$$\psi_i^+(t) = \psi_i^-(t) \underbrace{e^{-\Sigma_i l_i(t)}}_{\text{coefficient de transmission}}$$





La méthode des caractéristiques

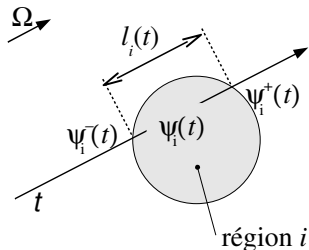
Approche classique

- ▶ Découpage du domaine de calcul en régions.
- ▶ Appui sur des trajectoires neutroniques rectilignes.
- ▶ Hypothèse : régions homogènes

- ▶ $\Sigma(\vec{r}) = \Sigma_i, \quad \forall \vec{r} \in \text{région } i$
- ▶ $q(\vec{r}) = q_i$

- ▶ Lors de la traversée d'une région :

$$\psi_i^+(t) = \psi_i^-(t) \underbrace{e^{-\Sigma_i l_i(t)}}_{\text{coefficient de transmission}} + \text{sources}$$

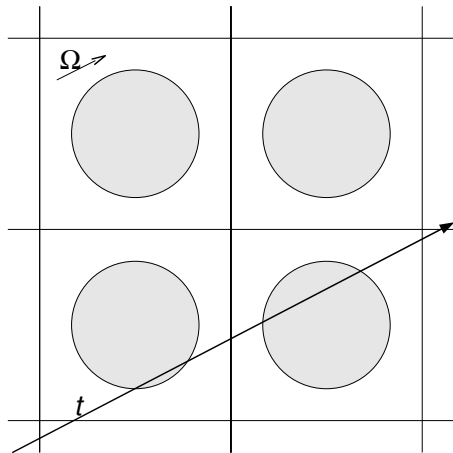




La méthode des caractéristiques

Approche classique

- ▶ Trajectoires rectilignes traversant tout le domaine

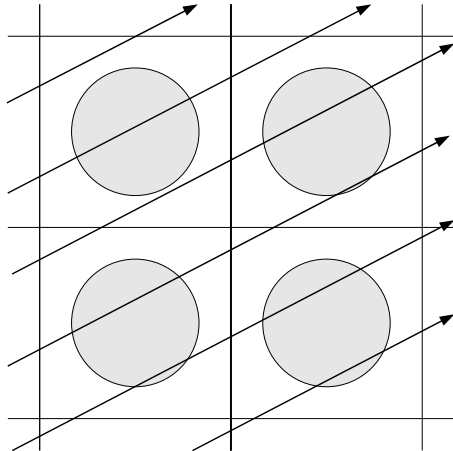




La méthode des caractéristiques

Approche classique

- ▶ Trajectoires rectilignes traversant tout le domaine
- ▶ Plusieurs trajectoires parallèles pour recouvrir toutes les régions





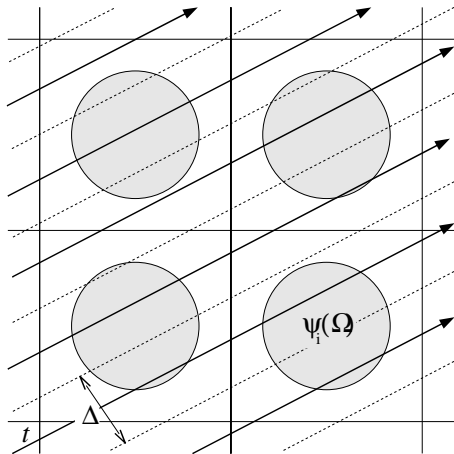
La méthode des caractéristiques

Approche classique

- ▶ Trajectoires rectilignes traversant tout le domaine
- ▶ Plusieurs trajectoires parallèles pour recouvrir toutes les régions
- ▶ Moyenne du flux entre les trajectoires recouvrant une région :

formule d'intégration transverse

$$\psi_i(\vec{\Omega}) = \frac{\overbrace{\sum_{t \cap i} \Delta l_i(t) \psi_i(t)}^{\text{formule d'intégration transverse}}}{\sum_{t \cap i} \Delta l_i(t)}$$





Plan

Introduction

Équation du transport des neutrons
La méthode des caractéristiques

Méthode des macrobandes

Problèmes de discrétisation et de traçage
Principe de la méthode des macrobandes
Résultats numériques

Traçage en géométries périodiques

Position du problème
Construction de traçage périodiques
Résultats numériques

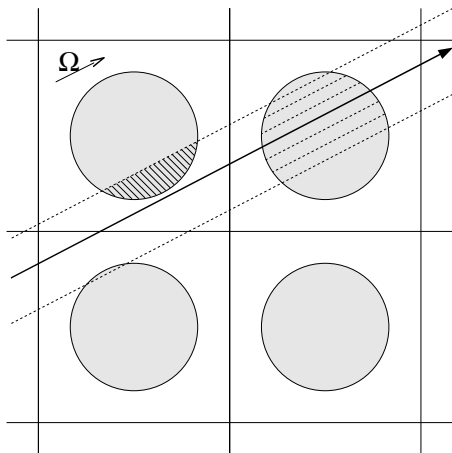


Problèmes de discrétisation et de traçage

Limites de la méthode traditionnelle

Approximations dues au traçage :

- ▶ discontinuités matérielles
- ▶ variation transverse des longueurs des cordes
- ▶ variation transverse du flux

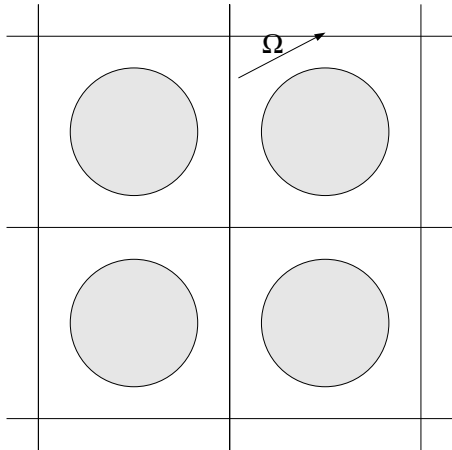




Problèmes de discrétisation et de traçage

Variantes de la méthode traditionnelle

Projection **globale** de toutes les discontinuités :



