

Raccordement de développements asymptotiques pour la propagation des ondes dans les milieux comportant des fentes

Patrick Joly, Sébastien Tordeux

► **To cite this version:**

Patrick Joly, Sébastien Tordeux. Raccordement de développements asymptotiques pour la propagation des ondes dans les milieux comportant des fentes. Groupe de travail: Ondes

Structures, 2006, Toulouse, France. 2006. <inria-00528073>

HAL Id: inria-00528073

<https://hal.inria.fr/inria-00528073>

Submitted on 21 Oct 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Raccordement de développements asymptotiques pour la propagation des ondes dans les milieux comportant des fentes

Patrick Joly et Sébastien Tordeux

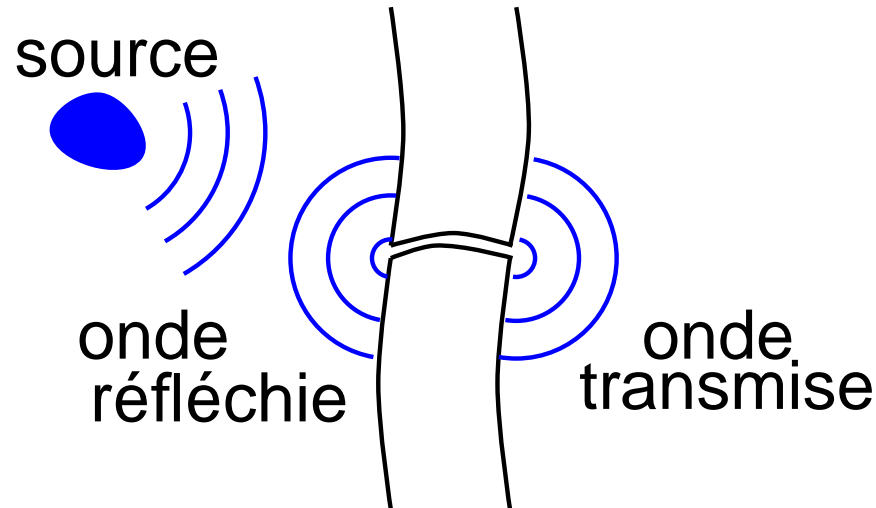
Laboratoire MIP, Groupe de travail, Toulouse, février 2006

POems-INRIA-Rocquencourt

SAM-ETH-Zürich

Une application typique

Comment peut-on étudier la diffraction des ondes dans les milieux incluant des **fentes minces** ?

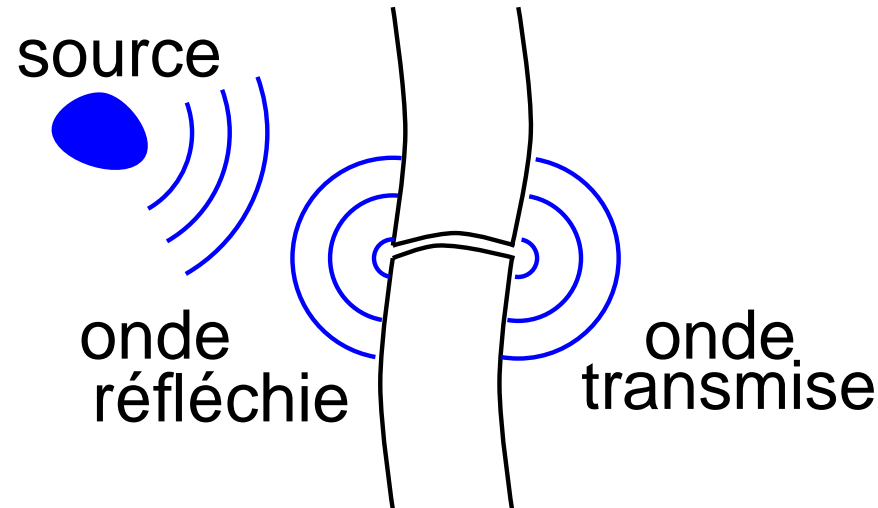


Un problème physique avec deux longueurs **caractéristiques**

- La **longueur d'onde** λ
- La **largeur** de la fente ε

Une application typique

Comment peut-on étudier la diffraction des ondes dans les milieux incluant des **fentes minces** ?

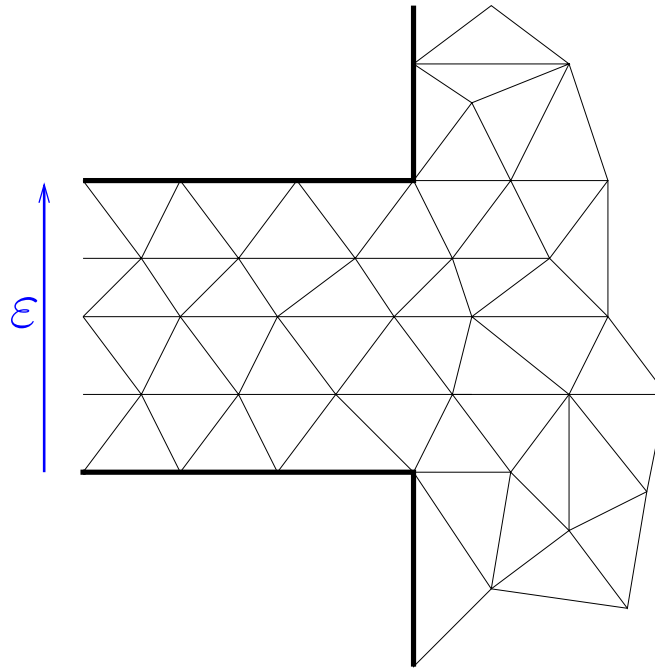


Une situation **asymptotique**:

$$\varepsilon \ll \lambda$$

La difficulté numérique

Un pas de maillage plus petit que ε



Ceci amène à des calculs **coûteux**

Quelques références

- Fentes minces:
Harrington, Auckland (1980), Tatout (1996).
- Différences finies:
Taflove (1995).
- Théorie des plaques, théorie des jonctions, ...
Ciarlet, Le Dret, Dauge-Costabel.
- Développements asymptotiques raccordés:
McIver, Rawlins (1993), Il'in (1992).
- Techniques multi-échelles
Maz'ya, Nazarov, Plamenevskii (1991)
Oleinik, Shamaev, Yosifian (1992)

Un problème simple

Equation des ondes **scalaires** :

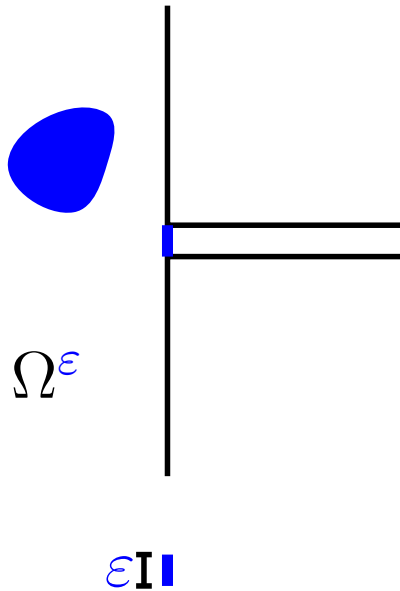
$$\frac{\partial^2 p^\varepsilon}{\partial t^2} - \Delta p^\varepsilon = f$$

Régime **harmonique**:

$$p^\varepsilon(x, y, t) = \exp(-i\omega t) u^\varepsilon(x, y)$$

Equation de **Helmholtz** :

$$\Delta u^\varepsilon + \omega^2 u^\varepsilon = -f \quad \text{in } \Omega^\varepsilon$$



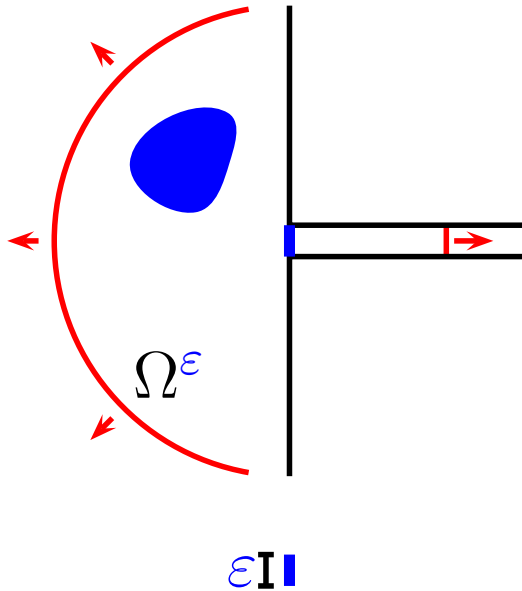
Un problème simple

Solution **sortante** à l'infini:

$$\frac{\partial u^\varepsilon}{\partial n} - i\omega u^\varepsilon \leq \frac{C}{r^2}, \quad \text{pour } r \text{ grand,}$$

Condition aux limites de **Neumann**
(mur rigide)

$$\frac{\partial u^\varepsilon}{\partial n} = 0 \quad \text{sur } \partial\Omega^\varepsilon$$



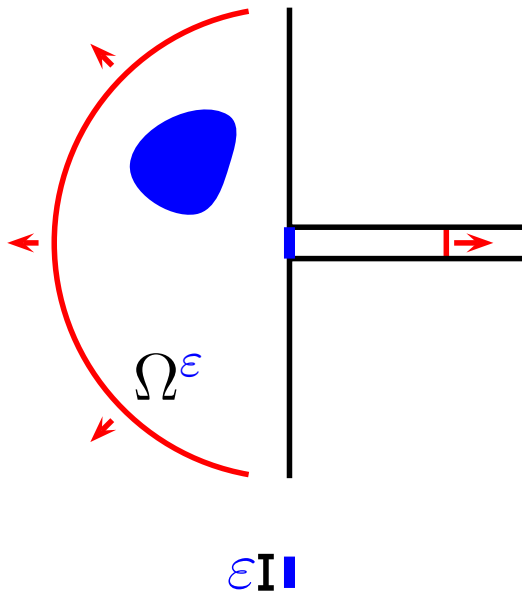
Un problème simple

Solution **sortante** à l'infini:

$$\frac{\partial u^\varepsilon}{\partial n} - i\omega u^\varepsilon \leq \frac{C}{r^2}, \quad \text{pour } r \text{ grand,}$$

Condition aux limites de **Neumann**
(mur rigide)

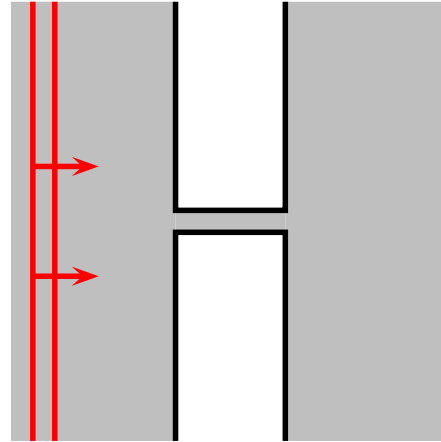
$$\frac{\partial u^\varepsilon}{\partial n} = 0 \quad \text{sur } \partial\Omega^\varepsilon$$



Avec la condition aux limites de Dirichlet, la transmission dans la fente est **négligeable** ($o(\varepsilon^\infty)$).

Une simulation numérique

Neumann

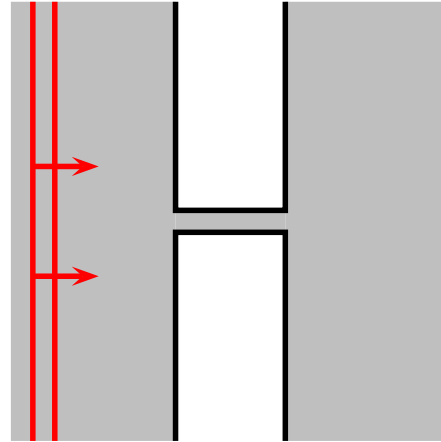


Dirichlet

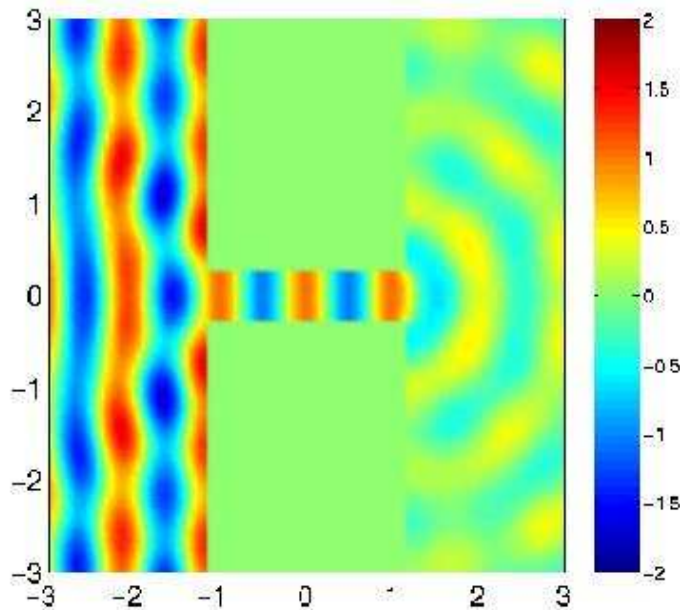
Simulation numérique effectuée avec le code éléments finis
d'ordre élevé (M. Duruflé, INRIA)

