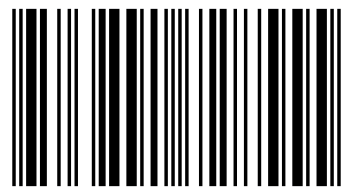


Résumé: Le travail présenté porte sur l'étude mathématique et la validation numérique d'une méthode de discrétisation de problèmes aux limites issus de la physique et de la mécanique dans des domaines tridimensionnels axisymétriques (c'est-à-dire invariants par rotation autour d'un axe). L'opérateur différentiel intérieur et celui de bord du problème tridimensionnel considéré satisfont aussi des propriétés d'axisymétrie. L'intérêt de travailler dans un domaine axisymétrique est que la solution du problème tridimensionnel, muni de conditions aux limites adéquates sur différentes parties de la frontière, admet un développement en coefficients de Fourier par rapport à la variable angulaire. En outre, chaque coefficient de Fourier est solution d'une famille dénombrable de problèmes bidimensionnels dans le domaine méridien, c'est-à-dire la section orthogonale à l'axe du domaine initial. Une des difficultés liées à cette réduction de dimension est que la mesure cartésienne est remplacée par une mesure avec poids, qui est due à l'utilisation de coordonnées cylindriques...



Maitre assistant Faculté universitaire Al Qunfudha, Arabie Saoudite. 2010: Thèse de doctorat de Mathématiques: Université de Pierre et Marie-Curie, Paris 6. 2000-2007 Directeur d'entreprise d'informatique. 2007-2010: Enseignant à l'ISSAT Sousse. 2010-2015: Maitre assistant à l'Institut préparatoire des Ingénieurs de Tunis.



978-3-8417-2855-5

EUE ÉDITIONS
UNIVERSITAIRES
EUROPÉENNES

Éléments spectraux avec joints



Jamil Satouri

Méthode d'éléments spectraux avec joints

Géométries axisymétriques

Satouri

Jamil Satouri

Méthode d'éléments spectraux avec joints

Jamil Satouri

**Méthode d'éléments spectraux avec
joints**

Géométries axisymétriques

Éditions universitaires européennes

Impressum / Mentions légales

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Information bibliographique publiée par la Deutsche Nationalbibliothek: La Deutsche Nationalbibliothek inscrit cette publication à la Deutsche Nationalbibliografie; des données bibliographiques détaillées sont disponibles sur internet à l'adresse <http://dnb.d-nb.de>.

Toutes marques et noms de produits mentionnés dans ce livre demeurent sous la protection des marques, des marques déposées et des brevets, et sont des marques ou des marques déposées de leurs détenteurs respectifs. L'utilisation des marques, noms de produits, noms communs, noms commerciaux, descriptions de produits, etc, même sans qu'ils soient mentionnés de façon particulière dans ce livre ne signifie en aucune façon que ces noms peuvent être utilisés sans restriction à l'égard de la législation pour la protection des marques et des marques déposées et pourraient donc être utilisés par quiconque.

Coverbild / Photo de couverture: www.ingimage.com

Verlag / Editeur:

Éditions universitaires européennes

ist ein Imprint der / est une marque déposée de

OmniScriptum GmbH & Co. KG

Bahnhofstraße 28, 66111 Saarbrücken, Deutschland / Allemagne

Email: info@omniscryptum.com

Herstellung: siehe letzte Seite /

Impression: voir la dernière page

ISBN: 978-3-8417-2855-5

Zugl. / Agréé par: Paris, Université Pierre et Marie Curie, 2010

Copyright / Droit d'auteur © 2016 OmniScriptum GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Tous droits réservés. Saarbrücken 2016

Remerciements

Je tiens à adresser ma plus profonde reconnaissance et toute mon admiration à Mme Saloua Aouadi et Mme Christine Bernardi qui m'ont beaucoup aidé à la réalisation de ce livre.