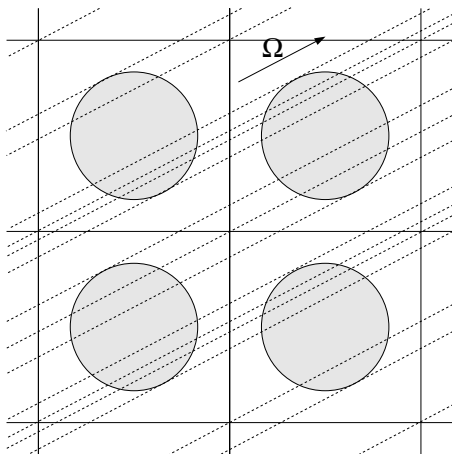


Problèmes de discrétisation et de traçage

Variantes de la méthode traditionnelle

Projection **globale** de toutes les discontinuités :

- ▶ génère un grand nombre de bandes
- ▶ solution plus chère que le traçage traditionnel



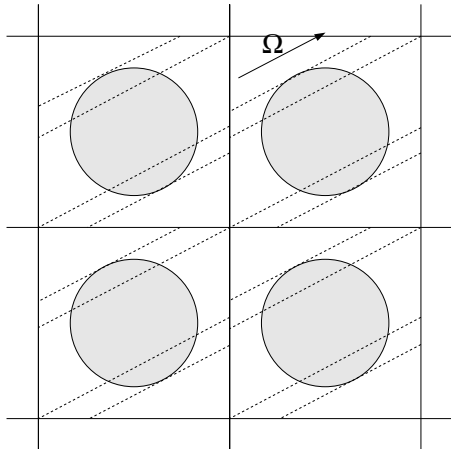


Problèmes de discrétisation et de traçage

Variantes de la méthode traditionnelle

Projection **locale** des discontinuités :
[A. Yamamoto *et al.*, M&C 2005]

- ▶ nécessite un découpage en cellules
- ▶ pas de contrôle de la dispersion numérique



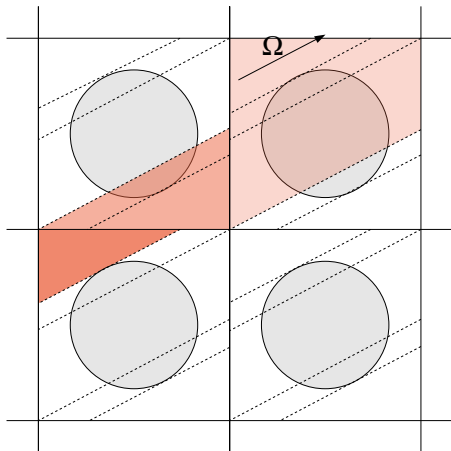


Problèmes de discrétisation et de traçage

Variantes de la méthode traditionnelle

Projection **locale** des discontinuités :
[A. Yamamoto *et al.*, M&C 2005]

- ▶ nécessite un découpage en cellules
- ▶ pas de contrôle de la dispersion numérique



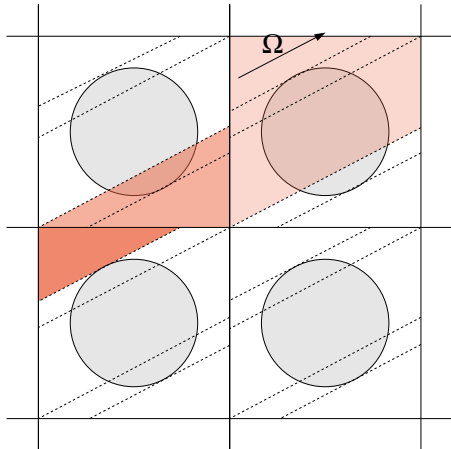


Problèmes de discrétisation et de traçage

Variantes de la méthode traditionnelle

Objectifs de la méthode des macrobandes :

- ▶ prendre en compte les discontinuités matérielles
 - ▶ limiter le nombre de bandes générées
 - ▶ limiter la dispersion numérique
- ▶ prendre en compte la variation transverse des longueurs de cordes



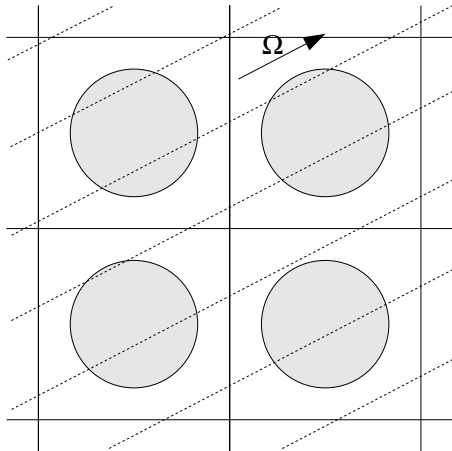


La méthode des macrobandes

Éviter les discontinuités

Nouvelle méthode de traçage :

1. définir un maillage transverse à pas constant



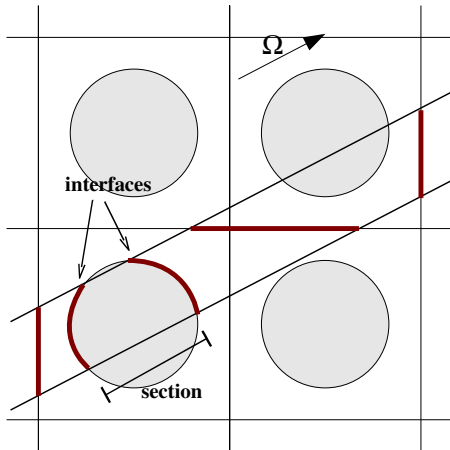


La méthode des macrobandes

Éviter les discontinuités

Nouvelle méthode de traçage :

1. définir un maillage transverse à pas constant
2. séparer chaque bande en sections