Une simulation numérique

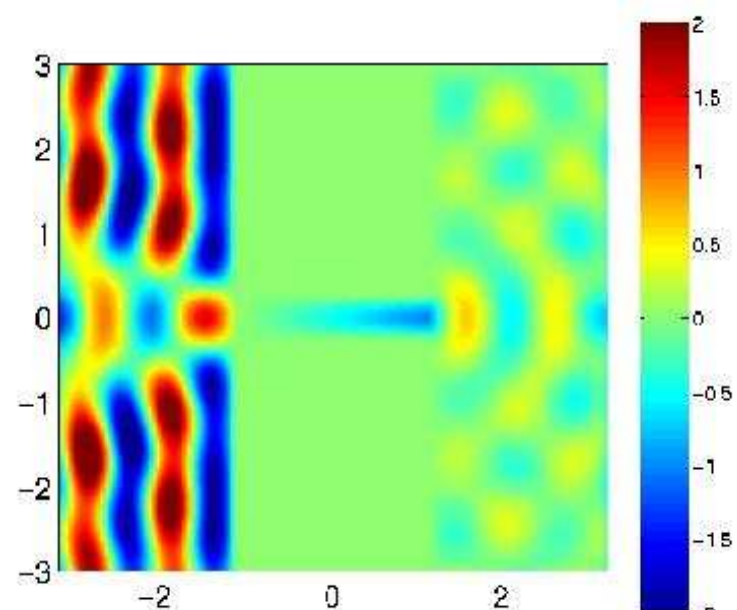
Neumann



Dirichlet

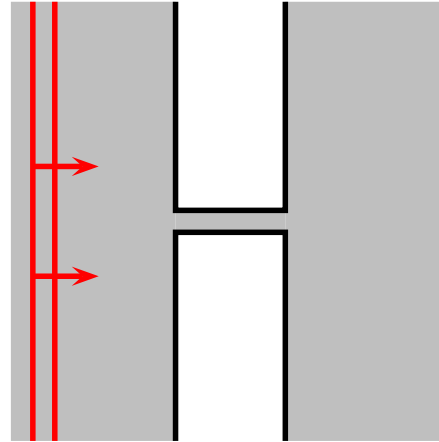


$$\frac{\varepsilon}{\lambda} = 0.5$$

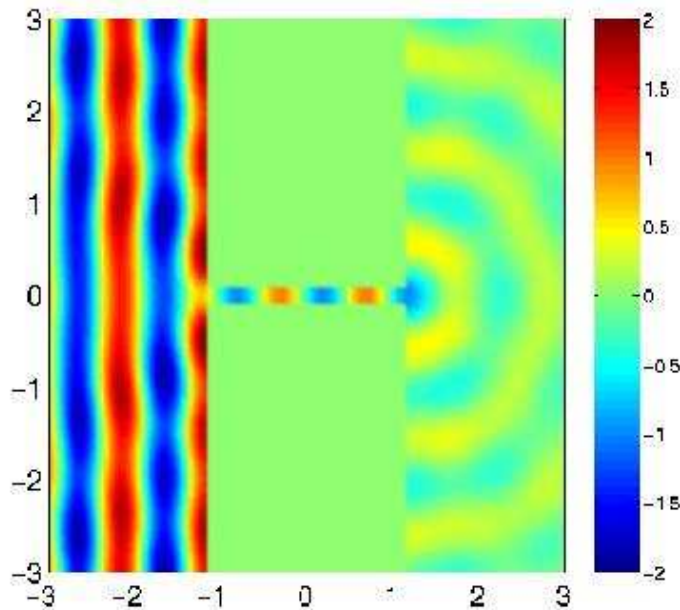


Une simulation numérique

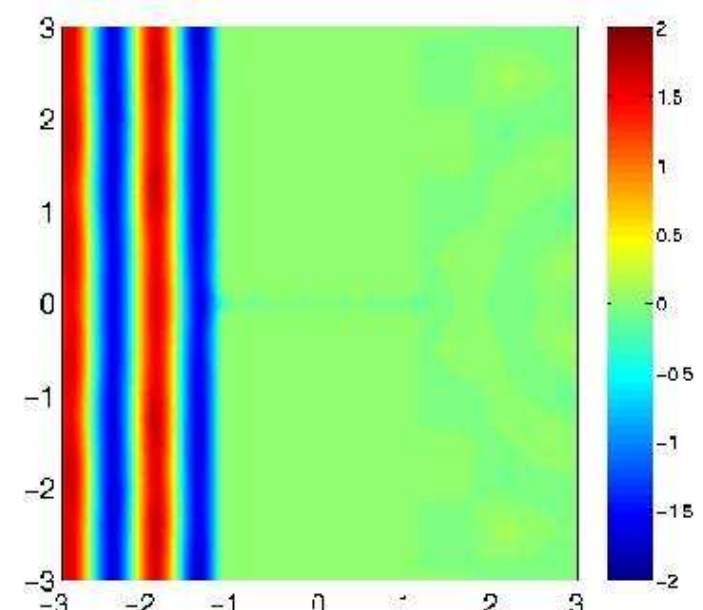
Neumann



Dirichlet

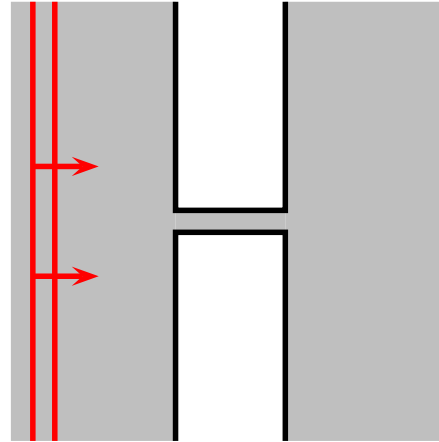


$$\frac{\varepsilon}{\lambda} = 0.2$$

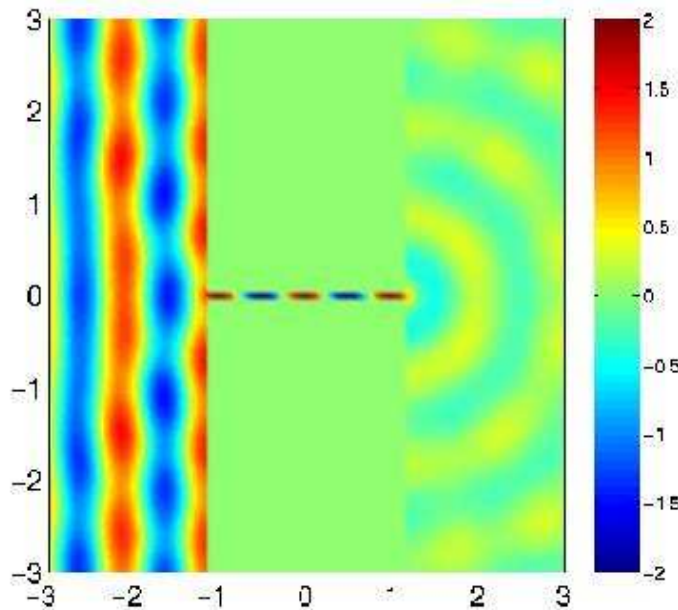


Une simulation numérique

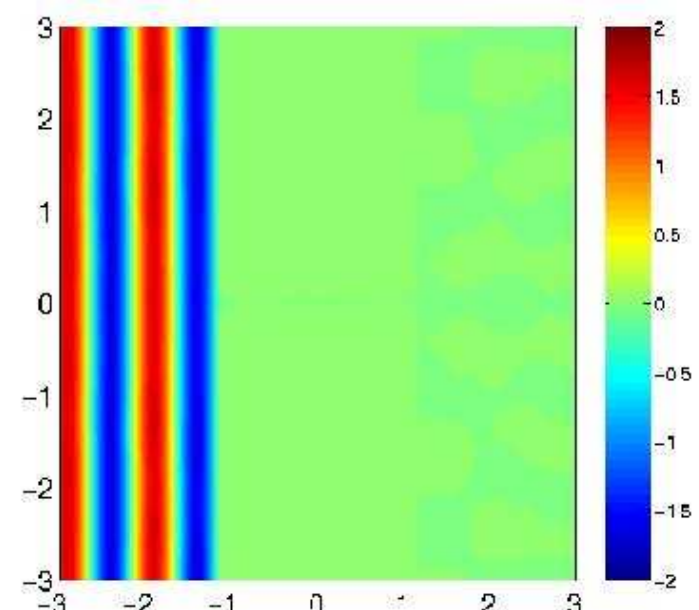
Neumann



Dirichlet



$$\frac{\varepsilon}{\lambda} = 0.1$$

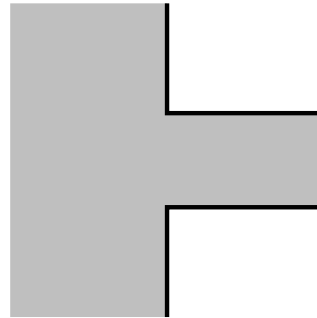


Objectifs

- Développer des méthodes de calcul **précises**

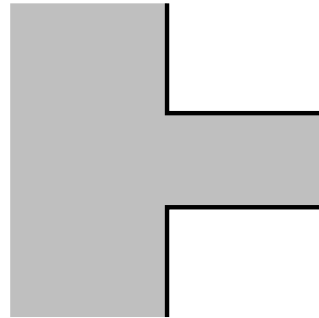
Objectifs

- Développer des méthodes de calcul **précises**
- Introduction d'une **zone de transition**



Objectifs

- Développer des méthodes de calcul **précises**
- Introduction d'une **zone de transition**



- Une technique appropriée: les **développements asymptotiques raccordés**
- Définir de **nouveaux modèles approchés** permettant de calculer la solution.
- Maîtriser l'utilisation de techniques "universelles" de calcul numérique (raffinement de maillage).

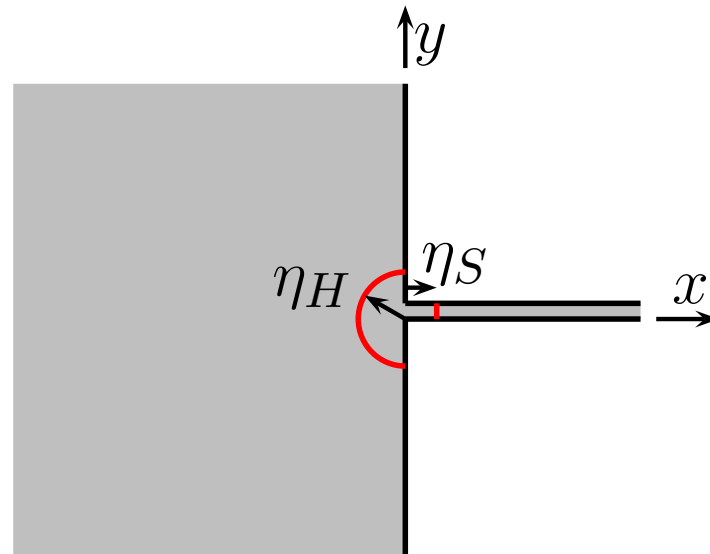
Apports aux rac. de dév. asympt.

- Reformuler les **principes de raccord** (pas toujours clairs) proposés par l'école anglo-saxonne.

Apports aux rac. de dév. asympt.

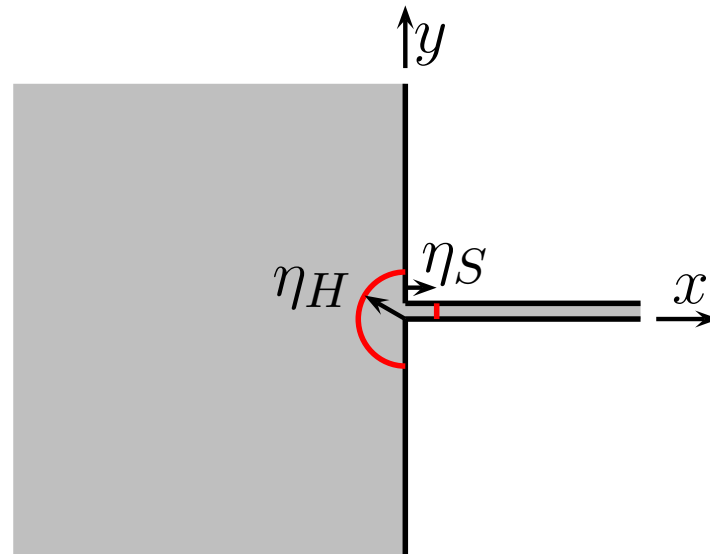
- Reformuler les **principes de raccord** (pas toujours clairs) proposés par l'école anglo-saxonne.
- **Justification mathématique** de cette technique.
 - Méthode **inspirée** des techniques multi-échelles
 - **Existence et unicité** des termes des développements asymptotiques.
 - Technique plus spécifique: **estimations d'erreur**.

Trois zones



- **Champ lointain** (champ 2D)
- **Champ proche** (couche limite)
- **Champ de fente** (champ 1D)

Trois zones

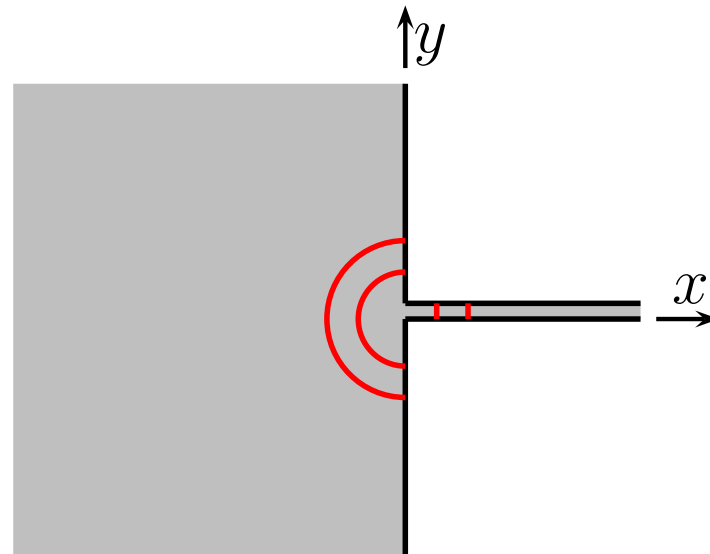


Les hypothèses asymptotiques:

$$\varepsilon \ll \eta_H(\varepsilon) \ll \lambda, \quad \varepsilon \ll \eta_S(\varepsilon) \ll \lambda.$$

$$\varepsilon \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon) \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon)/\varepsilon \rightarrow +\infty$$

Trois zones

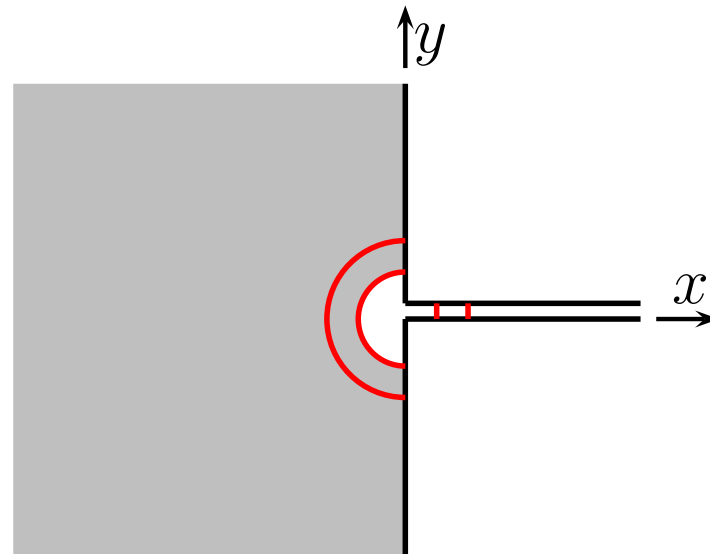


Les hypothèses asymptotiques:

$$\varepsilon \ll \eta_H(\varepsilon) \ll \lambda, \quad \varepsilon \ll \eta_S(\varepsilon) \ll \lambda.$$

$$\varepsilon \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon) \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon)/\varepsilon \rightarrow +\infty$$

Trois zones



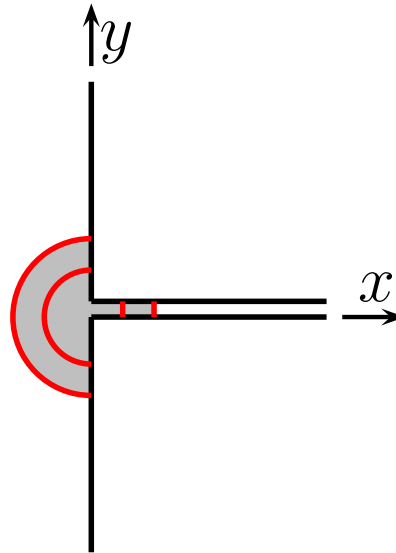
Champ lointain

Les hypothèses asymptotiques:

$$\varepsilon \ll \eta_H(\varepsilon) \ll \lambda, \quad \varepsilon \ll \eta_S(\varepsilon) \ll \lambda.$$

$$\varepsilon \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon) \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon)/\varepsilon \rightarrow +\infty$$

Trois zones



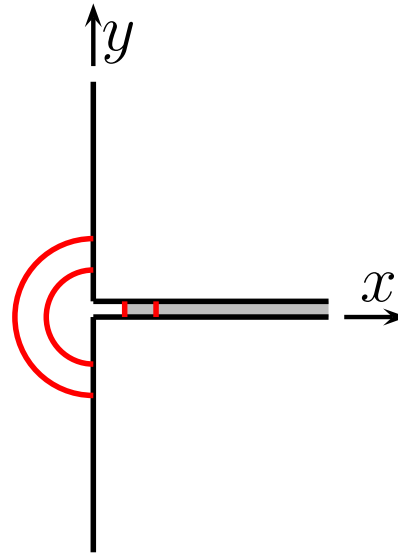
Champ proche

Les hypothèses asymptotiques:

$$\varepsilon \ll \eta_H(\varepsilon) \ll \lambda, \quad \varepsilon \ll \eta_S(\varepsilon) \ll \lambda.$$

$$\varepsilon \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon) \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon)/\varepsilon \rightarrow +\infty$$

Trois zones



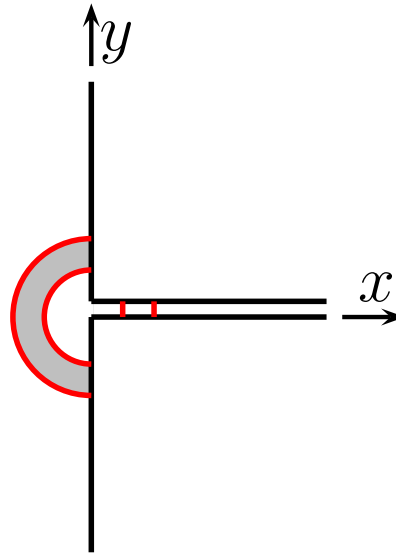
Champ de fente

Les hypothèses asymptotiques:

$$\varepsilon \ll \eta_H(\varepsilon) \ll \lambda, \quad \varepsilon \ll \eta_S(\varepsilon) \ll \lambda.$$

$$\varepsilon \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon) \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon)/\varepsilon \rightarrow +\infty$$

Trois zones



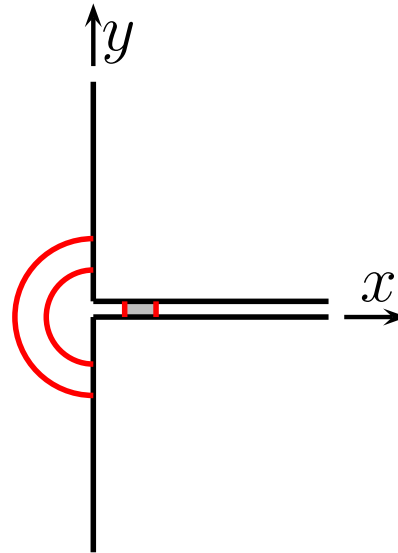
lointain et proche

Les hypothèses asymptotiques:

$$\varepsilon \ll \eta_H(\varepsilon) \ll \lambda, \quad \varepsilon \ll \eta_S(\varepsilon) \ll \lambda.$$

$$\varepsilon \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon) \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon)/\varepsilon \rightarrow +\infty$$

Trois zones



de fente et proche

Les hypothèses asymptotiques:

$$\varepsilon \ll \eta_H(\varepsilon) \ll \lambda, \quad \varepsilon \ll \eta_S(\varepsilon) \ll \lambda.$$

$$\varepsilon \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon) \rightarrow 0 \quad \eta(\varepsilon)/\varepsilon \rightarrow +\infty$$

Les temps de la méthode

- **Dérivation** des développements asymptotiques:
 - Partie **formelle**
 - Plusieurs présentations possibles

Les temps de la méthode

- **Dérivation** des développements asymptotiques:
 - Partie **formelle**
 - Plusieurs présentations possibles
- **Description** des développements asymptotiques
 - Partie **rigoureuse**
 - **Définition** des termes de développements asymptotiques

Les temps de la méthode

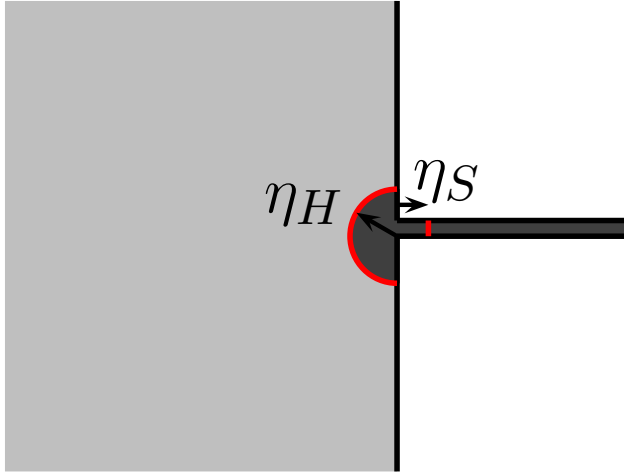
- **Dérivation** des développements asymptotiques:
 - Partie **formelle**
 - Plusieurs présentations possibles
- **Description** des développements asymptotiques
 - Partie **rigoureuse**
 - **Définition** des termes de développements asymptotiques
- **Validation mathématique** du développement asymptotique
 - Partie **rigoureuse**
 - **Estimations d'erreur**

Les temps de la méthode

- 2 **Dérivation** des développements asymptotiques:
 - Partie **formelle**
 - Plusieurs présentations possibles
- 1 **Description** des développements asymptotiques
 - Partie **rigoureuse**
 - **Définition** des termes de développements asymptotiques
- 3 **Validation mathématique** du développement asymptotique
 - Partie **rigoureuse**
 - **Estimations d'erreur**

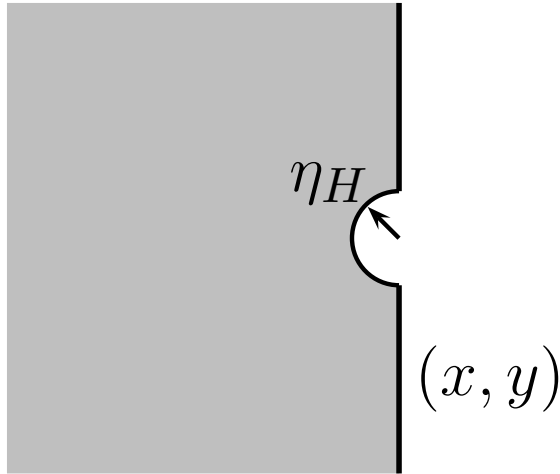
Champ lointain

Contexte asymptotique: $\varepsilon \ll \eta_H \ll \lambda$.