Introduction générale

Beaucoup de problèmes issus de la physique et de la mécanique sont formulés comme des problèmes aux limites dans des domaines tridimensionnels. Mais le calcul tridimensionnel coûte très cher et est parfois impossible avec les moyens actuels à cause de la complexité de l'équation aux dérivées partielles et de la géométrie du domaine. Il est classique, en mécanique de contourner la complexité de la géométrie tridimensionnelle et de réduire le domaine d'étude. Par exemple, pour les structures ayant deux dimensions petites par rapport à la troisième comme les barres, ou celles ayant une dimension petite par rapport aux deux autres comme les plaques ou les coques, on fait des approximations qui ramènent les problèmes initialement tridimensionnels à des problèmes respectivement monodimensionnels ou bidimensionnels [32]. Dans le cadre de cette thèse, on suppose que le domaine initial est invariant par rotation autour d'un axe (axisymétrique) et que l'opérateur intérieur et l'opérateur de bord satisfont des propriétés d'axisymétrie. Le problème peut alors être réduit, sans aucune approximation et par des développements en coefficient de Fourier par rapport à la variable angulaire, en une famille dénombrable de problèmes bidimensionnels. Cette réduction est d'autant plus intéressante que si en plus les données sont axisymétriques, seuls les coefficients de Fourier d'ordre zéro subsistent. Dans le cas de données initiales quelconques, une méthode d'approximation consiste à négliger les fréquences de grands ordres et réduire le problème initial à un nombre fini de problèmes bidimensionnels associés à un nombre fini de coefficients de Fourier. Ils y étudient en outre. L'erreur due à cette troncature a été étudiée dans [8] : il est prouvé que pour des données analytiques, cette erreur décroît exponentiellement par rapport à la troncature sur les fréquences. Ce type de problèmes axisymétriques a été traité par la méthode des éléments finis [14] et [15] et par la méthode spectrale [8], dans un cas d'une décomposition conforme avec une condition de continuité à travers les interfaces.

Le domaine axisymétrique le plus simple est évidemment le cylindre généré par un rectangle unique. Quoique intéressant et assez fréquent dans la physique, ce cas est restrictif pour les problèmes réels. C'est pourquoi on généralise à un domaine méridien polygonal qui peut donc être décomposé en un nombre fini de rectangles ou de trapèzes disjoints. Néanmoins, la présence de coins dans le domaine méridien induit des limitations sévères sur la régularité des solutions [29] et donc une faible vitesse de convergence lorsqu'on approche notre solution par une méthode spectrale ou d'éléments finis [21], [35]. On décompose alors la solution en une partie régulière, avec régularité optimale, et une combinaison linéaire de fonctions singulières [31].

Les méthodes de décomposition de domaines consistent à partager le domaine de résolution d'une équation aux dérivées partielles, en sous-domaines de plus petite taille et dans la mesure du possible de géométrie plus simple. Pour ces méthodes, les conditions de transmission (contraintes de raccord sur les interfaces) sont déterminantes pour une bonne approximation de la solution du problème initial, ainsi que pour l'efficacité numérique (coût de calcul, adaptation au parallélisme).

On distingue deux types de techniques de décomposition de domaines : conforme et non conforme. Pour des discrétisations de type variationnel, la conformité se traduit par

l'appartenance des fonctions discrètes à l'espace apparaissant dans la formulation variationnelle : comme ces fonctions sont, en général, très régulières sur chaque sous-domaine, cette appartenance se réduit à l'imposition de conditions de raccord appropriées sur les interfaces. Ainsi pour un problème de Laplace la conformité se traduit par la continuité des fonctions. Notons que ce type de raccord suppose, en général, une disposition particulière des sous-domaines, de leurs maillages est l'utilisation de discrétisations du même type sur chacun d'eux.