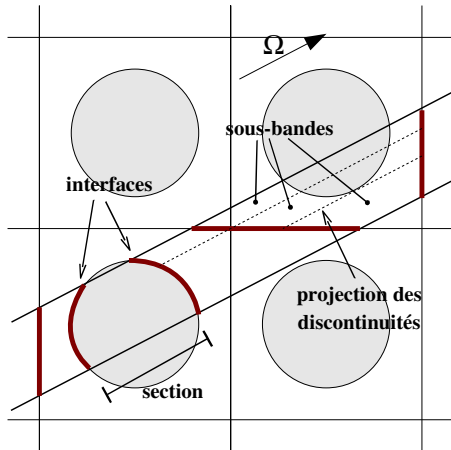


La méthode des macrobandes

Éviter les discontinuités

Nouvelle méthode de traçage :

1. définir un maillage transverse à pas constant
2. séparer chaque bande en sections
3. projeter les discontinuités localement



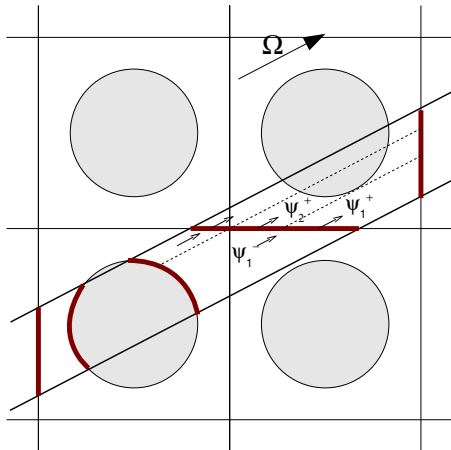


La méthode des macrobandes

Éviter les discontinuités

Nouvelle méthode de traçage :

1. définir un maillage transverse à pas constant
2. séparer chaque bande en sections
3. projeter les discontinuités localement
4. redistribuer le flux aux interfaces





La méthode des macrobandes

Redistribution du flux aux interfaces

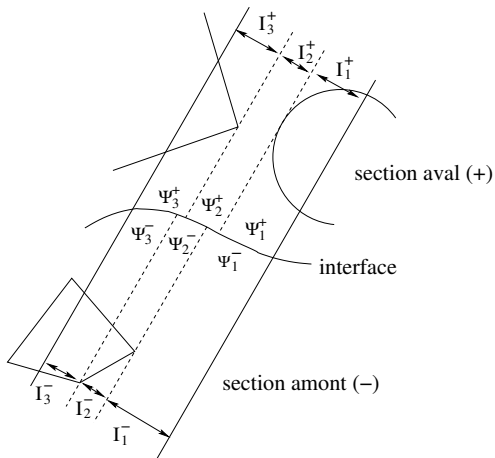
Principe de la redistribution aux interfaces :

- ▶ hypothèse de flux plat dans chaque sous-bande
- ▶ bilan conservatif
- ▶ formule aussi peu dispersive que possible

$$\psi_k^+ = \sum_{k'} \frac{\Delta_{k,k'}}{\Delta_k} \psi_{k'}^-$$

$$\Delta_k = l(I_k^+)$$

$$\Delta_{k,k'} = l(I_k^+ \cap I_{k'}^-)$$



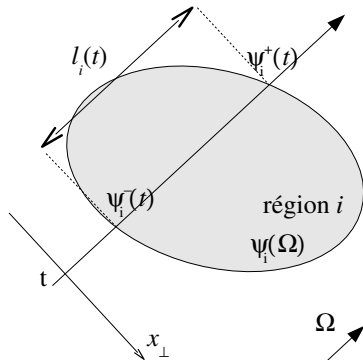


La méthode des macrobandes

Formule d'intégration transverse

- ▶ Équation de transmission :

$$\psi_i^+(t) = e^{-\Sigma_i l_i(t)} \psi_i^-(t) + \text{sources}$$





La méthode des macrobandes

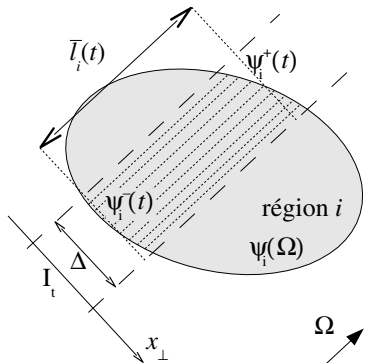
Formule d'intégration transverse

- ▶ Équation de transmission :

$$\psi_i^+(t) = T_i(t) \psi_i^-(t) + \text{sources}$$

- ▶ Coefficient de transmission moyen :

$$T_i(t) = \frac{1}{\Delta} \int_{I_t} e^{-\Sigma_i l_i(x_\perp)} dx_\perp$$





La méthode des macrobandes

Formule d'intégration transverse

- ▶ Équation de transmission :

$$\psi_i^+(t) = T_i(t) \psi_i^-(t) + \text{sources}$$

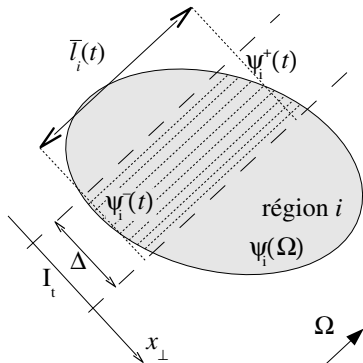
- ▶ Coefficient de transmission moyen :

$$T_i(t) = \frac{1}{\Delta} \int_{I_t} e^{-\Sigma_i l_i(x_\perp)} dx_\perp$$

- ▶ Développement de Taylor pour le terme exponentiel :

$$T_i(t) \simeq e^{-\Sigma_i \bar{l}_i(t)} \sum_{p=1}^{n_k} \alpha_p \Sigma_i^p$$

$$\alpha_p = \frac{(-1)^p}{\Delta p!} \int_{I_t} [l_i(x_\perp) - \bar{l}_i(t)]^p dx_\perp$$





Résultats numérique

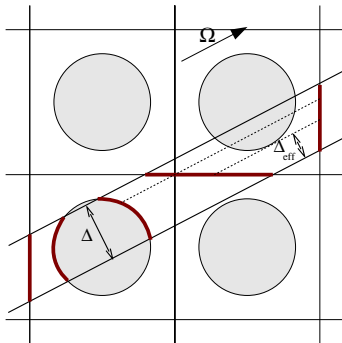
Comparaison des deux méthodes

Méthodologie de comparaison entre la méthode “classique” et la méthode des macrobandes :

- ▶ comparaison des taux d'absorption
- ▶ calcul de référence : méthode “classique”, $\Delta = 5.10^{-4}$ cm
- ▶ utilisation du pas de traçage effectif pour les macrobandes :

$$\Delta_{eff} = \frac{\Delta}{\bar{n}_{sb}}$$

\bar{n}_{sb} : nombre moyen de sous-bandes par section.