Champ lointain

Contexte asymptotique: $\varepsilon \ll \eta_H \ll \lambda$.



Pas de **normalisation**:

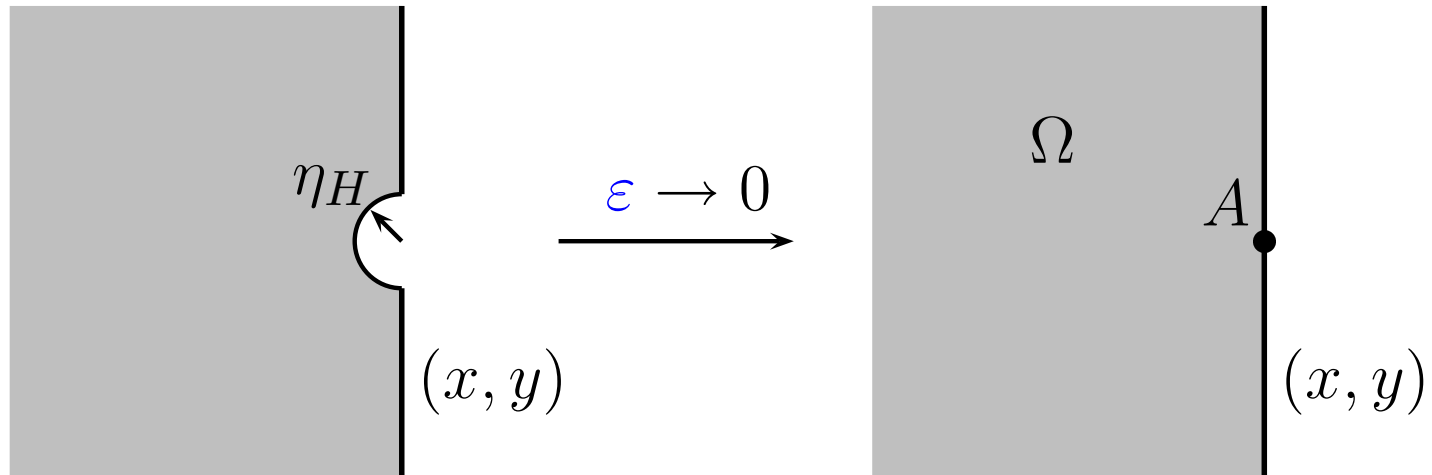
$$X = x,$$

$$Y = y.$$

Champ lointain

Contexte asymptotique:

$$\varepsilon \ll \eta_H \ll \lambda.$$



Pas de **normalisation**:

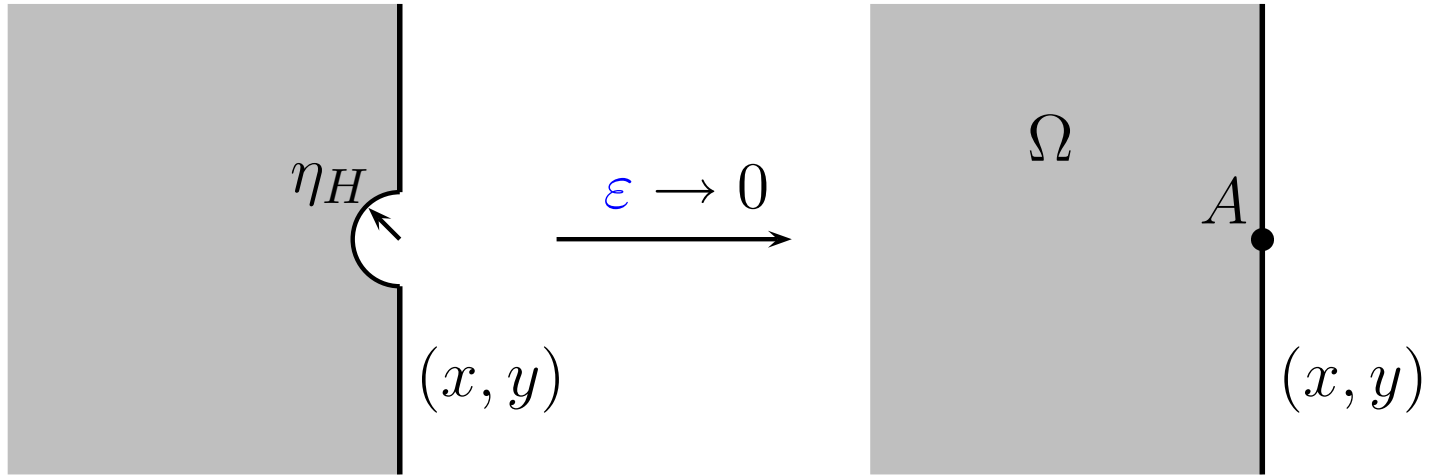
$$X = x,$$

$$Y = y.$$

Champ lointain

Contexte asymptotique:

$$\varepsilon \ll \eta_H \ll \lambda.$$

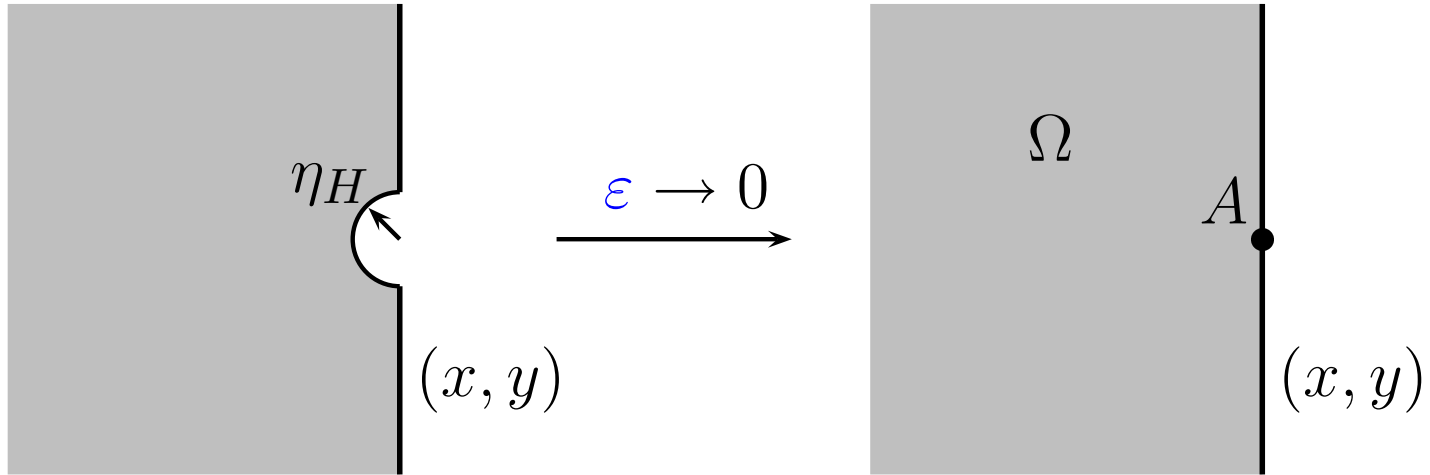


$$u^\varepsilon = u^0 + \sum_{i=1}^{+\infty} \sum_{k=0}^{i-1} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k + o(\varepsilon^\infty), \quad \text{dans } \Omega.$$

Champ lointain

Contexte asymptotique:

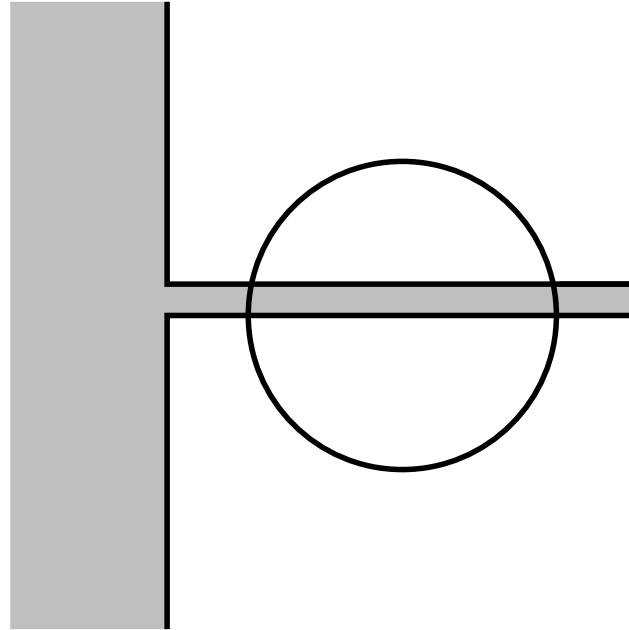
$$\varepsilon \ll \eta_H \ll \lambda.$$



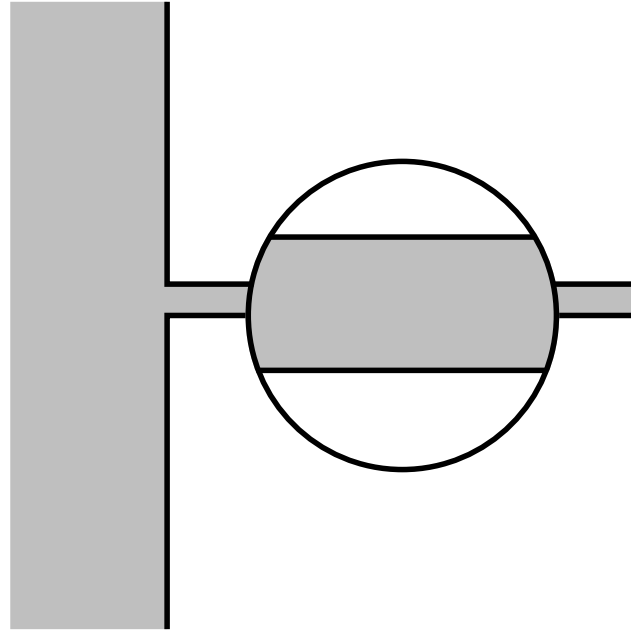
où les u_i^k vérifient l'équation de **Helmholtz homogène**

$$\Delta u_i^k + \omega^2 u_i^k = 0.$$

Champ de fente

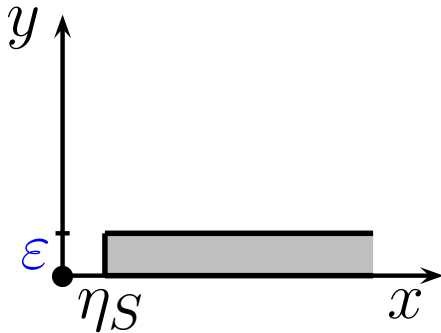


Champ de fente



$$u^\varepsilon(x, y) = U^\varepsilon\left(x, \frac{y}{\varepsilon}\right)$$

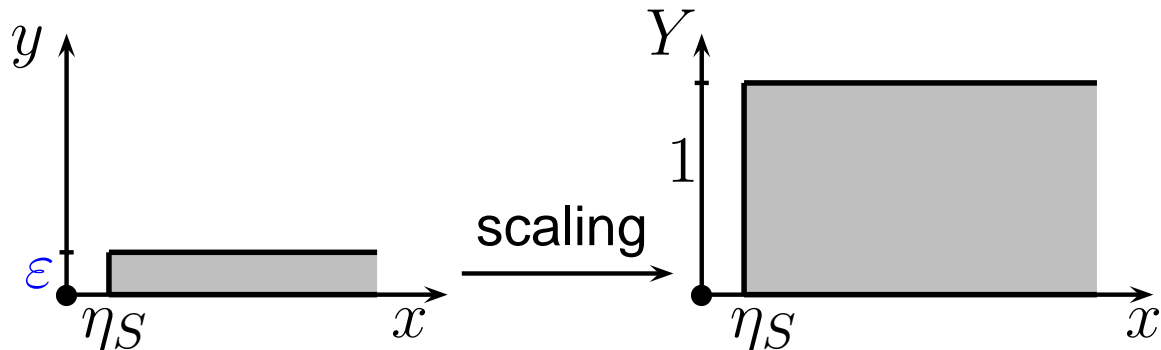
Champ de fente



Le contexte **asymptotique**: $\varepsilon \ll \eta_S \ll \lambda$.

La **normalisation**: $X = x, \quad Y = \frac{y}{\varepsilon}$

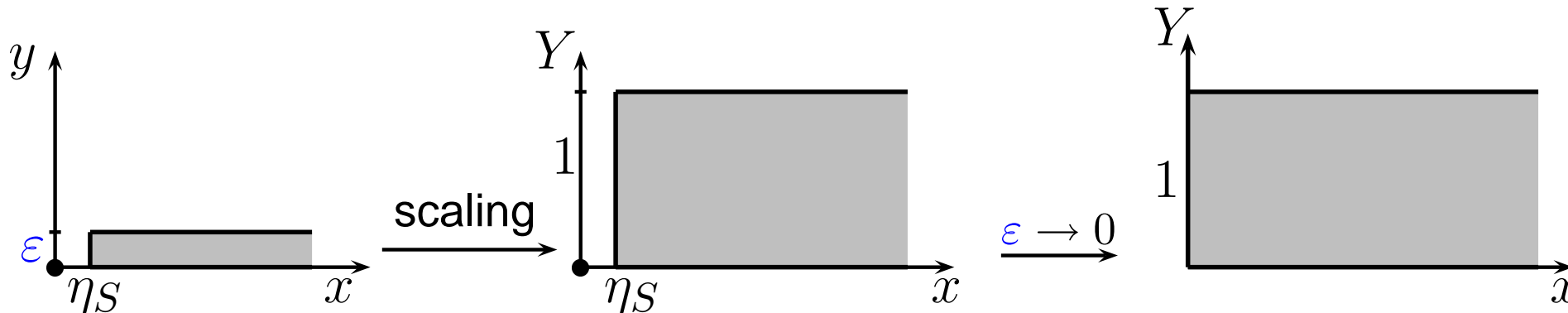
Champ de fente



Le contexte **asymptotique**: $\varepsilon \ll \eta_S \ll \lambda$.

La **normalisation**: $X = x, \quad Y = \frac{y}{\varepsilon}$

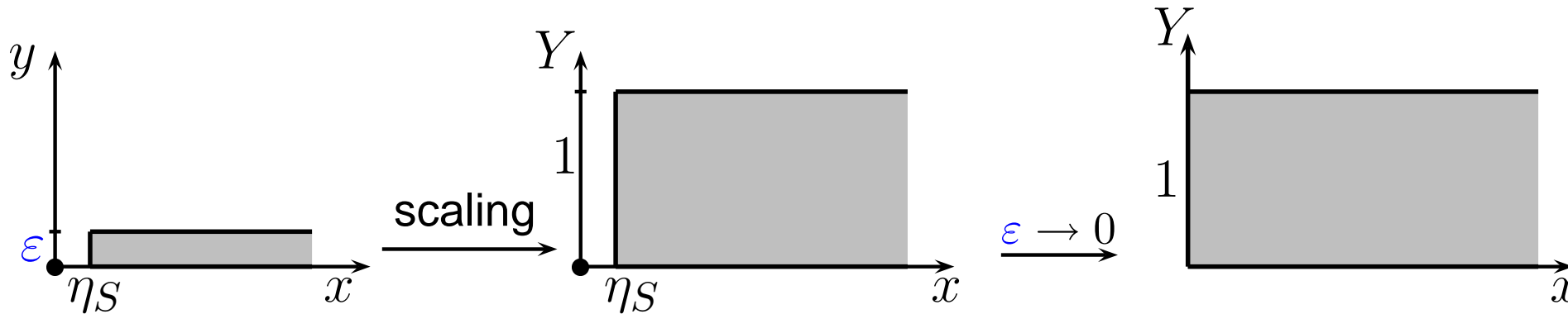
Champ de fente



Le contexte **asymptotique**: $\varepsilon \ll \eta_S \ll \lambda$.