La méthode de joints s'inscrit dans le cadre de méthodes de décomposition de domaine sans recouvrement avec discrétisations de type variationnel. Elle a été introduite et étudiée pour des problèmes d'ordre deux, pour des éléments spectraux et pour le couplage des méthodes spectrales et de la méthode des éléments finis dans [18], [19], [20], [27] et [39], en fait la méthode fournit un cadre approprié pour le couplage de différentes discrétisations dans les sous-domaines. De nombreuses applications, basées sur la méthode de joints, ont vu le jour pour des problèmes d'ordre deux et notamment, l'extension de celle-ci aux problèmes tridimensionnels non conforme [13], le couplage de méthodes spectrales et des éléments finis [34]. On cite également les travaux de **Y. Achdou, Y. A. Kuznetsov et O. Pironneau** [3] et [4] pour les problèmes de la mécanique des fluides en dimension trois.

Dans ce travail, on se propose d'étendre la méthode de joints, à la résolution d'équations de Laplace et de Stokes tridimensionnels dans un domaine axisymétrique. En effet ces problèmes interviennent dans de nombreux systèmes de mécanique des milieux continus, aussi bien pour des solides que des fluides. Pour la résolution directe de ce genre de problèmes, les méthodes spectrales fournissent un cadre approprié, puisque les polynômes approchent bien les fonctions régulières (il est bien connu que l'erreur d'approximation décroît comme une puissance négative du degré maximal des polynômes). Dans le **premier chapitre**, on introduit les domaines d'étude qui sont principalement trois types de domaines présentant des singularités d'arêtes. On rappelle l'expression explicite des fonctions singulières associées à l'opérateur de Laplace, et le résultat d'approximation polynomiale de ces fonctions. Ces types de singularités sont totalement connus dans les cas bidimensionnel d'où l'intérêt de traiter les problèmes axisymétriques. On montre aussi l'utilité de ce résultat pour doubler l'ordre de l'estimation d'erreur en norme H^1 entre la solution du problème continu et la solution discrète du problème de collocation sur $[-1, 1]$.

Dans le **deuxième chapitre**, on introduit la discrétisation spectrale qu'on adopte dans les éléments et on présente les outils nécessaires à la méthode de joints, à savoir les opérateurs d'interpolation polynomiale et les opérateurs de projection. Ensuite on traite le problème de Laplace dans le cas de conditions aux limites de type Dirichlet homogènes. La discrétisation du problème continu repose sur la formulation variationnelle et s'effectue par la méthode de Galerkin avec intégration numérique. L'espace d'approximation n'est pas contenu dans l'espace continu, il s'agit d'une non-conformité d'espace. On montre notamment que l'erreur ne dépend que de la régularité locale de la solution exacte dans les sous-domaines. Il faut noter que les estimations d'erreur qu'on obtient sont optimales.

Ensuite une partie est consacrée à l'analyse mathématique de l'algorithme de Strang et Fix. Deux algorithmes pour le calcul de coefficients de singularité, celui **Amara et Moussaoui** [6] et celui de **Strang et Fix** [40], ont été étendus au cadre de la méthode de

jointes pour le bilaplacien [11] et le Laplacien et Stokes [31] dans le cas bidimensionnel. Dans l'étude théorique de notre problème, on traite séparément les cas axisymétrique, général et tridimensionnel.

A la fin du chapitre 1, on présente la mise en œuvre de la méthode de joints et les matrices associées au problème. Le code de calcul est développé en langage MATLAB. Des résultats numériques prouvant l'efficacité de la méthode des joints sont présentés et commentés.

Par analogie au deuxième chapitre, **le chapitre 3** est consacré à l'étude mathématique et numérique du problème de Stokes par la méthode spectrale des éléments avec joints, pour une décomposition géométrique non conforme dans des domaines axisymétriques, et à l'étude de l'algorithme de Strang et Fix. On prouve deux conditions inf-sup sur les deux formes bilinéaires discrètes qui interviennent dans les problèmes discrets dans les deux cas axisymétrique et général. On présente aussi les estimations pour les solutions u et p . On utilise ensuite une autre fois l'algorithme de Strang et Fix pour agrandir seulement l'espace discret de la vitesse. Nous prouvons deux conditions inf-sup sur les deux formes bilinéaires discrètes qui définissent les problèmes discrets dans les deux cas axisymétrique et dans le cas général. Il est à signaler que dans le cas non homogène on perd du côté de la singularité et on a un terme $N^{\frac{1}{2}} \log(N)$ qui intervient dans toutes les inégalités du côté de la singularité, mais ceci n'empêche pas la convergence de la méthode. Les estimations d'erreur sur u et p sont aussi bonnes que dans le cas conforme avec continuité d'interface et de même ordre, il n'y a pas de perte d'optimalité dans les estimations de l'erreur réelle, ce qui prouve l'efficacité de la méthode des joints. Enfin on termine le chapitre 3 par une mise en œuvre de l'algorithme de Stokes où on présente les outils nécessaires (matrices A, B, F et G , et matrices de raccord...), suivi des tracés et des courbes d'erreur analysés et commentés.