Résultats numérique

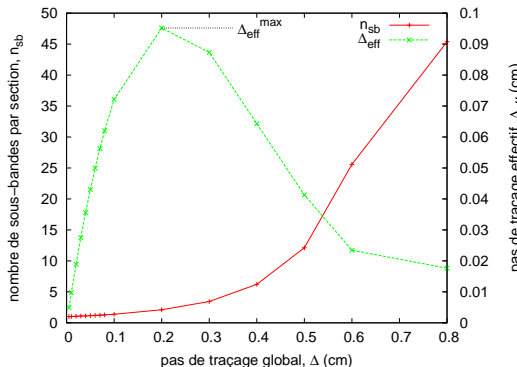
Comparaison des deux méthodes

Méthodologie de comparaison entre la méthode “classique” et la méthode des macrobandes :

- ▶ comparaison des taux d'absorption
- ▶ calcul de référence : méthode “classique”, $\Delta = 5.10^{-4}$ cm
- ▶ utilisation du pas de traçage effectif pour les macrobandes :

$$\Delta_{eff} = \frac{\Delta}{\bar{n}_{sb}}$$

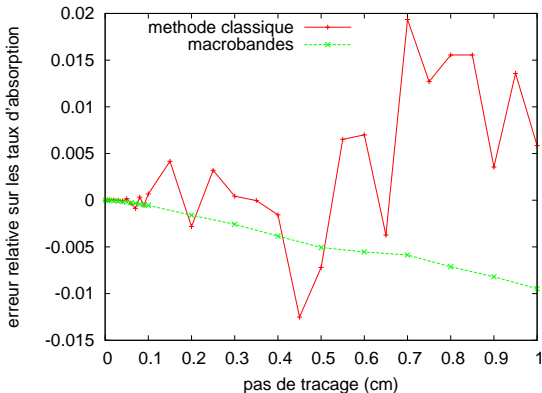
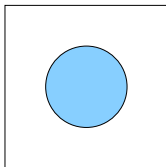
\bar{n}_{sb} : nombre moyen de sous-bandes par section.





Résultats numériques

Cellule REP simplifiée

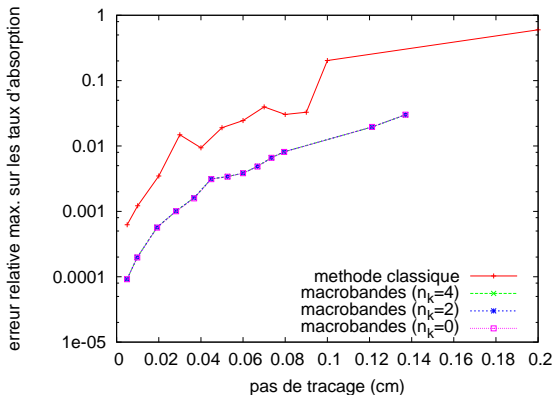
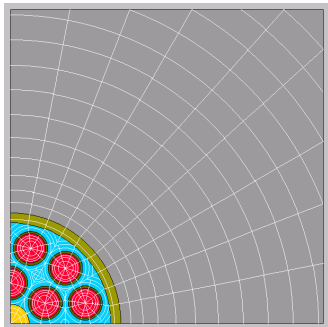


Comparaison entre la méthode “classique” et la méthode des macrobandes.
Cellule combustible REP simplifiée.



Résultats numériques

Assemblage RBMK

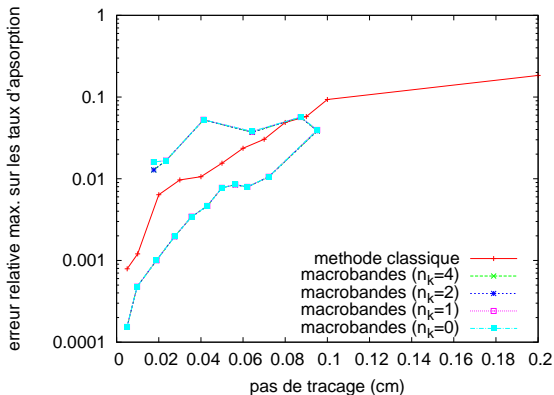
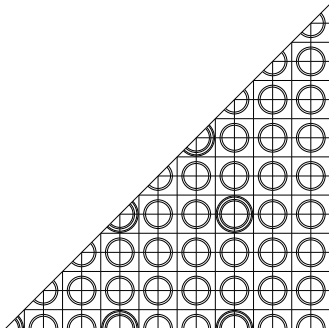


Comparaison entre la méthode “classique” et la méthode des macrobandes.
Cellule RBMK.



Résultats numériques

Assemblage REP



Comparaison entre la méthode “classique” et la méthode des macrobandes.
Assemblage REP barré.



Conclusions – Perspectives

- ▶ Précision de la méthode des caractéristiques
 - ▶ Gain en précision avec la méthode des macrobandes :
 - ⇒ précision de la méthode des caractéristiques limitée par les problèmes d'intégration transverse.
 - ▶ Impact négligeable du développement de Taylor (n_k) :
 - ⇒ cause principale d'erreur : discontinuités matérielles.
- ▶ Résultats numériques obtenus avec la méthode des macrobandes :
 - ▶ à précision constante : jusqu'à 6× moins de bandes ;
 - ▶ à nombre de bandes constant : 2 à 3× plus d'opérations ;
 - ▶ jusqu'à 30 – 50% de gains en termes de temps de calcul.
- ▶ Perspectives :
 - ▶ éliminer les redistributions de flux
[Santandrea, *en cours de soumission*];
 - ▶ travailler sur l'hypothèse de flux plat.