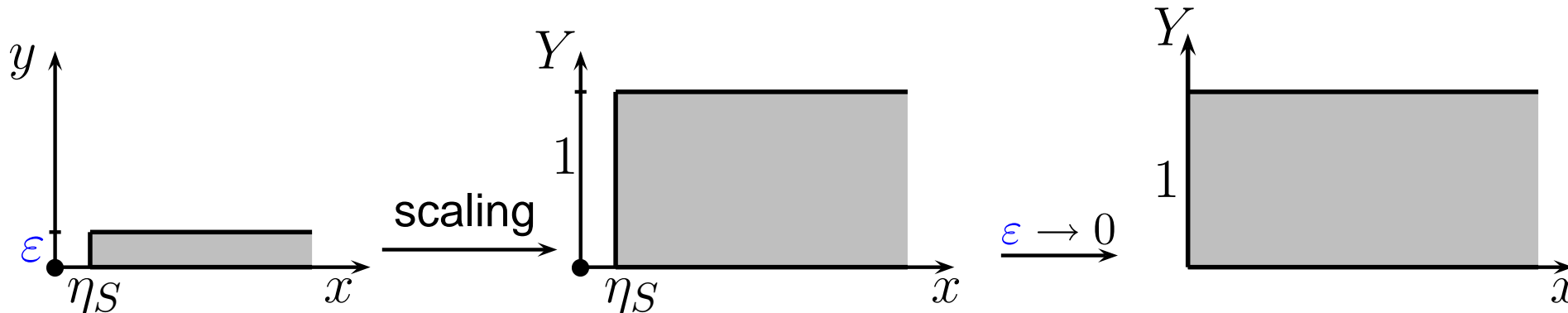
La **normalisation**: $X = x, \quad Y = \frac{y}{\varepsilon}$

Champ de fente



$$u^\varepsilon(x, Y\varepsilon) = U^\varepsilon(x, Y) = \sum_{i=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^i \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k U_i^k(x, Y) + o(\varepsilon^\infty),$$

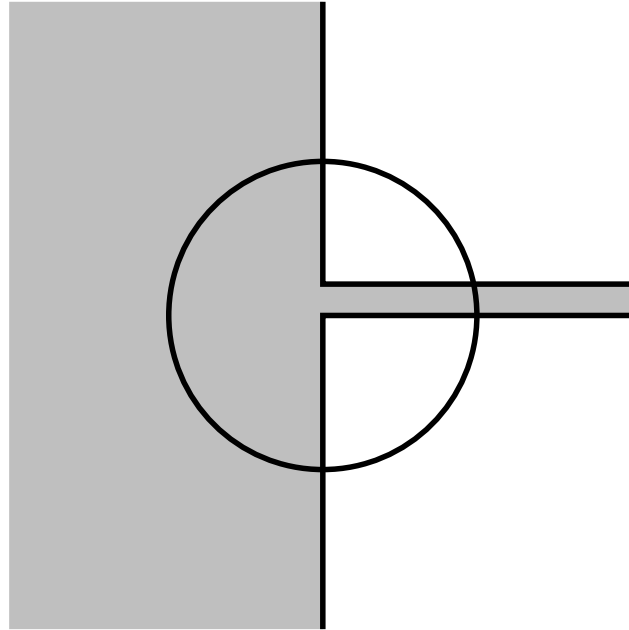
Champ de fente



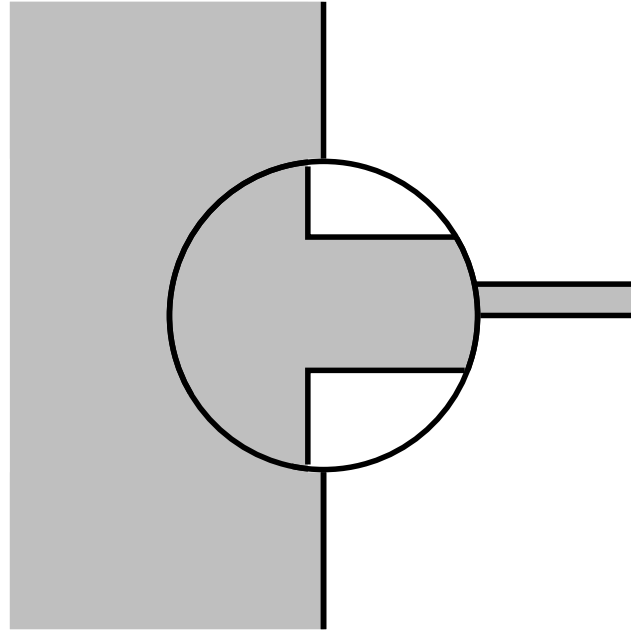
où les U_i^k vérifient l'équation de **Helmholtz 1D**:

$$\frac{d^2 U_i^k}{dx^2} + \omega^2 U_i^k = 0$$

Champ proche

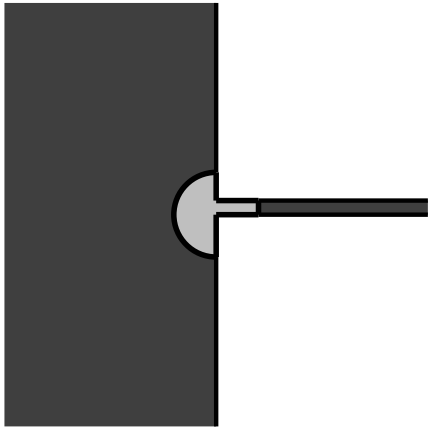


Champ proche



$$u^\varepsilon(x, y) = u_p^\varepsilon\left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{y}{\varepsilon}\right)$$

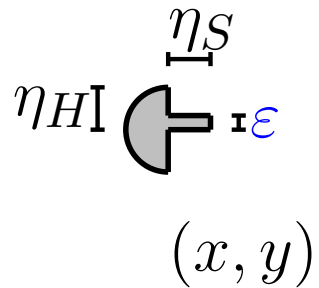
Champ proche



Contexte **asymptotique**: $\varepsilon \ll \eta_H \ll \lambda$, $\varepsilon \ll \eta_S \ll \lambda$.

La **normalisation**: $X = \frac{x}{\varepsilon}$, $Y = \frac{y}{\varepsilon}$

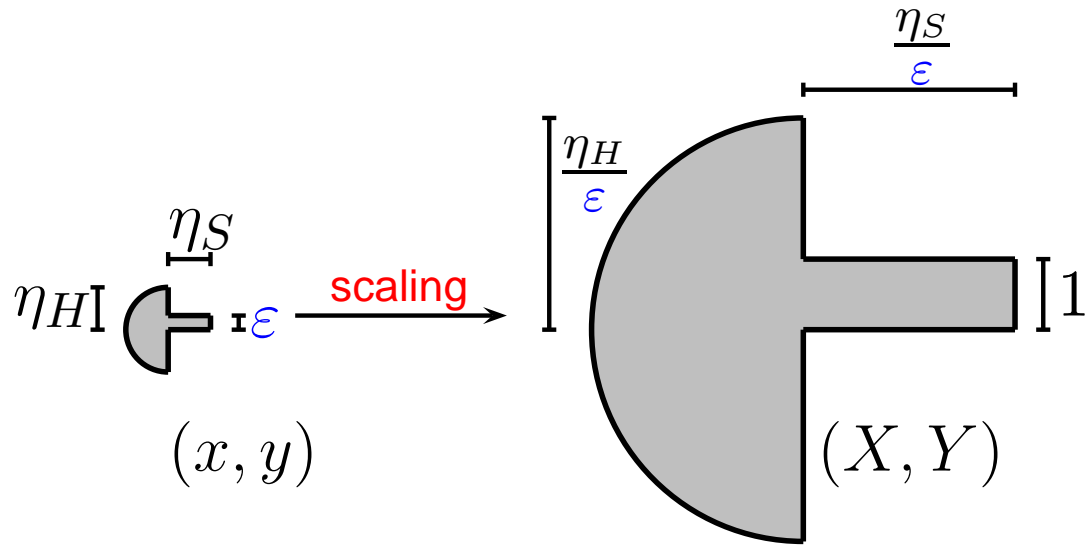
Champ proche



Contexte **asymptotique**: $\varepsilon \ll \eta_H \ll \lambda$, $\varepsilon \ll \eta_S \ll \lambda$.

La **normalisation**: $X = \frac{x}{\varepsilon}$, $Y = \frac{y}{\varepsilon}$

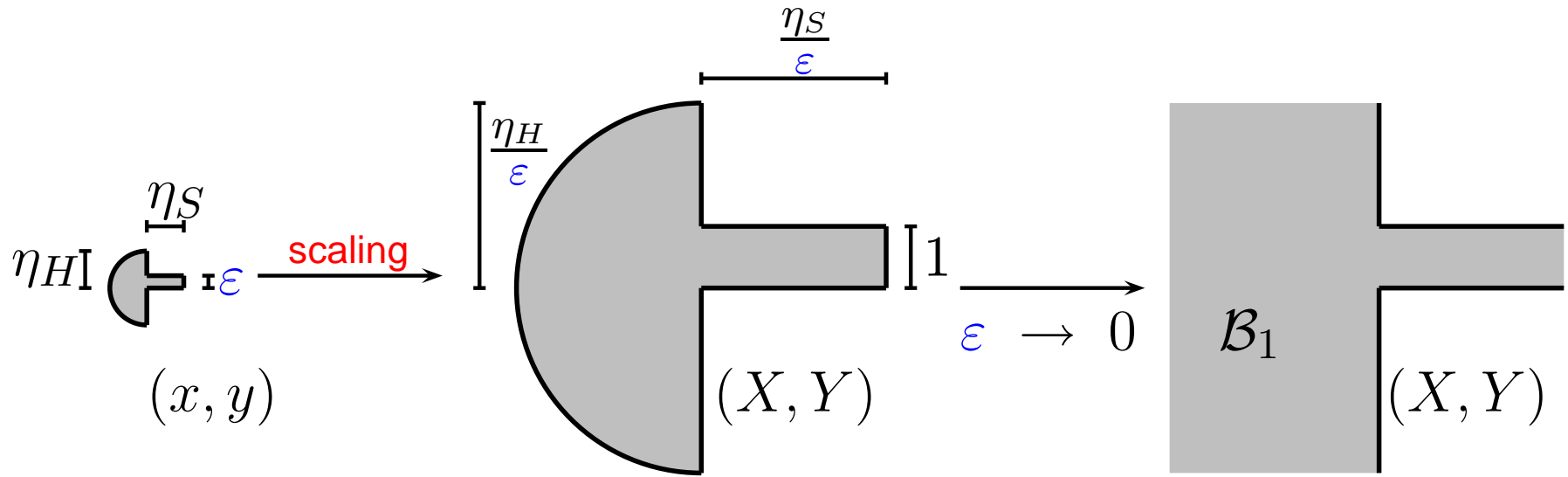
Champ proche



Contexte **asymptotique**: $\epsilon \ll \eta_H \ll \lambda$, $\epsilon \ll \eta_S \ll \lambda$.

La **normalisation**: $X = \frac{x}{\epsilon}$, $Y = \frac{y}{\epsilon}$

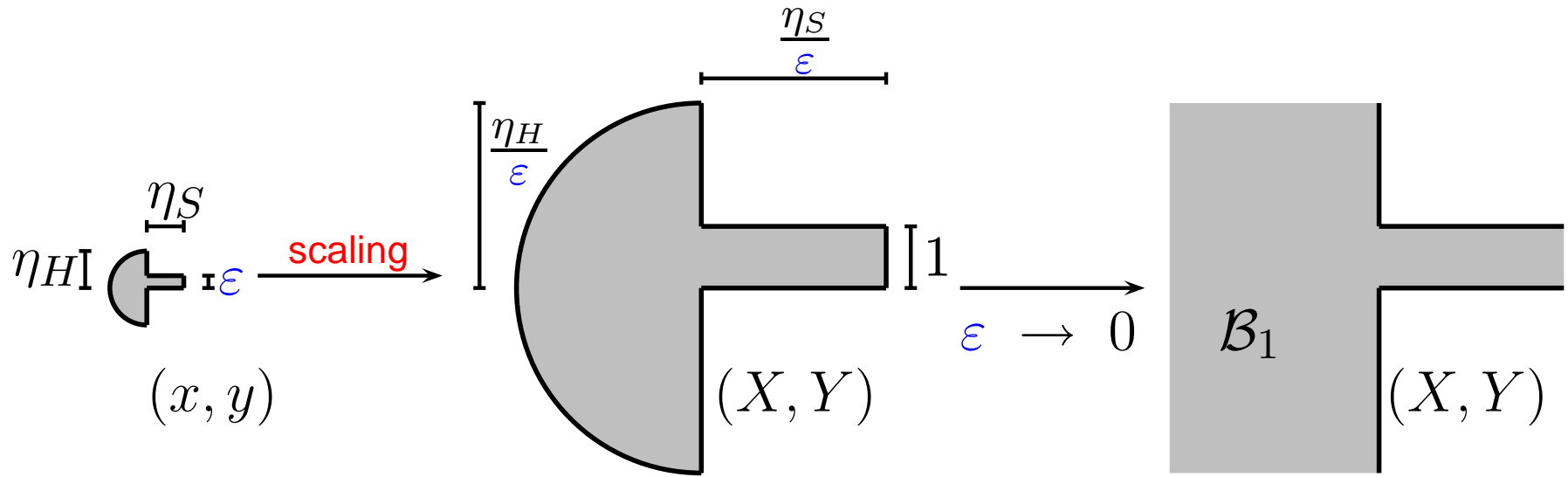
Champ proche



Contexte **asymptotique**: $\epsilon \ll \eta_H \ll \lambda$, $\epsilon \ll \eta_S \ll \lambda$.

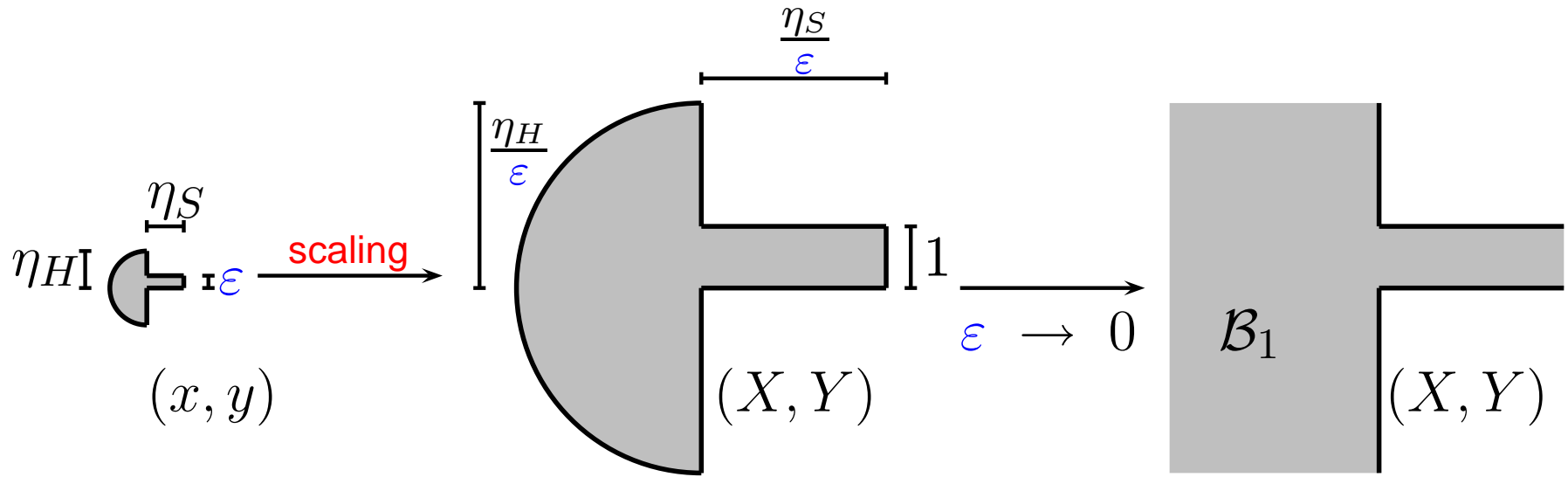
La **normalisation**: $X = \frac{x}{\epsilon}$, $Y = \frac{y}{\epsilon}$

Champ proche



$$u^\varepsilon(\varepsilon X, \varepsilon Y) = u_p^\varepsilon(X, Y) = \sum_{i=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^i \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k (u_p)_i^k(X, Y) + o(\varepsilon^\infty)$$

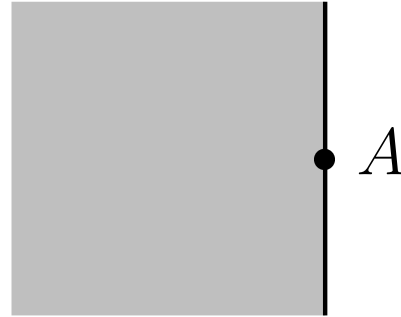
Champ proche



où les $(u_p)_i^k$ vérifient l'équation de **Laplace (in)homogène**.

$$\begin{cases} \Delta(u_p)_i^k = 0, & \text{si } i = k \text{ ou } k + 1, \\ \Delta(u_p)_i^k = -\omega^2 (u_p)_{i-2}^k, & \text{sinon.} \end{cases}$$

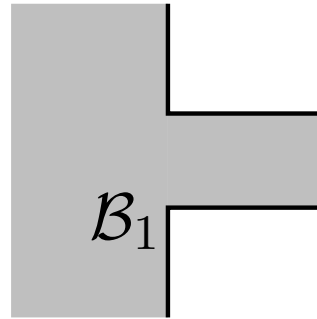
Ordre 0 : \underline{u}^0 , $(u_p)_0^0$, U_0^0



Champ lointain:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Chercher } u^0 \in H_{loc}^1(\Omega) \text{ tel que :} \\ -\Delta u^0 - \omega^2 u^0 = f, \quad \text{dans } \Omega, \\ \frac{\partial u^0}{\partial n} = 0, \quad \text{sur } \partial\Omega, \\ u^0 \text{ est sortante.} \end{array} \right.$$

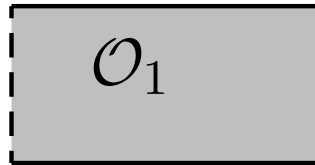
Ordre 0 : u^0 , $\underline{(u_p)_0^0}$, U_0^0