Dans **le chapitre 4 et 5**, c'est - à - dire dans l'annexe 1 et 2, on explicite le choix des bases en fonction de la discrétisation choisie, les équations discrètes et le calcul des coefficients des matrices associées aux deux problèmes de Laplace et Stokes. Enfin on explicite les matrices qui assurent le raccord entre les interfaces.

Table des matières

1	Cadre général	10
1.1	Géométrie	11
1.2	Problèmes axisymétriques et réduction de la dimension	11
1.2.1	Problèmes invariants par rotation	13
1.2.2	Problèmes axisymétriques avec données axisymétriques	14
1.2.3	Problèmes axisymétriques avec données quelconques	15
1.3	Exemples	16
1.4	Espaces de Sobolev à poids	17
1.5	Fonctions axisymétriques	18
1.5.1	Cas covariant	18
1.5.2	Cas contravariant	18
1.6	Coefficients de Fourier	19
1.6.1	Cas covariant	19
1.6.2	Cas contravariant	20
1.6.3	Le problème de Laplace	21
1.6.4	Formulation variationnelle	21
1.6.5	Approximation par troncature	23
1.6.6	Régularité	24
1.6.7	Les singularités	24
2	Discrétisation du problème de Laplace par la méthode des joints	29
2.1	Introduction	30
2.2	Géométrie de la décomposition	30
2.2.1	Géométrie	30
2.2.2	Formules de quadrature	30
2.3	Le problème de Laplace : Cas axisymétrique	33
2.3.1	Problème continu	33
2.3.2	Problème discret	35
2.3.3	Estimations d'erreurs	41
2.3.4	Estimations d'erreur : (cas des fonctions singulières)	55
2.4	Le problème de Laplace : Cas général ($k \neq 0$)	61
2.4.1	Problème continu	61

2.4.2	Problème discret	63
2.4.3	Estimations d'erreur	64
2.4.4	Estimations d'erreur (Cas avec singularités)	71
2.5	Retour au problème tridimensionnel	74
2.5.1	Algorithme de Strang et Fix : cas axisymétrique	78
2.5.2	Estimation d'erreurs	82
2.5.3	Algorithme de Strang et Fix : cas général	84
2.5.4	Estimation d'erreurs	87
2.5.5	Retour au problème tridimensionnel : Algorithme de Strang et Fix	88
2.6	Mise en œuvre de l'Algorithme de résolution	91
2.6.1	Description du système linéaire	91
2.6.2	La matrice des joints	93
2.6.3	Mise en œuvre de l'Algorithme de Strang et Fix	93
2.7	Résultats numériques	94
2.7.1	Cas axisymétrique	94
2.7.2	Algorithme de Strang et Fix	103
2.7.3	Cas général	104
3	Discrétisation du problème de Stokes par la méthode des joints	114
3.1	Introduction	115
3.2	Cas axisymétrique	115
3.2.1	Problème continu	115
3.2.2	Problème discret	116
3.2.3	Estimation de l'erreur	120
3.2.4	Estimations d'erreur : cas avec singularités	134
3.3	Cas général	137
3.3.1	Problème continu	137
3.3.2	Problème discret	138
3.3.3	Estimation d'erreurs	141
3.4	Retour au problème tridimensionnel	147
3.4.1	Algorithme de Strang et Fix	152
3.4.2	Estimation de l'erreur	154
3.5	Ecriture matricielle du problème de Stokes	156
3.5.1	Dans un cylindre de référence	156
3.5.2	Dans un domaine décomposé	158
3.5.3	La matrice des joints	159
3.5.4	L'algorithme d'Uzawa	159
3.6	Résultats numériques	159
3.6.1	Cas axisymétrique	159
3.6.2	Cas général	171