Plan

Introduction

Équation du transport des neutrons
La méthode des caractéristiques

Méthode des macrobandes

Problèmes de discrétisation et de traçage
Principe de la méthode des macrobandes
Résultats numériques

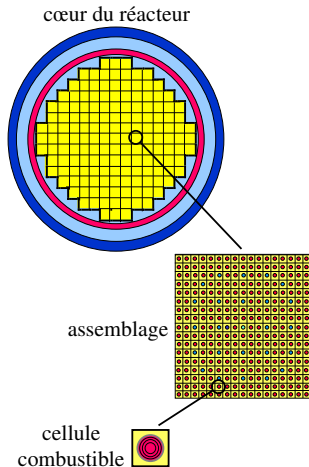
Traçage en géométries périodiques

Position du problème
Construction de traçage périodiques
Résultats numériques



Traçage en géométries périodiques

Réacteur à eau pressurisée



Remarques sur la géométrie :

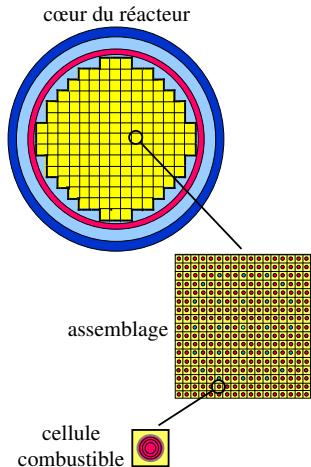
- ▶ géométrie fortement multi-échelle
- ▶ présence de réseaux réguliers à tous les niveaux
- ▶ présence de symétries fortes
- ▶ ...mais tout n'est pas périodique non plus (réflecteur)

⇒ Est-il possible de ne construire le traçage que sur une partie minimale du domaine ?



Traçage en géométries périodiques

Réacteur à eau pressurisée



⇒ Est-il possible de ne construire le traçage que sur une partie minimale du domaine ?

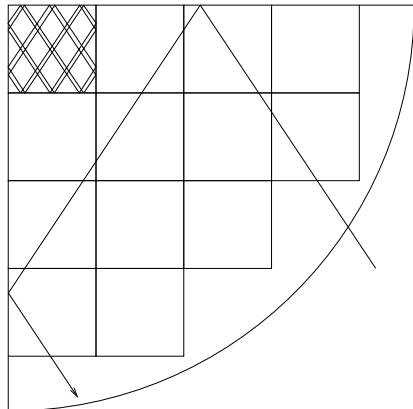
Enjeux :

- ▶ réduction de la taille du traçage
- ▶ particulièrement utile/nécessaire pour le 3D



Traçage en géométries périodiques

Objectifs



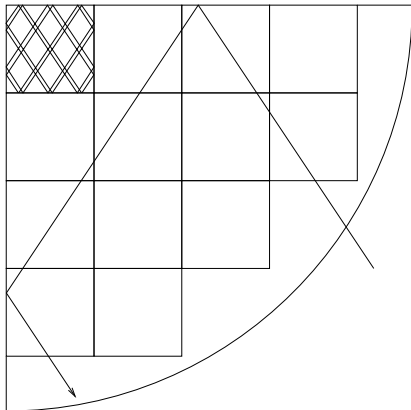
▶ Objectifs :

- ▶ stocker le minimum d'information nécessaire
- ▶ permettre de traiter des morceaux non-périodiques
- ▶ recouvrir uniformément le domaine
- ▶ impact nul sur la précision
- ▶ impact faible sur le temps de calcul



Traçage en géométries périodiques

Objectifs

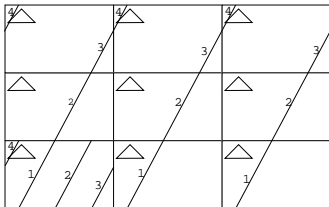


- ▶ Contraintes sur le traçage local :
 - ▶ nombre fini de segments
 - ▶ compatibilité avec les translations du réseau
 - ▶ compatibilité avec les réflexions des conditions aux limites
 - ▶ raccord avec un traçage à pas constant dans le réflecteur



Traçage en géométries périodiques

État de l'art



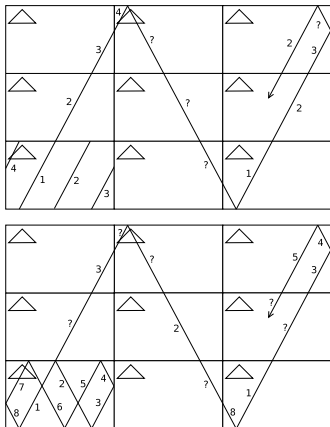
► réseaux infinis

- connus depuis longtemps
- trajectoires cycliques ou ergodiques
- condition sur la direction $\vec{\Omega}$



Traçage en géométries périodiques

État de l'art



► réseaux infinis

- connus depuis longtemps
- trajectoires cycliques ou ergodiques
- condition sur la direction $\vec{\Omega}$

► réseaux avec conditions aux limites

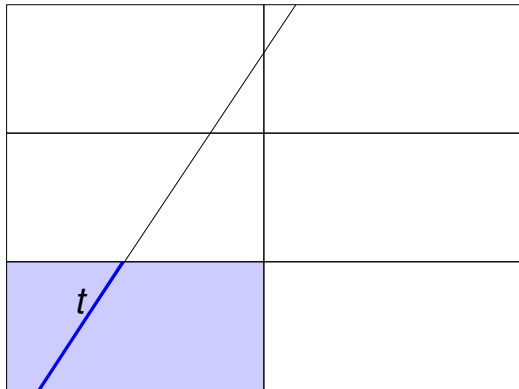
- plus complexes à traiter
- mêmes conditions de trajectoires cycliques
- problème : construction du traçage local