Champ proche:

$$(u_p)_0^0(X, Y) = u^0(A), \quad \text{dans } B_1.$$

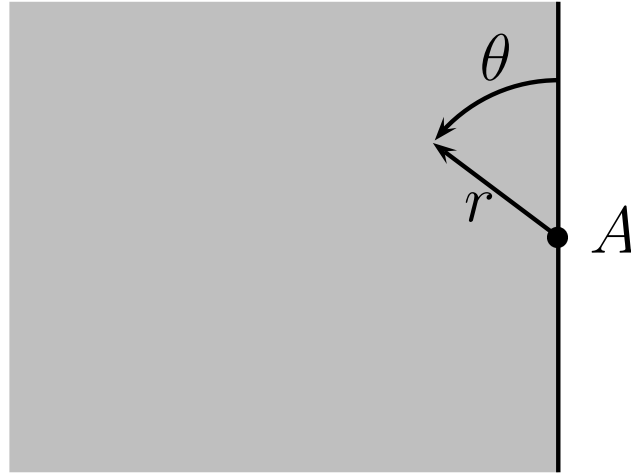
Ordre 0 : u^0 , $(u_p)_0^0$, U_0^0



Champ de fente:

$$U_0^0(x, Y) = u^0(A) \exp(i\omega x), \quad \text{dans } \mathcal{O}_1.$$

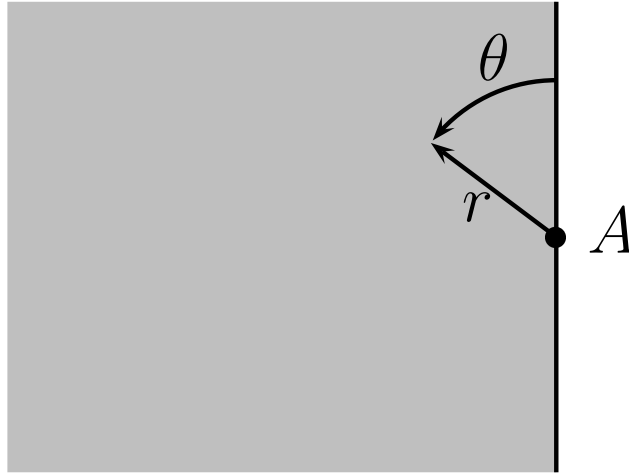
Ordre 1 : \underline{u}_1^0 , $(u_p)_1^0$, $(u_p)_1^1$, U_1^0 , U_1^1



Approximation de la solution exacte :

$$u^\varepsilon \simeq u^0 + \varepsilon u_1^0$$

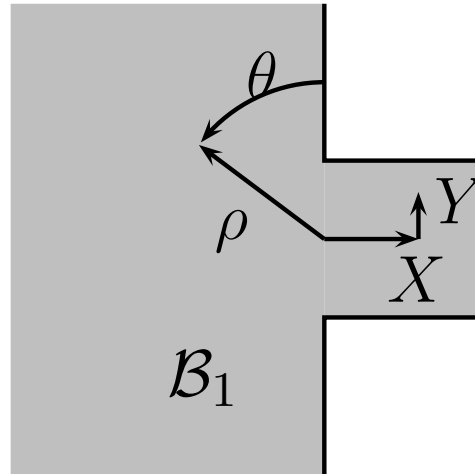
Ordre 1 : \underline{u}_1^0 , $(u_p)_1^0$, $(u_p)_1^1$, U_1^0 , U_1^1



Forme explicite de u_1^0

$$u_1^0(r, \theta) = -\frac{\omega}{2} u^0(A) H_0^{(1)}(\omega r).$$

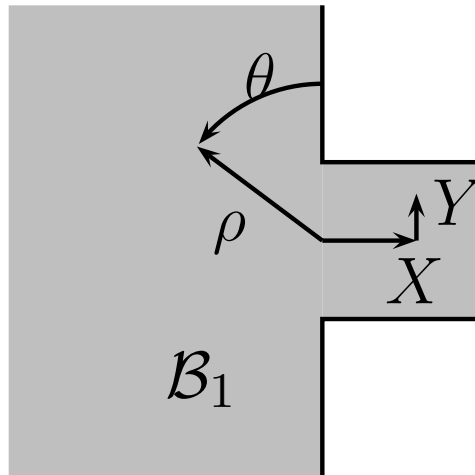
Ordre 1 : u_1^0 , $\underline{(u_p)_1^0}$, $\underline{(u_p)_1^1}$, U_1^0 , U_1^1



Approximation de la solution exacte :

$$\begin{cases} u^\varepsilon(\varepsilon X, \varepsilon Y) = u_p^\varepsilon(X, Y), \\ u_p^\varepsilon \simeq (u_p)_0^0 + \varepsilon (u_p)_1^0 + \varepsilon \log \varepsilon (u_p)_1^1. \end{cases}$$

Ordre 1 : u_1^0 , $\underline{(u_p)_1^0}$, $(u_p)_1^1$, U_1^0 , U_1^1

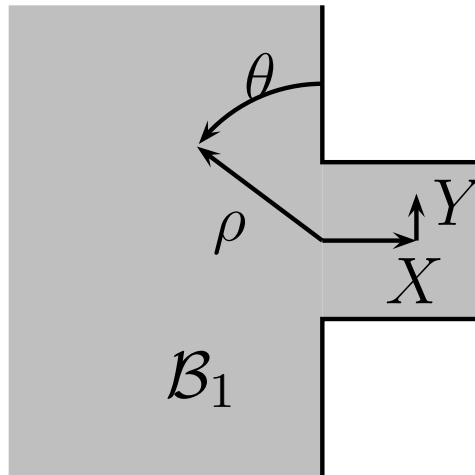


Champ proche :

Chercher $(u_p)_1^0 \in H_{loc}^1(B_1)$ tel que:

$$\begin{cases} \Delta(u_p)_1^0 = 0, & \text{dans } B_1 \\ \frac{\partial(u_p)_1^0}{\partial n} = 0, & \text{sur } \partial B_1. \end{cases}$$

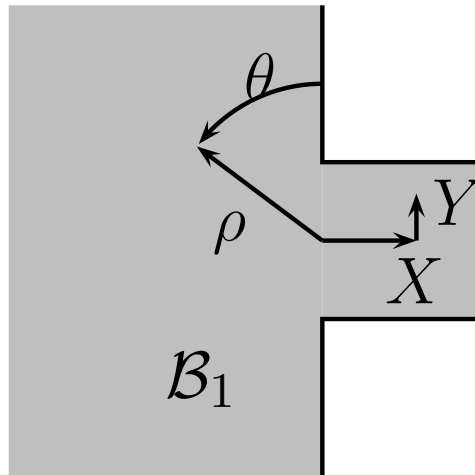
Ordre 1 : u_1^0 , $\underline{(u_p)_1^0}$, $(u_p)_1^1$, U_1^0 , U_1^1



Le comportement à l'infini dans le demi-espace:

$$(u_p)_1^0(\rho, \theta) - \frac{\partial u^0}{\partial y}(A) \rho \cos \theta + \frac{\omega}{2} u^0(A) \left[1 + \frac{2i}{\pi} (\log \rho + \gamma) \right] = O\left(\frac{1}{\rho}\right).$$

Ordre 1 : u_1^0 , $\underline{(u_p)_1^0}$, $(u_p)_1^1$, U_1^0 , U_1^1



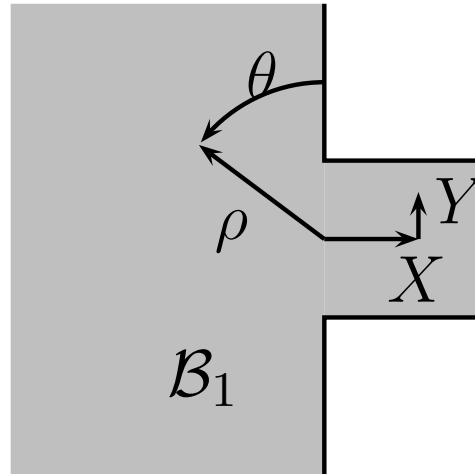
Le comportement à l'infini dans le demi-espace:

$$(u_p)_1^0(\rho, \theta) - \frac{\partial u^0}{\partial y}(A) \rho \cos \theta + \frac{\omega}{2} u^0(A) \left[1 + \frac{2i}{\pi} (\log \rho + \gamma) \right] = O\left(\frac{1}{\rho}\right).$$

Le comportement à l'infini dans la fente:

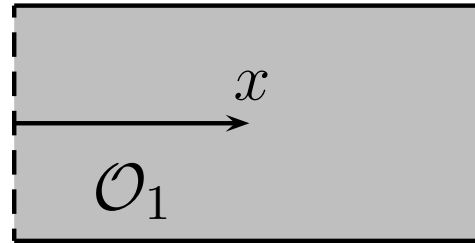
$$(u_p)_1^0(X, Y) - i \omega u^0(A) X = O(1).$$

Ordre 1 : u_1^0 , $(u_p)_1^0$, $\underline{(u_p)_1^1}$, U_1^0 , U_1^1



$$(u_p)_1^1 = -\frac{i\omega}{\pi} u^0(A)$$

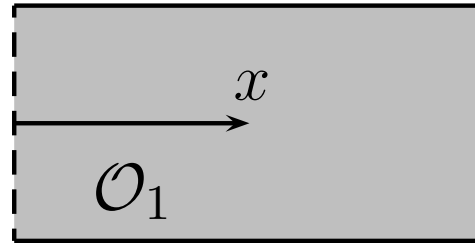
Ordre 1 : u_1^0 , $(u_p)_1^0$, $(u_p)_1^1$, U_1^0 , U_1^1



Approximation de la solution exacte :

$$\begin{cases} u^\varepsilon(x, \varepsilon Y) = U^\varepsilon(x, Y), \\ U^\varepsilon \simeq U_0^0 + \varepsilon U_1^0 + \varepsilon \log \varepsilon U_1^1. \end{cases}$$

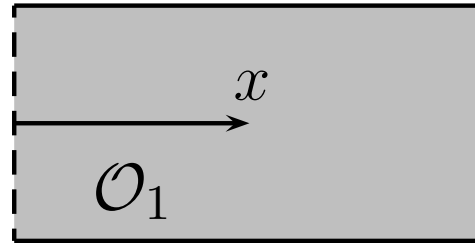
Ordre 1 : u_1^0 , $(u_p)_1^0$, $(u_p)_1^1$, U_1^0 , U_1^1



Le champ de fente:

$$U_1^0(x) = \int_0^1 \mathcal{U}_1^0(0, Y) dY \exp(i\omega x),$$

Ordre 1 : u_1^0 , $(u_p)_1^0$, $(u_p)_1^1$, U_1^0 , U_1^1

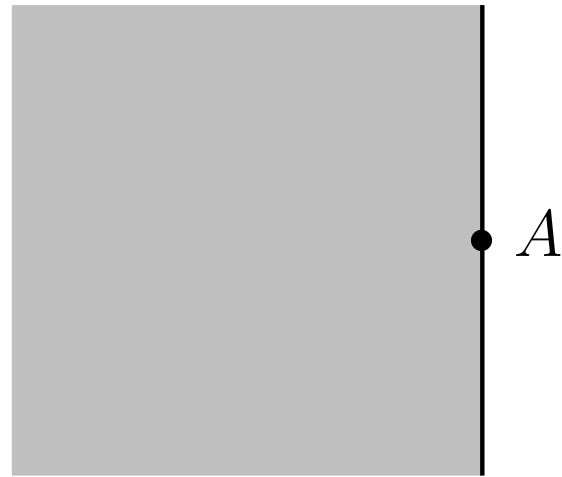


Le champ de fente:

$$U_1^1(x) = -\frac{i\omega}{\pi} u^0(A) \exp(i\omega x).$$

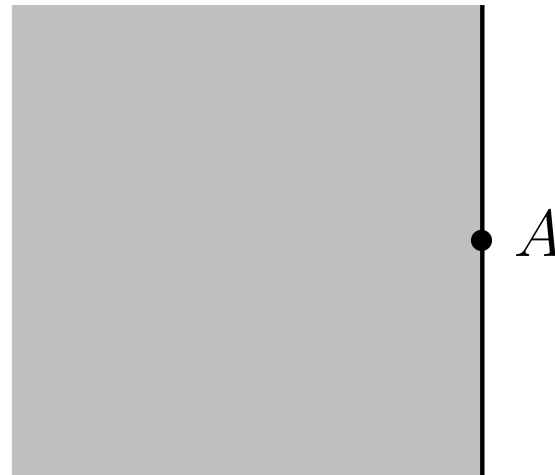
Les champs lointains d'ordre $i > 1$

- Les champs u_i^k sont définis dans tout le **demi-espace**:



Les champs lointains d'ordre $i > 1$

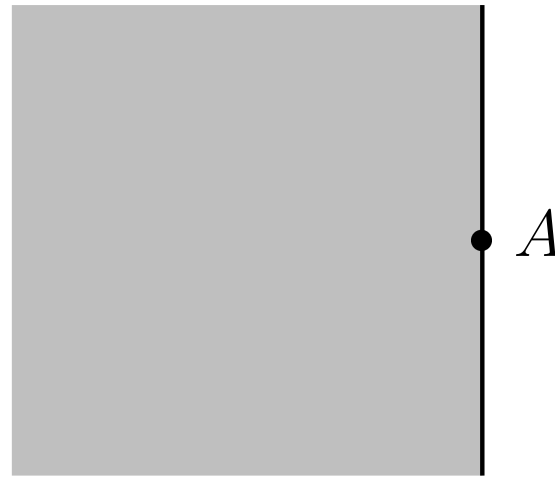
- Les champs u_i^k sont définis dans tout le **demi-espace**:



- Les champs lointains u_i^k
 - vérifient l'équation de **Helmholtz homogène**
 - sont **singuliers** au voisinage de l'origine
 - sont sortants à l'infini

Les champs lointains d'ordre $i > 1$

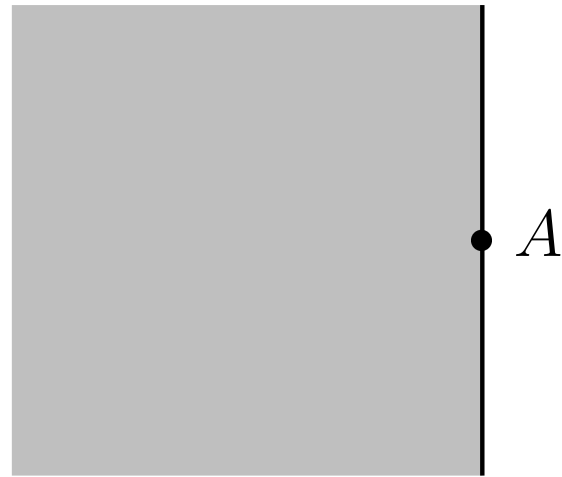
- Les champs u_i^k sont définis dans tout le **demi-espace**:



- $$u_i^k = \sum_{p=0}^{+\infty} a_p H_p^{(1)}(\omega r) \cos p\theta$$

Les champs lointains d'ordre $i > 1$

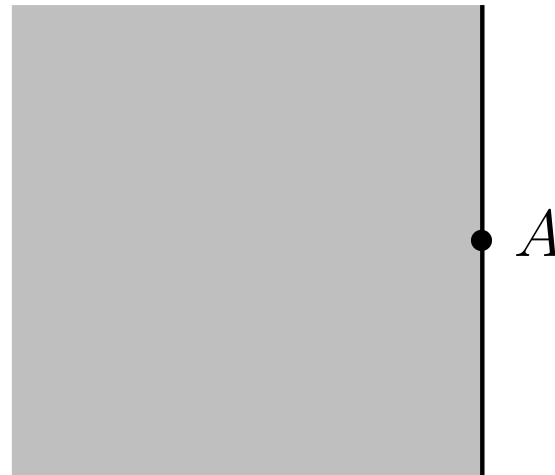
- Les champs u_i^k sont définis dans tout le **demi-espace**:



- $$u_i^k = \sum_{p=0}^{i-k-1} a_p H_p^{(1)}(\omega r) \cos p\theta$$

Les champs lointains d'ordre $i > 1$

- Les champs u_i^k sont définis dans tout le **demi-espace**:



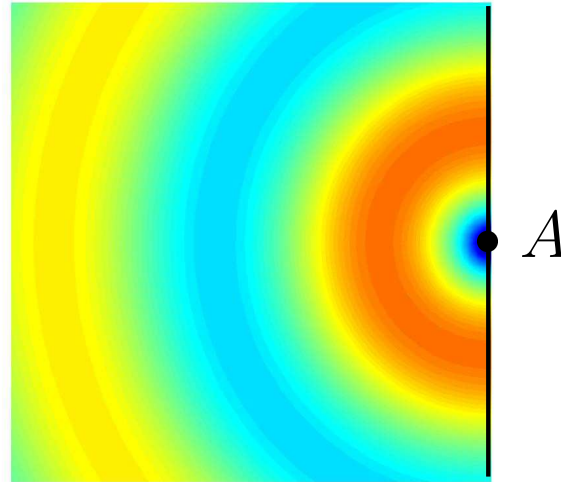
- $$u_i^k = \sum_{p=0}^{i-k-1} a_p H_p^{(1)}(\omega r) \cos p\theta$$

Les a_p sont fonctions des termes d'**ordre inférieur**

Les champs lointains d'ordre $i > 1$

- Les champs u_i^k sont définis dans tout le **demi-espace**:

$$\text{Im}(H_0^{(1)}(\omega r))$$



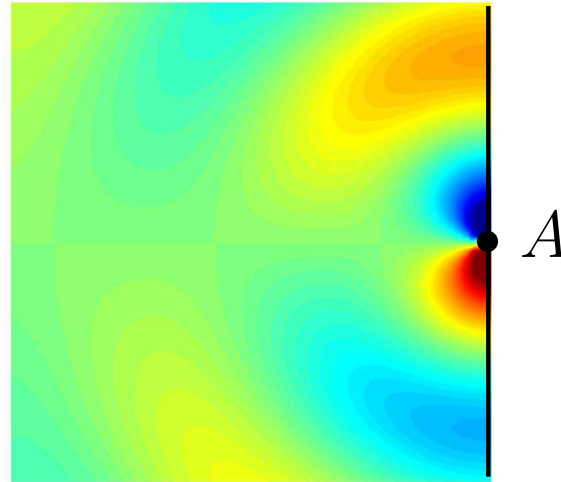
- $$u_i^k = \sum_{p=0}^{i-k-1} a_p H_p^{(1)}(\omega r) \cos p\theta$$