4	Annexe 1 : Calcul des Polynômes	182
4.1	Polynômes orthogonaux dans $L^2(\Lambda)$	182
4.2	Formules de Gauss-Lobatto associées à L'_N	183
4.3	Polynômes orthogonaux dans $L^2_1(\Lambda)$	183
4.4	Formules de Gauss-Lobatto associées à M'_N	184
4.5	Polynômes de Lagrange	184
4.5.1	Explicitation de $l_j^{(2)}$	184
4.5.2	Explicitation de m_j	186
4.5.3	Ecriture des intégrales dans un rectangle $[a, b] \times [c, d]$	188
4.6	Mise en œuvre du Laplacien et du problème de Stokes	189
4.6.1	Calcul de la matrice A	189
4.6.2	Ecriture de a_N, a_N^k	190
4.6.3	Calcul de la matrice B	191
4.6.4	Calcul de p	193
5	Annexe 2 : Calcul de la matrice des joints	194
5.1	Cas de la figure 1	194
5.2	Cas de la figure 2	196
5.3	Cas de la figure 3	198
5.3.1	Polynôme $l_j^{2, N-2}$	200
5.3.2	Polynôme l_j^{N-2}	200

Table des figures

1.1	Exemple de géométrie 1	12
1.2	Exemple de géométrie 2	12
1.3	Domaines d'étude	25
1.4	Schéma explicatif	25
2.1	Les points a_j	40
2.2	Décomposition du domaine	47
2.3	Décomposition du domaine : cas conforme	51
2.4	Domaine Ω^a	94
2.5	Tracé de la fonction u avec et sans décomposition de domaine	95
2.6	Domaine Ω^a : isovaleurs de u pour $N = 24$	96
2.7	Domaine Ω^a : agrandissement de la partie de raccord	96
2.8	Domaine Ω^b	97
2.9	Domaine Ω^b : tracé de la fonction u	97
2.10	Isovaleurs de la courbe u	98
2.11	Domaine Ω^b : agrandissement de la partie de raccord	98
2.12	Domaine Ω^b : tracé de la fonction u	99
2.13	Isovaleurs de u avec ($N = 28$)	100
2.14	Domaine Ω^b : agrandissement de la partie de raccord	100
2.15	Domaine Ω^c	101
2.16	Tracé de la fonction u	101
2.17	Isovaleurs de u	102
2.18	Courbes d'erreur	103
2.19	Courbes d'erreur de u sans l'algorithme de Strang et Fix	104
2.20	Courbes d'erreur de u avec l'algorithme de Strang et Fix	104
2.21	Tracé de la fonction u^0	105
2.22	Tracé de la fonction $Re(u^1)$	106
2.23	Tracé de la fonction $Re(u^2)$	106
2.24	Tracé de la fonction u^0 avec et sans décomposition de domaine	107
2.25	Isovaleurs de u^0	107
2.26	Tracé de la fonction $Re(u^1)$	108
2.27	Isovaleurs de $Re(u^1)$	108