Construction du traçage local

Invariance sous l'action du groupe de transformations

- \mathcal{G}_T : groupe des translations du réseau

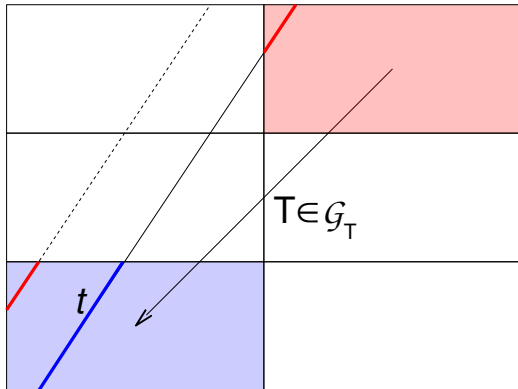




Construction du traçage local

Invariance sous l'action du groupe de transformations

- \mathcal{G}_T : groupe des translations du réseau



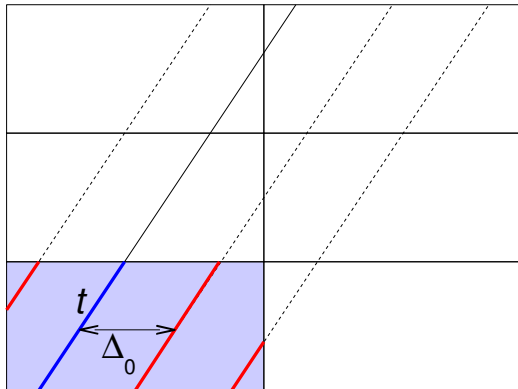


Construction du traçage local

Invariance sous l'action du groupe de transformations

- ▶ \mathcal{G}_T : groupe des translations du réseau

- ▶ $\mathcal{G}_T t = \{T_0^i t; i \in \mathbb{Z}\}$





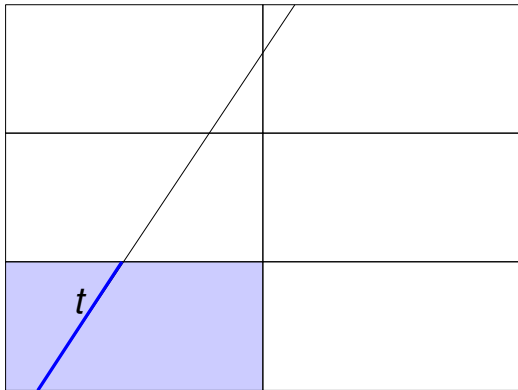
Construction du traçage local

Invariance sous l'action du groupe de transformations

- ▶ \mathcal{G}_T : groupe des translations du réseau

- ▶ $\mathcal{G}_T t = \{T_0^i t; i \in \mathbb{Z}\}$

- ▶ \mathcal{G}_{cl} : groupe de conditions aux limites

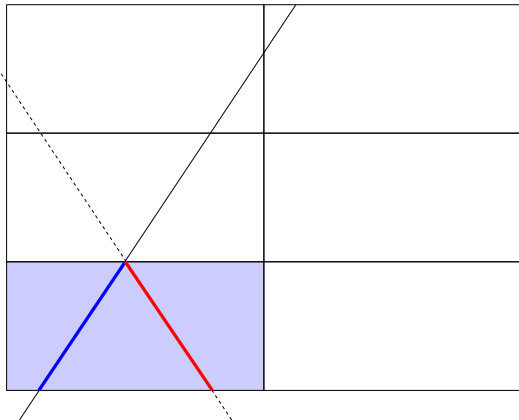




Construction du traçage local

Invariance sous l'action du groupe de transformations

- ▶ \mathcal{G}_T : groupe des translations du réseau
 - ▶ $\mathcal{G}_T t = \{T_0^i t; i \in \mathbb{Z}\}$
- ▶ \mathcal{G}_{cl} : groupe de conditions aux limites





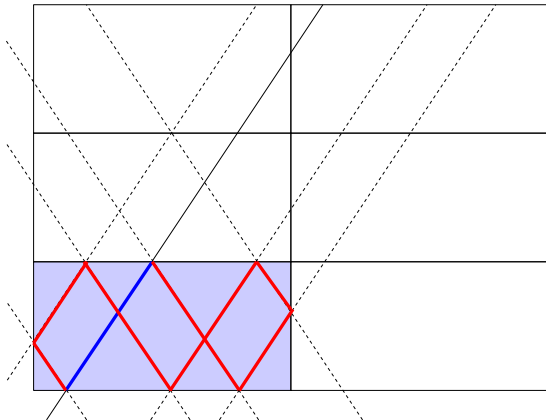
Construction du traçage local

Invariance sous l'action du groupe de transformations

- ▶ \mathcal{G}_T : groupe des translations du réseau

- ▶ $\mathcal{G}_T t = \{T_0^i t; i \in \mathbb{Z}\}$

- ▶ \mathcal{G}_{cl} : groupe de conditions aux limites





Construction du traçage local

Invariance sous l'action du groupe de transformations

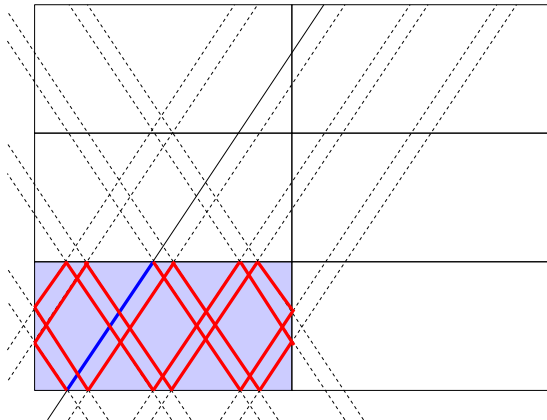
- ▶ \mathcal{G}_T : groupe des translations du réseau