Les a_p sont fonctions des termes d'**ordre inférieur**

Les champs lointains d'ordre $i > 1$

- Les champs u_i^k sont définis dans tout le **demi-espace**:

$$\text{Im}(H_1^{(1)}(\omega r) \cos \theta)$$

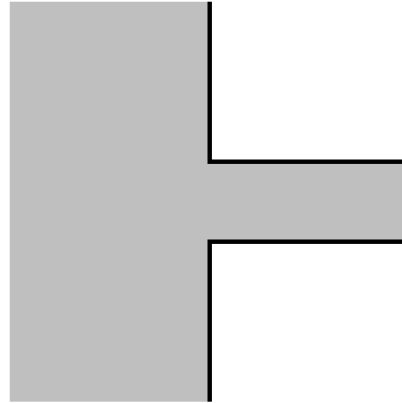


- $$u_i^k = \sum_{p=0}^{i-k-1} a_p H_p^{(1)}(\omega r) \cos p\theta$$

Les a_p sont fonctions des termes d'**ordre inférieur**

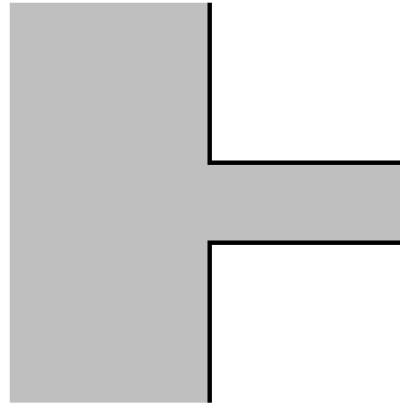
Les champs proches d'ordre $i > 1$

- Les $(u_p)_i^k(X, Y)$ sont définis sur le domaine **canonique**:



Les champs proches d'ordre $i > 1$

- Les $(u_p)_i^k(X, Y)$ sont définis sur le domaine **canonique**:



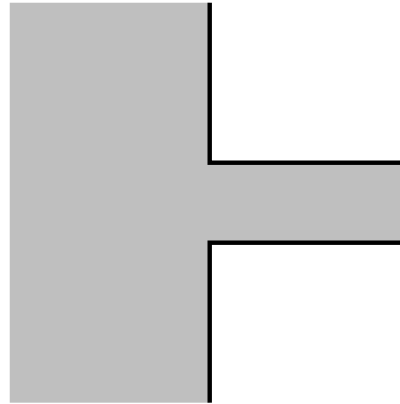
- par des équations de **Laplace**:

$$\Delta(u_p)_i^k = 0, \quad (i = k \text{ ou } k + 1),$$

$$\Delta(u_p)_i^k = -\omega^2 (u_p)_{i-2}^k, \quad (i \geq k + 2),$$

Les champs proches d'ordre $i > 1$

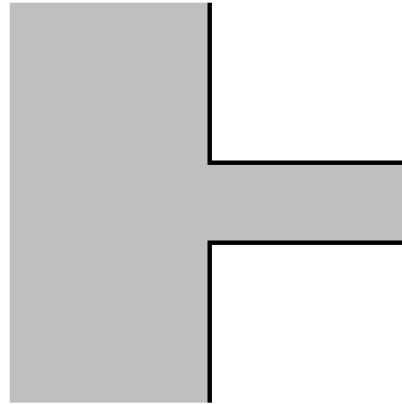
- Les $(u_p)_i^k(X, Y)$ sont définis sur le domaine **canonique**:



- par des équations de **Laplace**:
- par des **croissances** polynomiales à l'infini:
 - Les **croissances** dans le demi-espace sont fonctions des champs **lointains d'ordre inférieur ou égal**
 - Les **croissances** dans la fente sont fonctions des champs de **fente d'ordre inférieur**

Les champs proches d'ordre $i > 1$

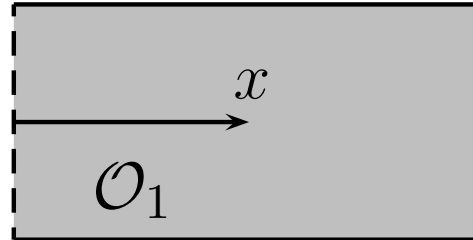
- Les $(u_p)_i^k(X, Y)$ sont définis sur le domaine **canonique**:



- Preuve de l'**existence-unicité**:
 - Avec des fonctions de troncature, on retire le comportement croissant à l'infini des $(u_p)_i^k$
 - On utilise la **théorie variationnelle** "classique" (espace de Sobolev à poids, Leroux, Hardy,...)

Les champs de fente d'ordre $i > 1$

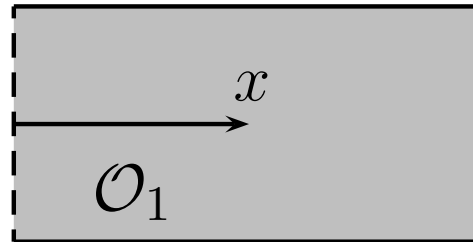
- Les U_i^k sont définis sur le domaine **canonique**:



- $$U_i^k(x) = \int_0^1 (u_p)_i^k(0, Y) dY \exp i\omega x$$

Les champs de fente d'ordre $i > 1$

- Les U_i^k sont définis sur le domaine **canonique**:



- Les U_i^k ne dépendent que de x .

- $$U_i^k(x) = \int_0^1 (u_p)_i^k(0, Y) dY \exp i\omega x$$

Quelques propriétés

On observe que:

- Plus $i - k$ est grand plus u_i^k est **singulier** à l'origine:

Termes en r^{-p} , $p = 0, \dots, i - k - 1$

Quelques propriétés

On observe que:

- Plus $i - k$ est grand plus u_i^k est **singulier** à l'origine:

Termes en r^{-p} , $p = 0, \dots, i - k - 1$

- Plus $i - k$ est grand plus $(u_p)_i^k$ est **croissant**:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Termes en } \rho^p, \quad p = 0, \dots, i - k, \\ \text{Termes en } X^p, \quad p = 0, \dots, i - k, \end{array} \right.$

Quelques propriétés

On observe que:

- Plus $i - k$ est grand plus u_i^k est **singulier** à l'origine:

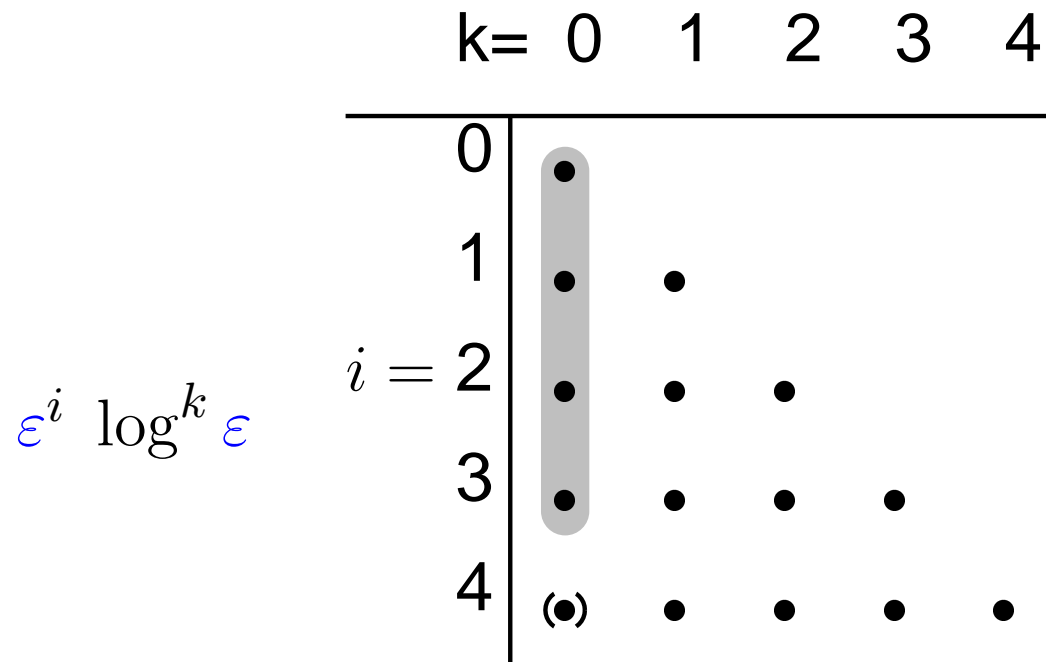
Termes en r^{-p} , $p = 0, \dots, i - k - 1$

- Plus $i - k$ est grand plus $(u_p)_i^k$ est **croissant**:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Termes en } \rho^p, \quad p = 0, \dots, i - k, \\ \text{Termes en } X^p, \quad p = 0, \dots, i - k, \end{array} \right.$

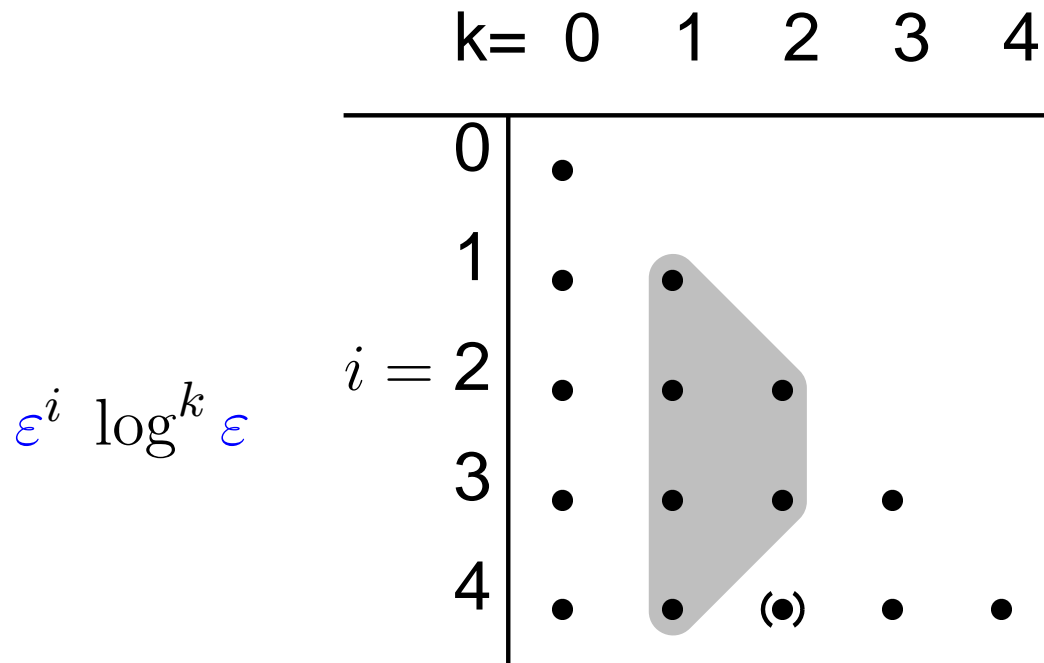
- Lorsque l'**ordre** i augmente, on a $O(\frac{i^2}{2})$ ($\times 3$) termes à calculer...

Diagramme de dépendance des correcteurs



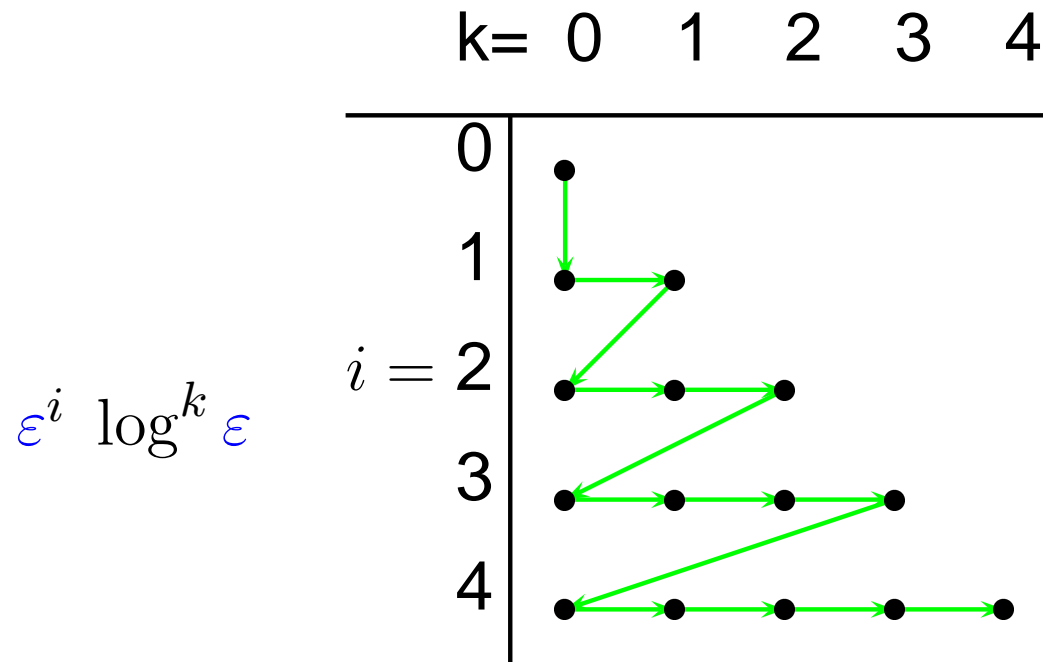
Chaque point correspond au triplet $(u_i^k, (u_p)_i^k, U_i^k)$.

Diagramme de dépendance des correcteur



Chaque point correspond au triplet $(u_i^k, (u_p)_i^k, U_i^k)$.

Ordonnancement naturel des calculs



Chaque point correspond au triplet $(u_i^k, (u_p)_i^k, U_i^k)$.

Dérivation des termes des dév. asympt.

- On recherche la solution sous la forme:

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k \quad (\text{Champ lointain})$$

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k (u_p)_i^k \quad (\text{Champ proche})$$

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k U_i^k \quad (\text{Champ de fente})$$

Dérivation des termes des dév. asympt.

- On recherche la solution sous la forme:

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k \quad (\text{Champ lointain})$$

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k (u_p)_i^k \quad (\text{Champ proche})$$

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k U_i^k \quad (\text{Champ de fente})$$

- On injecte les équations volumiques et surfaciques

Dérivation des termes des dév. asympt.

- On recherche la solution sous la forme:

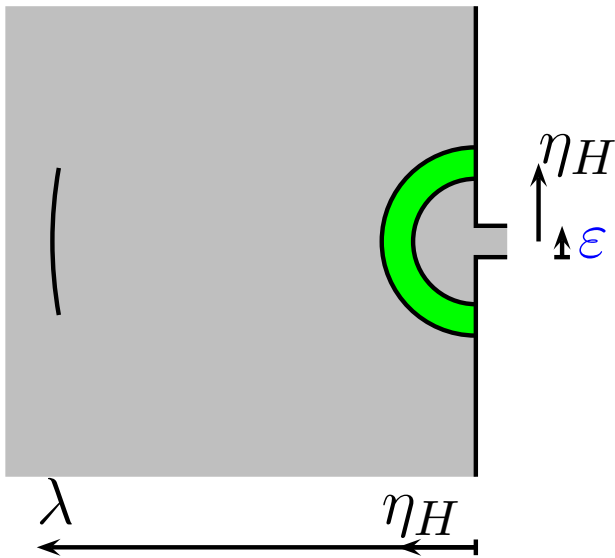
$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k \quad (\text{Champ lointain})$$

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k (u_p)_i^k \quad (\text{Champ proche})$$

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k U_i^k \quad (\text{Champ de fente})$$

- On **injecte les équations** volumiques et surfaciques
- Obtention des conditions de **couplage** (la difficulté)

Raccord lointain-proche



Dans une zone épaisse du type:

$$\epsilon \ll \eta_H \ll \lambda.$$

On traduit le raccord:

$$u^\epsilon(\eta_H, \theta) = (u_p)^\epsilon\left(\frac{\eta_H}{\epsilon}, \theta\right).$$

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \epsilon^i (\log \epsilon)^k u_i^k(\eta_H, \theta) \simeq \sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \epsilon^i (\log \epsilon)^k (u_p)_i^k\left(\frac{\eta_H}{\epsilon}, \theta\right)$$

$$\eta_H \rightarrow 0 \qquad \frac{\eta_H}{\epsilon} \rightarrow +\infty$$

Raccord lointain-proche

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k(\eta_H, \theta) \simeq \sum_{i \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k (u_p)_i^k\left(\frac{\eta_H}{\varepsilon}, \theta\right)$$

$\eta_H \rightarrow 0$ $\frac{\eta_H}{\varepsilon} \rightarrow +\infty$

On **développe**

- la série de gauche suivant η_H proche de **0**
- la série de droite suivant η_H/ε proche de l'**infini**

On **identifie** terme à terme les deux séries.