2.28	Tracé de la fonction u^2	109
2.29	Tracé de la fonction u^0	110
2.30	Isovaleurs de u^0	110
2.31	Tracé de la fonction $\text{Re}(u^1)$	111
2.32	Isovaleurs de $\text{Re}(u^1)$	111
2.33	Courbe d'erreur	113
3.1	Décomposition conforme	129
3.2	Tracé de la fonction u_r	160
3.3	Tracé de la fonction u_z	160
3.4	Tracé de la fonction p	161
3.5	Tracé de la fonction u_r	161
3.6	Tracé de la fonction u_z	162
3.7	Tracé de la fonction p	162
3.8	Tracé de la fonction u_r	163
3.9	Tracé de la fonction u_z	163
3.10	Tracé de la fonction p	164
3.11	Isovaleurs de u_r avec $N = 20$ sur chaque sous domaine	164
3.12	Isovaleurs de u_z avec $N = 20$ sur chaque sous domaine	165
3.13	Isovaleurs de p avec $N = 20$ sur Ω_1^a, Ω_3^a et $N = 22$ sur Ω_2^a	165
3.14	Les courbes d'erreur sur u et p	166
3.15	Tracé de la fonction u_r , avec $N = 30$ sur chaque sous domaine	167
3.16	Tracé de la fonction u_z	167
3.17	Tracé de la fonction p	168
3.18	Isovaleurs de u_r	168
3.19	Isovaleurs de u_z	169
3.20	Isovaleurs de p	169
3.21	Mesures d'erreur sur u et p	170
3.22	Tracé de la fonction u_r^0	171
3.23	Tracé de la fonction u_θ^0	172
3.24	Tracé de la fonction u_z^0	172
3.25	Tracé de la fonction p^0	173
3.26	Tracé de la fonction u_r^1	173
3.27	Tracé de la fonction u_θ^1	174
3.28	Tracé de la fonction u_z^1	174
3.29	Isovaleurs de u^0 (avec $N = 24$ sur Ω_1^a, Ω_2^a , et $N = 28$ sur Ω_3^a et $K = 8$)	175
3.30	Isovaleurs de u_z^0 avec $N = 30, K = 8$	175
3.31	Isoaleur de p^0 avec $N = 30, K = 8$	176
3.32	Isovaleurs de p^1 avec $N = 30, K = 8$	176
3.33	Mesures de l'erreur sur u et p	177
3.34	Tracé de la fonction u_r^1	178
3.35	Tracé de la partie Imaginaire de u_θ^1	178
3.36	Tracé de la fonction p^1	179
3.37	Tracé de la fonction u_r^3	179
3.38	Isovaleurs de u_r^0	180

3.39 Isovaleurs de p^2 et $u_{\hat{\theta}}^2$	180
3.40 Courbes d'erreur de \mathbf{u} et p	180
5.1 1 ^{er} cas du joint	195
5.2 2 ^{ème} cas du joint	196
5.3 3 ^{ème} cas du joint	198

Chapitre

1

Cadre général

Sommaire

1.1	Géométrie	11
1.2	Problèmes axisymétriques et réduction de la dimension	11
1.2.1	Problèmes invariants par rotation	13
1.2.2	Problèmes axisymétriques avec données axisymétriques	14
1.2.3	Problèmes axisymétriques avec données quelconques	15
1.3	Exemples	16
1.4	Espaces de Sobolev à poids	17
1.5	Fonctions axisymétriques	18
1.5.1	Cas covariant	18
1.5.2	Cas contravariant	18
1.6	Coefficients de Fourier	19
1.6.1	Cas covariant	19
1.6.2	Cas contravariant	20
1.6.3	Le problème de Laplace	21
1.6.4	Formulation variationnelle	21
1.6.5	Approximation par troncature	23
1.6.6	Régularité	24
1.6.7	Les singularités	24

Le but de ce chapitre est d'introduire le cadre général de la théorie spectrale de Fourier pour les problèmes axisymétriques dans lequel s'insèrent le problème de Laplace et le problème de Stokes. Nous décrivons la géométrie et les espaces fonctionnels pour un problème elliptique et nous écrivons les formulations variationnelles associées dans un premier lieu à des données axisymétriques, ensuite à des données générales. Nous donnons quelques résultats de régularité des solutions.

Les résultats de ce chapitre figurent dans [8, *Chapitres I et II*], nous y référons pour les démonstrations.