- ▶ $\mathcal{G}_T t = \{T_0^i t; i \in \mathbb{Z}\}$

- ▶ \mathcal{G}_{cl} : groupe de conditions aux limites

- ▶ $\mathcal{G} = \langle \mathcal{G}_T \cup \mathcal{G}_{cl} \rangle$

⇒ Traçage local complet
= traçage local invariant par \mathcal{G}



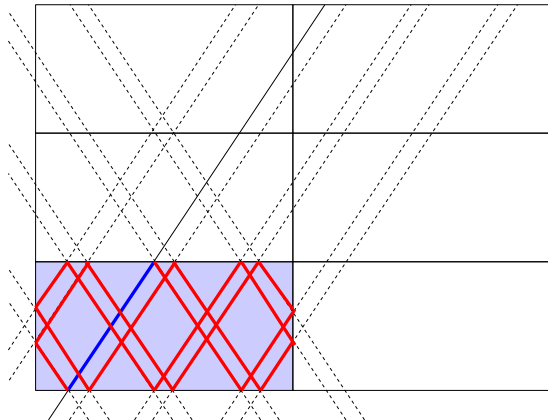


Construction du traçage local

Invariance sous l'action du groupe de transformations

Méthode de construction directe
[S. Kosaka et E. Saji, 2000]

- ▶ pas de traçage non constant
- ▶ peu de contrôle sur la taille du traçage

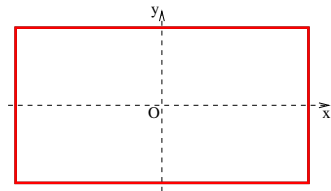




Construction du traçage local

Méthode systématique

- ▶ Hypothèse :
 - ▶ existence d'un point invariant par \mathcal{G}_{cl}

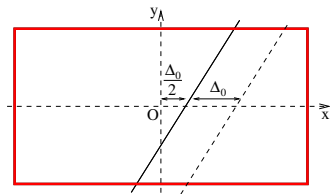




Construction du traçage local

Méthode systématique

- ▶ Hypothèse :
 - ▶ existence d'un point invariant par \mathcal{G}_{cl}
- ▶ Méthode :
 1. choix des paramètres de traçage appropriés





Construction du traçage local

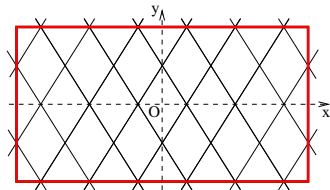
Méthode systématique

► Hypothèse :

- existence d'un point invariant par \mathcal{G}_{cl}

► Méthode :

1. choix des paramètres de traçage appropriés
2. traçage cyclique conventionnel





Construction du traçage local

Méthode systématique

► Hypothèse :

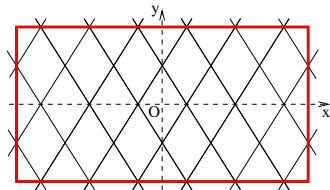
- existence d'un point invariant par \mathcal{G}_{cl}

► Méthode :

1. choix des paramètres de traçage appropriés
2. traçage cyclique conventionnel

► Avantages:

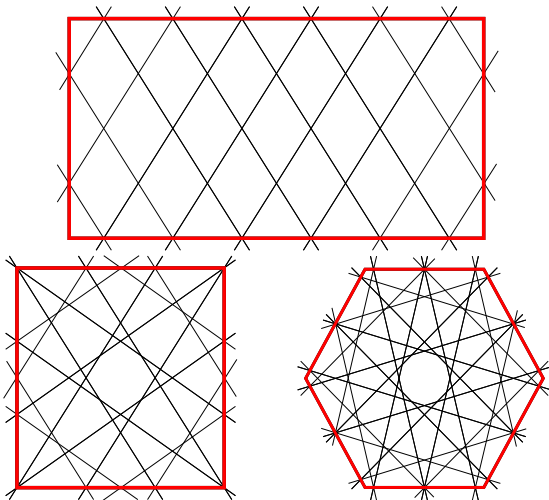
- utilisation de routines de traçage déjà existantes
- obtention d'un traçage à pas constant





Construction du traçage local

Exemples de traçages complets réguliers





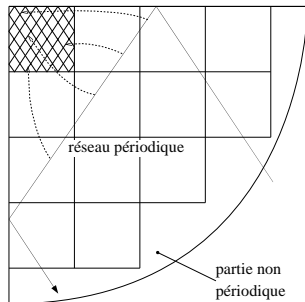
Connexion avec une partie non-périodique

Macrotraçage

Idée: plutôt que de calculer à la volée la succession de segments de traçage à balayer, les précalculer dans un “macrotraçage”

Construction du macrotraçage :

- ▶ parties non-périodiques
→ traçage standard
- ▶ réseau périodique
→ pointeurs vers les segments locaux

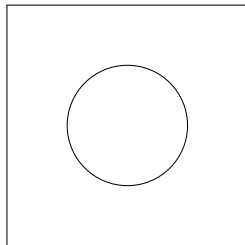
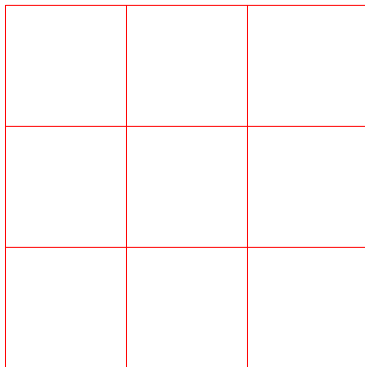


- ▶ **Inconvénient** : léger coût de stockage supplémentaire
- ▶ **Avantage**: réduction du coût de calcul



Résultats numériques

Motif de cellules combustibles



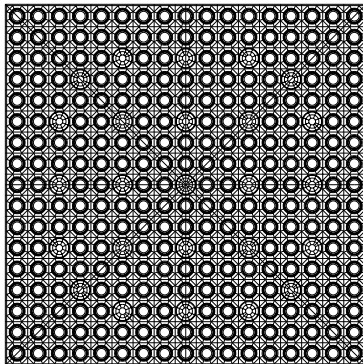
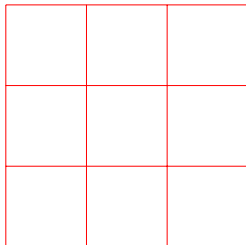
9 cellules
18 régions
gain max. $\simeq 89\%$

		trad.	périod.	diff. rel.
taille du traçage	(o)	6192	5160	-16.67%
temps de traçage	(s)	0.18	0.26	44.44%
temps de balayage	(s)	0.89	1.15	29.21%