Raccord lointain-proche

Nous obtenons ainsi des **systèmes matricielles** et non plus des **égalités formelles** entre des séries:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_i^k(r, \theta) = \sum_{p=0}^{+\infty} (a_i^k)^p H_p^{(1)}(\omega r) \cos p\theta \\ (u_p)_i^k(R, \theta) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{p=0}^{+\infty} (A_i^k)_l^p R^l \cos p\theta + (B_i^k)_l^p R^l \cos p\theta \log \end{array} \right.$$

Il n'y a qu'un **nombre fini** de $(a_i^k)^p$ différents de 0

\implies Le développement de u_i^k a donc un sens

Raccord lointain-proche

Nous obtenons ainsi des **systèmes matricielles** et non plus des **égalités formelles** entre des séries:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_i^k(r, \theta) = \sum_{p=0}^{+\infty} (a_i^k)^p H_p^{(1)}(\omega r) \cos p\theta \\ (u_p)_i^k(R, \theta) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{p=0}^{+\infty} (A_i^k)_l^p R^l \cos p\theta + (B_i^k)_l^p R^l \cos p\theta \log \end{array} \right.$$

Pour $l \geq 0$, il n'y a qu'un **nombre fini** de

$$(A_i^k)_l^p \text{ et } (B_i^k)_l^p$$

différents de 0

Raccord lointain-proche

Nous obtenons ainsi des **systèmes matricielles** et non plus des **égalités formelles** entre des séries:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_i^k(r, \theta) = \sum_{p=0}^{+\infty} (a_i^k)^p H_p^{(1)}(\omega r) \cos p\theta \\ (u_p)_i^k(R, \theta) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{p=0}^{+\infty} (A_i^k)_l^p R^l \cos p\theta + (B_i^k)_l^p R^l \cos p\theta \log R \end{array} \right.$$

Pour $l < 0$, nous montrons alors le **contrôle** :

$$\left| \sum_{l=-\infty}^0 \sum_{p=0}^{+\infty} (A_i^k)_l^p R^l \cos p\theta + (B_i^k)_l^p R^l \cos p\theta \log R \right| = O(1)$$

Raccord lointain-proche

Nous obtenons ainsi des **systèmes matricielles** et non plus des **égalités formelles** entre des séries:

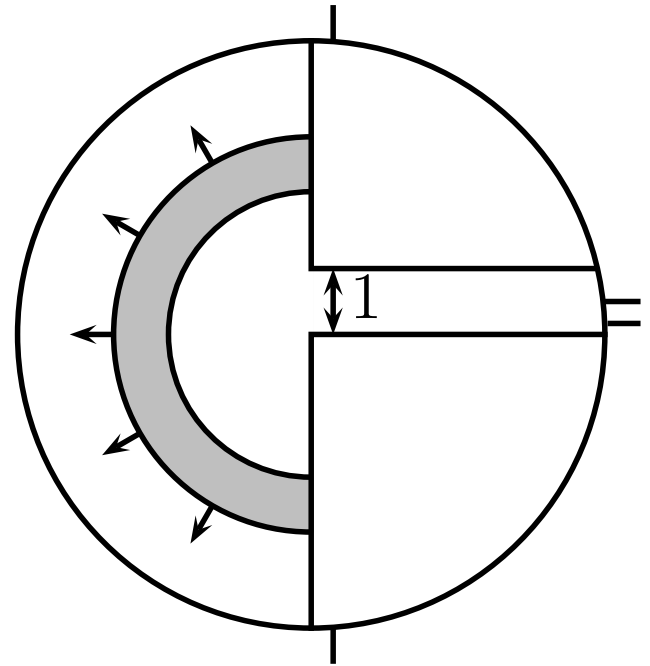
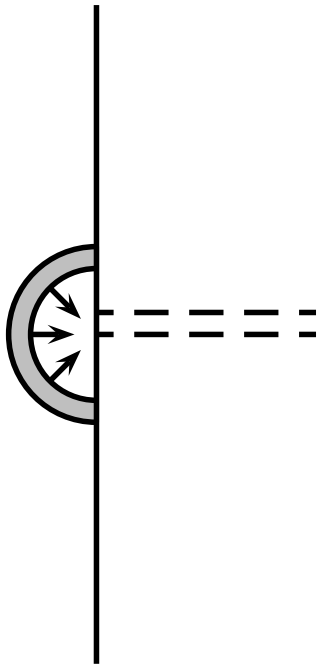
$$\left\{ \begin{array}{l} u_i^k(r, \theta) = \sum_{p=0}^{+\infty} (a_i^k)^p H_p^{(1)}(\omega r) \cos p\theta \\ (u_p)_i^k(R, \theta) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{p=0}^{+\infty} (A_i^k)_l^p R^l \cos p\theta + (B_i^k)_l^p R^l \cos p\theta \log \end{array} \right.$$

\implies Le développement de $(u_p)_i^k$ a donc un sens

Le couplage entre les champs

- Le couplage champ lointain-champ proche:

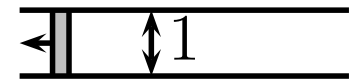
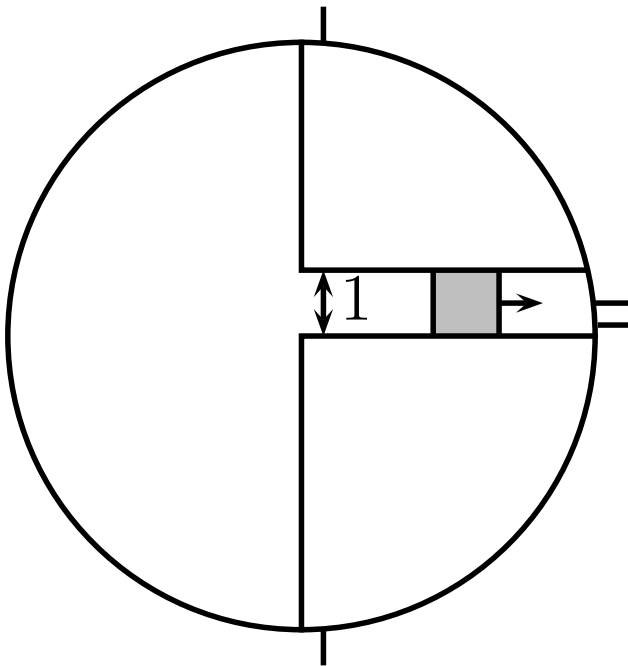
Le comportement du champ lointain en l'origine est couplé avec le comportement du champ proche à l'infini dans le demi-espace



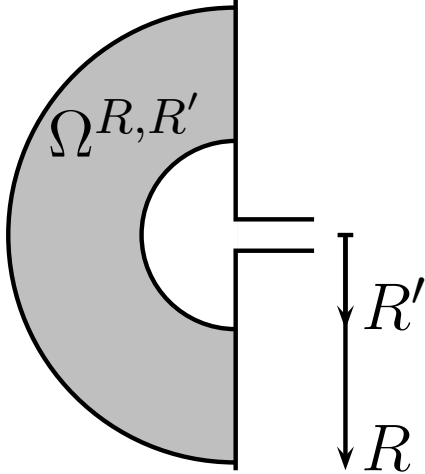
Le couplage entre les champs

- Le couplage champ lointain-champ proche:
- Le couplage champ proche-champ de fente

Le comportement du champ proche dans la fente à l'infini est couplé avec le comportement à l'origine du champ de fente (valeurs des dérivées)

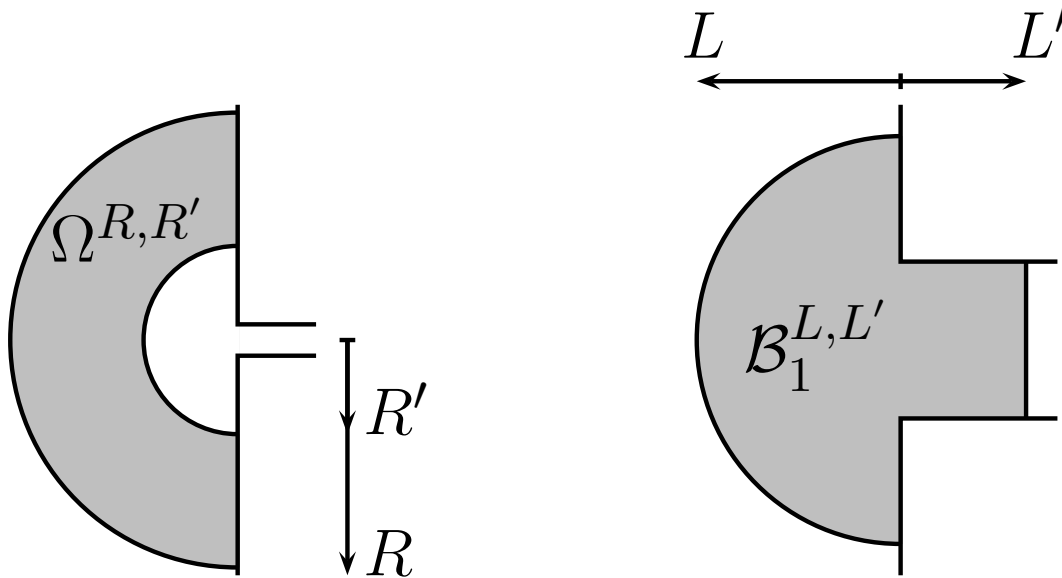


Analyse mathématique



$$\left\| u^\varepsilon - u^0 - \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{i-1} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k \right\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{n+1} (\log \varepsilon)^n \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

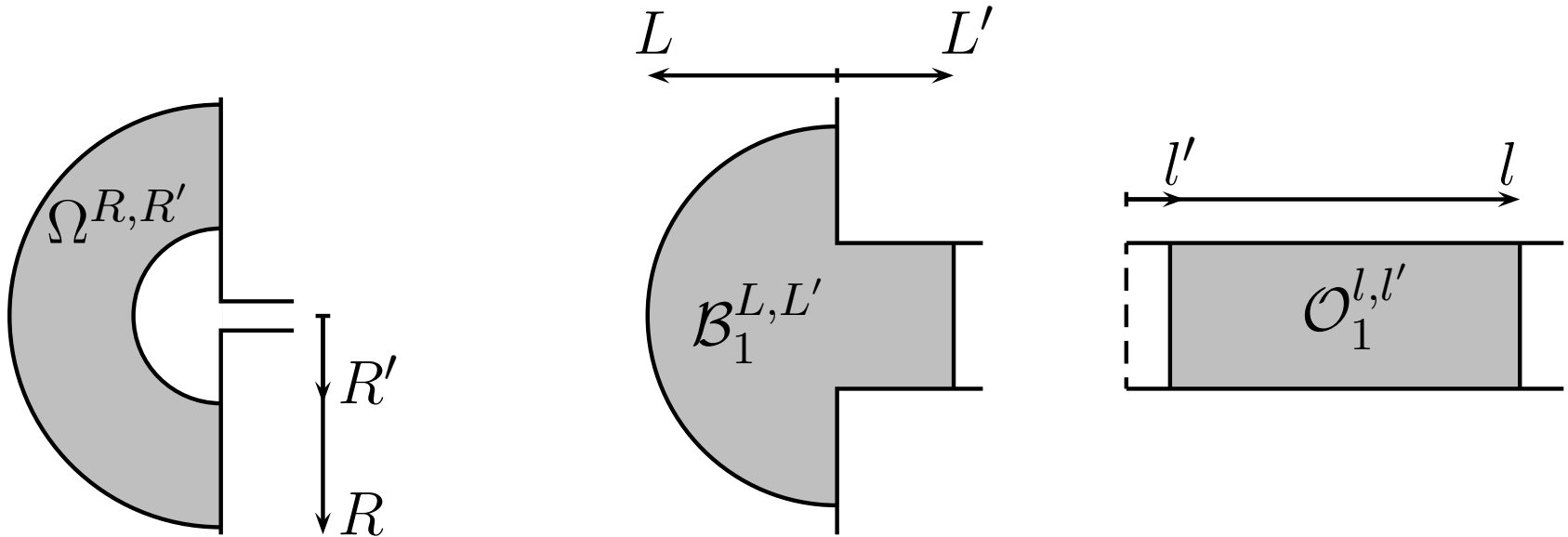
Analyse mathématique



$$\left\| \mathbf{u}^\varepsilon - \mathbf{u}^0 - \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{i-1} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k \mathbf{u}_i^k \right\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{n+1} (\log \varepsilon)^n \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

$$\left\| \mathbf{u}_p^\varepsilon - \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^i \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k (\mathbf{u}_p)_i^k \right\|_{H^1(\mathcal{B}_1^{L,L'})} \leq C \varepsilon^{n+1} (\log \varepsilon)^{n+1} \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

Analyse mathématique



$$\left\| \mathbf{u}^\varepsilon - \mathbf{u}^0 - \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{i-1} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k \mathbf{u}_i^k \right\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{n+1} (\log \varepsilon)^n \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

$$\left\| \mathbf{u}_p^\varepsilon - \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^i \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k (\mathbf{u}_p)_i^k \right\|_{H^1(\mathcal{B}_1^{L,L'})} \leq C \varepsilon^{n+1} (\log \varepsilon)^{n+1} \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

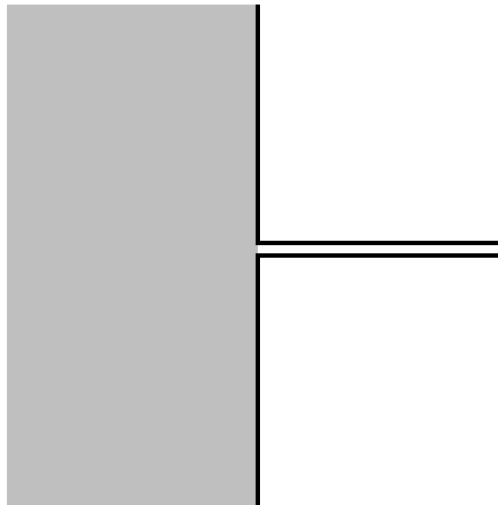
$$\left\| \mathbf{U}^\varepsilon - \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^i \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k \mathbf{U}_i^k \right\|_{H^1(\mathcal{O}_1^{l,l'})} \leq C \varepsilon^{n+1} (\log \varepsilon)^{n+1} \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

Idée de la preuve

Nous souhaitons définir une **approximation** \tilde{u}_n^ε de la solution exacte qui **coïncide** avec:

- le développement **tronqué** du **champ lointain** loin de la fente dans le demi-espace

$$u_n^{H,\varepsilon}(x, y) = u^0(x, y) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{i-1} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k(x, y)$$

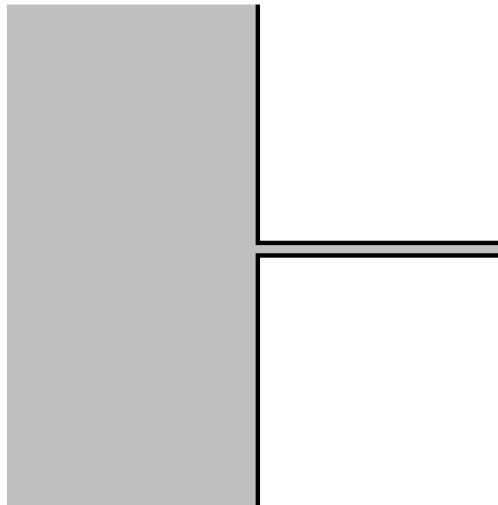


Idée de la preuve

Nous souhaitons définir une **approximation** \tilde{u}_n^ε de la solution exacte qui **coïncide** avec:

- le développement **tronqué** en **champ proche** au voisinage de l'embouchure de la fente

$$u_n^{N,\varepsilon}(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^i \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k (u_p)_i^k \left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{y}{\varepsilon} \right)$$

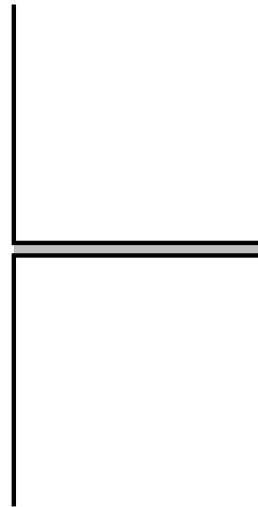


Idée de la preuve

Nous souhaitons définir une **approximation** \tilde{u}_n^ε de la solution exacte qui **coïncide** avec:

- le développement **tronqué** en **champ de fente** loin dans la fente

$$u_n^{S,\varepsilon}(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^i \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k U_i^k(x, \frac{y}{\varepsilon})$$



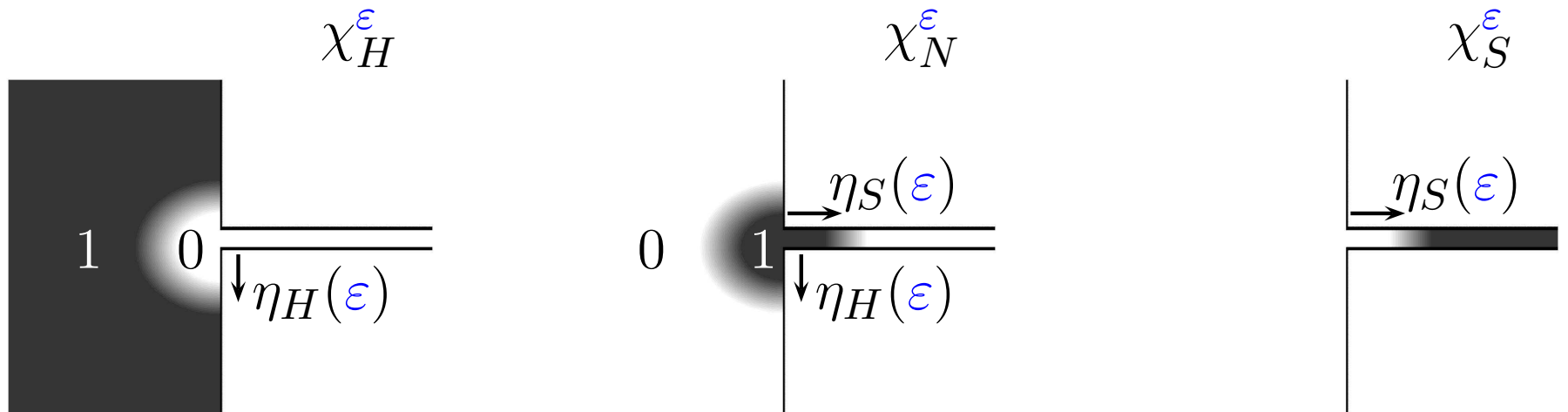
Idée de la preuve

Introduction d'une partition de l'unité

$$\tilde{u}_n^\varepsilon(r, \theta) = \chi_H^\varepsilon u_n^{H,\varepsilon} + \chi_N^\varepsilon u_n^{N,\varepsilon} + \chi_S^\varepsilon u_n^{S,\varepsilon}$$

avec

$$\chi_H^\varepsilon + \chi_N^\varepsilon + \chi_S^\varepsilon = 1.$$

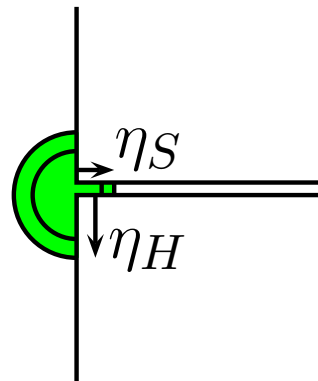


Idée de la preuve

Equation portant sur l'**erreur** $e_n^\varepsilon = \tilde{u}_n^\varepsilon - u^\varepsilon$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta e_n^\varepsilon + \omega^2 e_n^\varepsilon = (\delta_N)_n^\varepsilon + (\delta_{H-N})_n^\varepsilon + (\delta_{S-N})_n^\varepsilon, \quad \text{dans } \Omega_\varepsilon, \\ \frac{\partial e_n^\varepsilon}{\partial n} = 0, \quad \text{sur } \partial\Omega_\varepsilon, \\ e_n^\varepsilon \text{ est sortante.} \end{array} \right.$$

$(\delta_N)_n^\varepsilon$ est relié à l'**approximation** de l'équation de **Helmholtz** par le champ **proche**

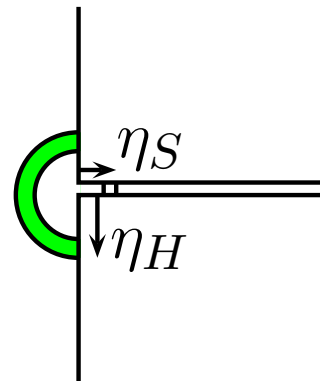


Idée de la preuve

Equation portant sur l'erreur $e_n^\varepsilon = \tilde{u}_n^\varepsilon - u^\varepsilon$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta e_n^\varepsilon + \omega^2 e_n^\varepsilon = (\delta_N)_n^\varepsilon + (\delta_{H-N})_n^\varepsilon + (\delta_{S-N})_n^\varepsilon, \quad \text{dans } \Omega_\varepsilon, \\ \frac{\partial e_n^\varepsilon}{\partial n} = 0, \quad \text{sur } \partial\Omega_\varepsilon, \\ e_n^\varepsilon \text{ est sortante.} \end{array} \right.$$

$(\delta_{H-N})_n^\varepsilon$ est relié à l'erreur de raccord entre champ lointain et champ proche

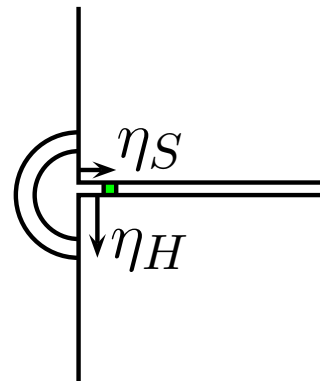


Idée de la preuve

Equation portant sur l'**erreur** $e_n^\varepsilon = \tilde{u}_n^\varepsilon - u^\varepsilon$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta e_n^\varepsilon + \omega^2 e_n^\varepsilon = (\delta_N)_n^\varepsilon + (\delta_{H-N})_n^\varepsilon + (\delta_{S-N})_n^\varepsilon, \quad \text{dans } \Omega_\varepsilon, \\ \frac{\partial e_n^\varepsilon}{\partial n} = 0, \quad \text{sur } \partial\Omega_\varepsilon, \\ e_n^\varepsilon \text{ est sortante.} \end{array} \right.$$

$(\delta_{S-N})_n^\varepsilon$ est relié à l'**erreur de raccord** entre champ de **fente** et champ **proche**



Idée de la preuve

Equation portant sur l'**erreur** $e_n^\varepsilon = \tilde{u}_n^\varepsilon - u^\varepsilon$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta e_n^\varepsilon + \omega^2 e_n^\varepsilon = (\delta_N)_n^\varepsilon + (\delta_{H-N})_n^\varepsilon + (\delta_{S-N})_n^\varepsilon, \quad \text{dans } \Omega_\varepsilon, \\ \frac{\partial e_n^\varepsilon}{\partial n} = 0, \quad \text{sur } \partial\Omega_\varepsilon, \\ e_n^\varepsilon \text{ est sortante.} \end{array} \right.$$

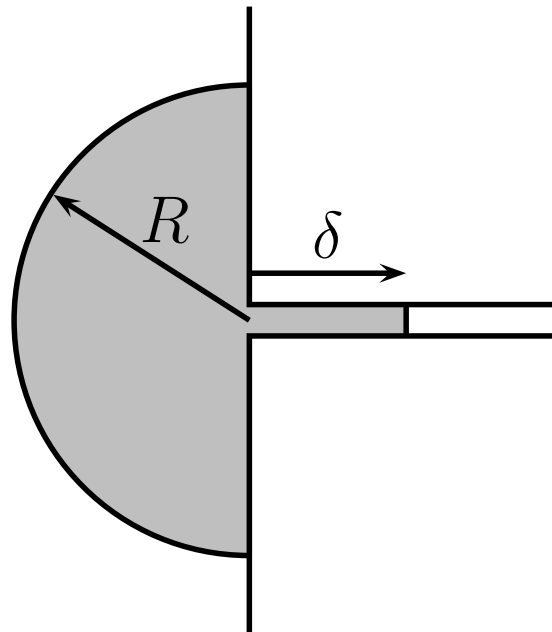
Démarche asymptotique classique:

- **Stabilité**: raisonnement par l'**absurde** (Helmholtz)
- **Consistance**: plus spécifique et technique (étude des singularités et croissances par séparation de variables)

Idée de la preuve

L'estimation d'erreur globale

$$\left\{ \begin{array}{l} \|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega_\varepsilon^{R,\delta})} \leq C \left[\left(\eta_H(\varepsilon) \right)^n + \left(\frac{\varepsilon}{\eta_H(\varepsilon)} \right)^n \right] \\ + C \left[\left(\eta_S(\varepsilon) \right)^n + \left(\frac{\varepsilon}{\eta_S(\varepsilon)} \right)^n \right]. \end{array} \right.$$



Idée de la preuve

L'estimation d'erreur globale

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\| u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon \right\|_{H^1(\Omega_\varepsilon^{R,\delta})} \leq C \left[\left(\eta_H(\varepsilon) \right)^n + \left(\frac{\varepsilon}{\eta_H(\varepsilon)} \right)^n \right] \\ + C \left[\left(\eta_S(\varepsilon) \right)^n + \left(\frac{\varepsilon}{\eta_S(\varepsilon)} \right)^n \right]. \end{array} \right.$$

On choisit $\eta_H(\varepsilon)$ et $\eta_S(\varepsilon)$ pour **optimiser** cette relation

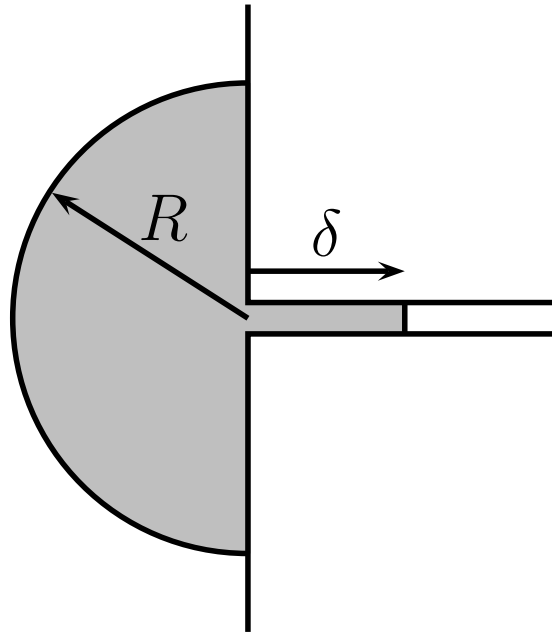
$$\eta_H(\varepsilon) = \eta_S(\varepsilon) = \sqrt{\varepsilon}$$

Nous tirons

$$\left\| u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon \right\|_{H^1(\Omega_\varepsilon^{R,\delta})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}}$$

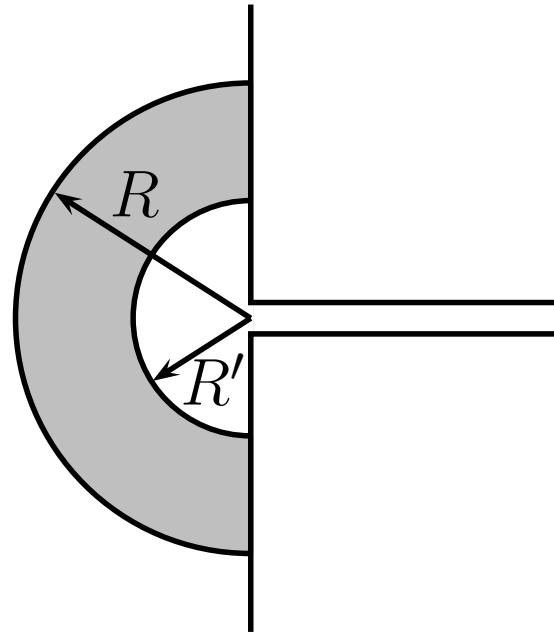
Idée de la preuve

$$\|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega_\varepsilon^{R,\delta})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}}$$



Idée de la preuve

$$\|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega_\varepsilon^{R,\delta})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}} \implies \|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}}$$



Idée de la preuve

$$\|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega_\varepsilon^{R,\delta})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}} \implies \|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}}$$

Dans la zone de **champ lointain**:

$$\tilde{u}_n^\varepsilon = u_n^{H,\varepsilon} = u^0 + \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{i-1} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k$$

Idée de la preuve

$$\|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega_\varepsilon^{R,\delta})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}} \implies \|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}}$$

Dans la zone de **champ lointain**:

$$\tilde{u}_n^\varepsilon = u_n^{H,\varepsilon} = u^0 + \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{i-1} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \|u^\varepsilon - u_{3n}^{H,\varepsilon}\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{\frac{3n}{2}} \\ \|u_{3n}^{H,\varepsilon} - u_n^{H,\varepsilon}\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{n+1} \log^n \varepsilon \end{array} \right.$$

Idée de la preuve

$$\|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega_\varepsilon^{R,\delta})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}} \implies \|u^\varepsilon - \tilde{u}_n^\varepsilon\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{\frac{n}{2}}$$

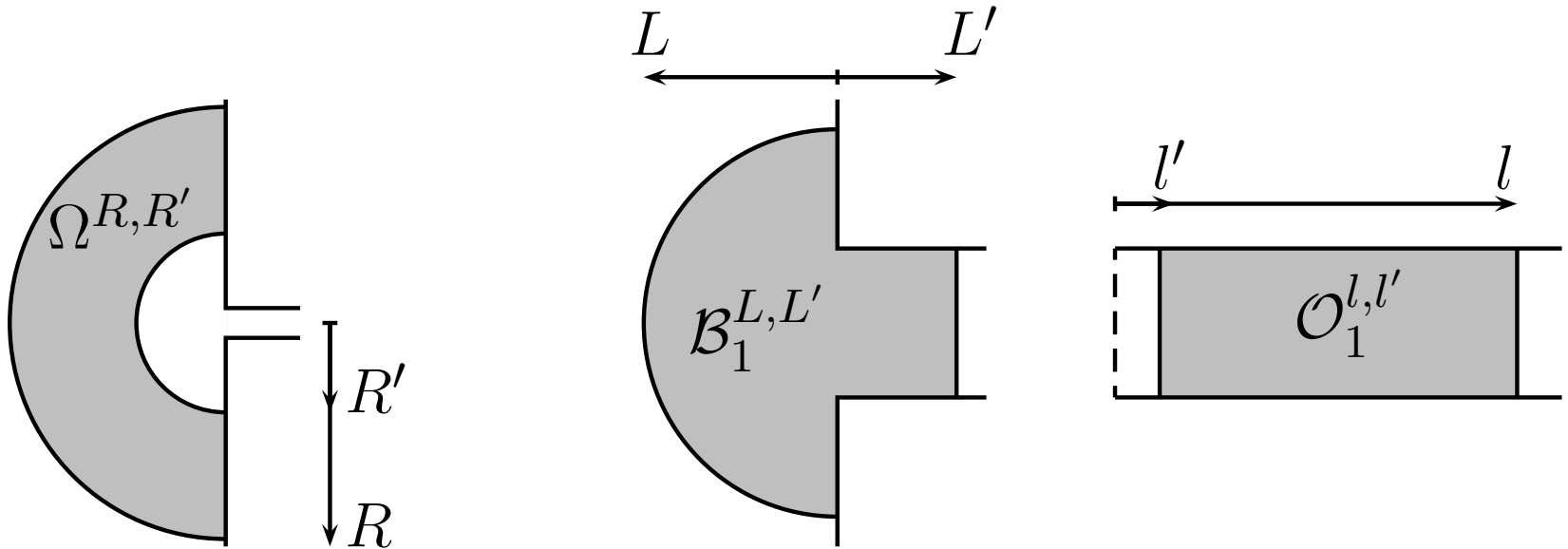
Dans la zone de **champ lointain**:

$$\tilde{u}_n^\varepsilon = u_n^{H,\varepsilon} = u^0 + \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{i-1} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k u_i^k$$

$$\begin{cases} \|u^\varepsilon - u_{3n}^{H,\varepsilon}\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{\frac{3n}{2}} \\ \|u_{3n}^{H,\varepsilon} - u_n^{H,\varepsilon}\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{n+1} \log^n \varepsilon \end{cases}$$

On conclut par **inégalité triangulaire**.

Analyse mathématique



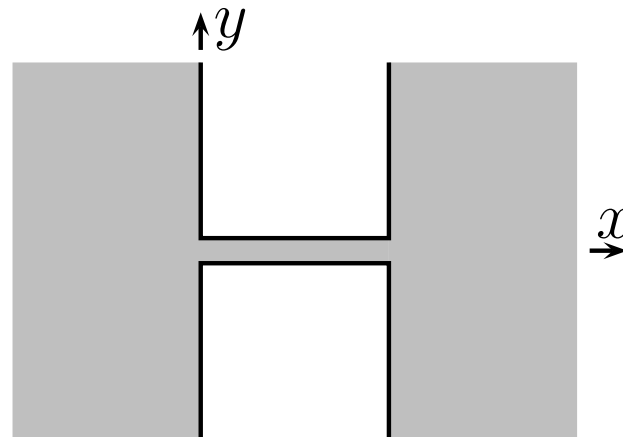
$$\left\| \mathbf{u}^\varepsilon - \mathbf{u}^0 - \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{i-1} \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k \mathbf{u}_i^k \right\|_{H^1(\Omega^{R,R'})} \leq C \varepsilon^{n+1} (\log \varepsilon)^n \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

$$\left\| \mathbf{u}_p^\varepsilon - \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^i \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k (\mathbf{u}_p)_i^k \right\|_{H^1(\mathcal{B}_1^{L,L'})} \leq C \varepsilon^{n+1} (\log \varepsilon)^{n+1} \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

$$\left\| \mathbf{U}^\varepsilon - \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^i \varepsilon^i (\log \varepsilon)^k \mathbf{U}_i^k \right\|_{H^1(\mathcal{O}_1^{l,l'})} \leq C \varepsilon^{n+1} (\log \varepsilon)^{n+1} \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

Perspectives

1. Analyse mathématique des fentes finies (phénomènes de **résonance**)



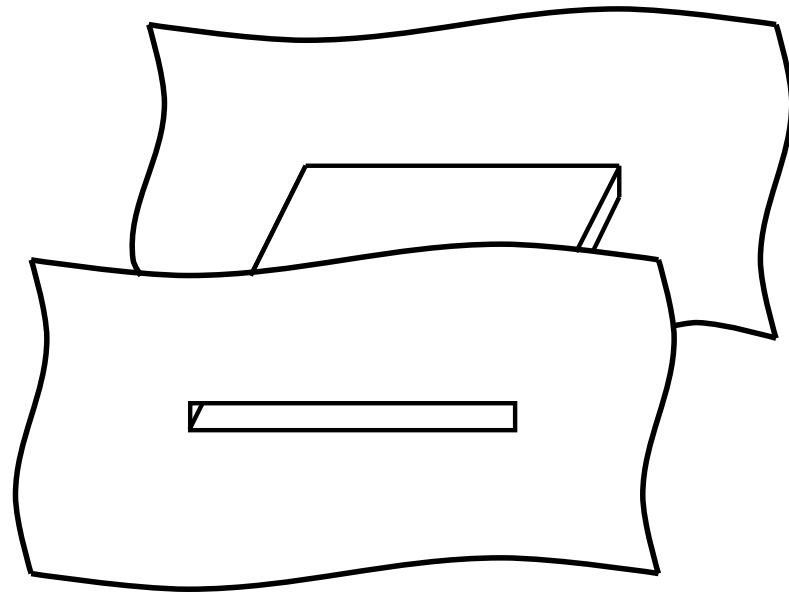
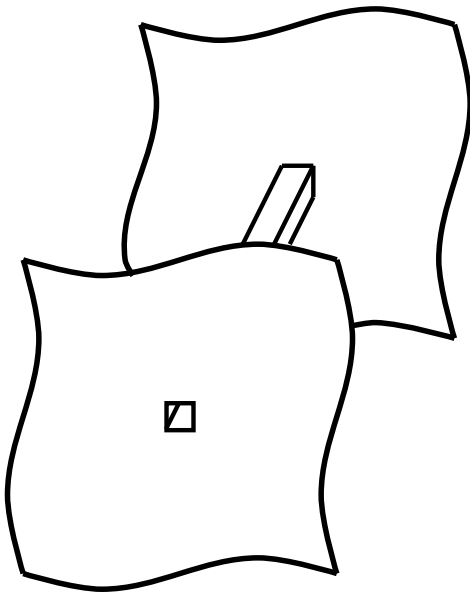
La difficulté: le résultat de **stabilité**.

Perspectives

1. Analyse mathématique des fentes finies (phénomènes de **résonance**)
2. Comparaison avec les techniques **multi-échelles**

Perspectives

1. Analyse mathématique des fentes finies (phénomènes de **résonance**)
2. Comparaison avec les techniques **multi-échelles**
3. Equations de **Maxwell** 3D



Perspectives

1. Analyse mathématique des fentes finies (phénomènes de **résonance**)
2. Comparaison avec les techniques **multi-échelles**
3. Equations de **Maxwell** 3D
4. Domaine **temporel** (équation d'évolution)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \Delta u = 0.$$