Résultats numériques

Motif multi-assemblages



9 cellules

≈ 54 000 régions

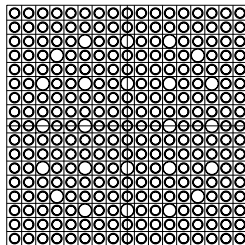
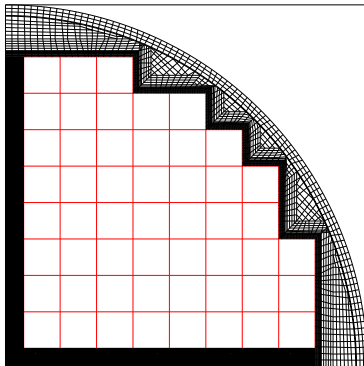
gain max. ≈ 89%

		trad.	périod.	diff. rel.
taille du traçage	(o)	10 172 688	1 781 532	-82.49%
temps de traçage	(s)	69.57	30.40	-56.30%
temps de balayage	(s)	13.61	12.94	-4.92%



Résultats numériques

Quart de cœur REP



52 cellules
 $\simeq 80\ 000$ régions
 gain max. $\simeq 82\%$

		trad.	périod.	diff. rel.
taille du traçage	(o)	39 198 114	8 783 076	-77.59%
temps de traçage	(s)	203.28	119.19	-41.37%
temps de balayage	(s)	45.64	50.34	+10.30%



Conclusions – Perspectives

Traçage périodique

Conclusions :

- ▶ méthode très efficace pour les grandes géométries :
 - ▶ gains élevés en taille de traçage ($\simeq 80\%$)
 - ▶ peu ou pas de coût supplémentaire en CPU ($\leq 10\%$)
- ▶ méthode de traçage très générale :
 - ▶ s'applique à toutes les géométries usuelles
- ▶ permet de traiter les raccords avec des parties non-périodiques

Reste à implémenter :

- ▶ possibilité d'irrégularités dans le réseau
 - ▶ rotation des cellules périodiques
- ▶ prise en compte des cellules "coupées"
- ▶ implémentation pratique des formes autres que rectangle/carré
 - ▶ hexagones



Merci pour votre attention



- ▶ Méthode des macrobandes
 - ▶ Complexité algorithmique
 - ▶ Algorithmes de balayage
 - ▶ Impact de l'ordre de Taylor
 - ▶ Bibliographie

- ▶ Méthode des macrobandes
 - ▶ Bibliographie



Méthode des macrobandes

Complexités algorithmiques

- Comparaison des complexités algorithmiques:

	exp.	×	+	stockage
MOC classique	1	2	2	1
Macrobandes avec développement de Taylor	1	$3 + n_T + r$	$2 + n_T$	$1 + n_T + 2r$
Macrobandes sans développement de Taylor	1	$2 + r$	2	$1 + 2r$

- r : coût moyen de la répartition du flux aux interfaces

$$r \simeq 0.6$$



Méthode des macrobandes

Algorithmes de balayage

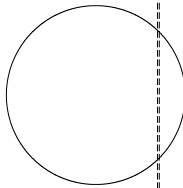
pour chaque trajectoire t **faire**
 initialiser ψ avec les C.L.
 pour chaque région r sur t **faire**
 mettre à jour ψ
 fin pour
fin pour

pour chaque trajectoire t **faire**
 initialiser ψ avec les C.L.
 pour chaque section s de t **faire**
 pour chaque sous-bande b de s **faire**
 pour chaque région r dans b **faire**
 mettre à jour ψ
 fin pour
 fin pour
 redistribuer ψ
 fin pour
fin pour



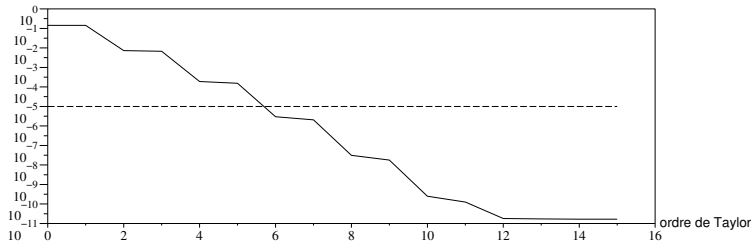
Méthode des macrobandes

Impact de l'ordre de Taylor



$\sigma = 100.00 \text{ cm}^{-1}$
 $r = 0.50 \text{ cm}$
 $h = 0.01 \text{ cm}$
 $u_0 = 0.35 \text{ cm}$

erreur relative





Bibliographie

Méthode des macrobandes



A. Yamamoto, M. Tabushi, N. Sugimura, and T. Ushio.

Non-equidistant ray tracing for the method of characteristics.

In Proceedings of M&C 2005, September 12–15 2005.



A. Yamamoto.

Reduction in spatial discretization error in the method of characteristics by using the mobile-chord ray tracing method.

Annals of Nuclear Energy, 35(5):783–789, May 2008.



F. Févotte, S. Santandrea, and R. Sanchez.

Advanced transverse integration for the method of characteristics.

In Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computation and Supercomputing in Nuclear Applications 2007, Monterey, CA, USA, April 15–19 2007.



Bibliographie

Traçage périodique



S. Kosaka and E. Saji.

Transport theory calculation for a heterogeneous multi-assembly problem by characteristics method with direct neutron path linking technique.

Journal of Nuclear Science and Technology, 37(12):1015–1023, 2000.



K. S. Smith and J. D. Rhodes, III.

Full-core, 2-D, LWR core calculation with CASMO-4E.

In *Proceedings of PHYSOR 2002*, October 7–10 2002.



S. Sternberg.

Group Theory and Physics.

Cambridge University Press, 1994.



F. Févotte, S. Santandrea, and R. Sanchez.

Tracking on periodic lattices for the method of characteristics.

In *Proceedings of PHYSOR 2008*, Interlaken, Switzerland, September 14–19 2008.



Merci pour votre attention