1.1 Géométrie

Pour un point de \mathbb{R}^3 , on utilise les coordonnées cartésiennes (x, y, z) ou cylindriques (r, θ, z) avec

$$x = r \cos \theta, y = r \sin \theta, r \in \mathbb{R}_+, \theta \in]-\pi, \pi[,$$

et

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta = \begin{cases} -\text{Arc} \cos \frac{x}{r} & \text{si } y \leq 0, \\ \text{Arc} \cos \frac{x}{r} & \text{si } y \geq 0. \end{cases}$$

On note \mathbb{R}_+^2 le demi-espace de \mathbb{R}^2 défini par :

$$\mathbb{R}_+^2 = \{(r, z) \in \mathbb{R}^2, r \geq 0\}.$$

Soit Ω un polygone de \mathbb{R}_+^2 , de frontière $\partial\Omega = \bigcup_{i=1}^n \Gamma_i$ formée d'un nombre fini de segments Γ_i , $1 \leq i \leq n$, dits côtés de Ω . Les extrémités de ces côtés sont dits coins de Ω . On appelle c_1, c_2, \dots, c_l les coins du polygone qui sont sur l'axe $r = 0$, et e_1, e_2, \dots, e_j les autres coins de Ω . On note Γ_0 l'intersection de $\partial\Omega$ avec l'axe $r = 0$ et $\Gamma = \partial\Omega \setminus \Gamma_0$. On note $\check{\Omega}$ le domaine de \mathbb{R}^3 obtenu par rotation de Ω autour de l'axe $r = 0$. L'ensemble $\check{\Omega}$ sera appelé domaine méridien de $\check{\Omega}$ et on a

$$\check{\Omega} = \{(r, \theta, z) \in \mathbb{R}^3, (r, z) \in \Omega \cup \Gamma_0, -\pi \leq \theta \leq \pi\}. \quad (1.1.1)$$

Dans la suite, on va travailler dans des domaines présentant des obstacles, comme illustré dans les figures 1.1 et 1.2.

1.2 Problèmes axisymétriques et réduction de la dimension

On considère le problème elliptique $[\check{A}, \check{B}]$ défini dans $\check{\Omega}$ par :

$$[\check{A}, \check{B}] \begin{cases} \check{A}\check{v} = \check{f} & \text{dans } \check{\Omega}, \\ \check{B}\check{v} = \check{g} & \text{sur } \partial\check{\Omega} \end{cases} \quad (1.2.1)$$

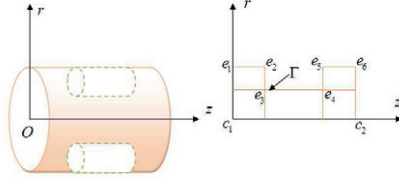


FIGURE 1.1 – Exemple de géométrie 1

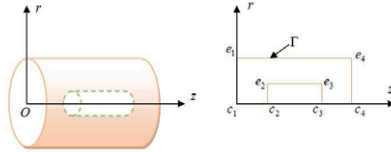


FIGURE 1.2 – Exemple de géométrie 2

où \check{A} et \check{B} sont respectivement des $M \times M$ et $m \times M$ opérateurs différentiels, \check{v} est une inconnue à M composantes et \check{f} et \check{g} sont des données correspondant aux forces extérieures. On renvoie à [5] pour les définitions générales et les propriétés des opérateurs elliptiques.

On note R_η la rotation de \mathbb{R}^3 d'angle η autour de l'axe $r = 0$, elle est définie par :

$$R_\eta(x, y, z) = (x \cos \eta - y \sin \eta, x \sin \eta + y \cos \eta, z) \quad (1.2.2)$$

Il est évident que $\check{\Omega}$ est invariant par la rotation R_η , que le vecteur normal \check{n} au bord $\partial\check{\Omega}$ est obtenu par rotation du vecteur n normal à Γ autour du même axe et que pour tout $\check{v} \in D'(\check{\Omega})$, on a la formule :

$$\langle \check{v} \circ R_\eta, \check{w} \rangle = \langle \check{v}, \check{w} \circ R_\eta^{-1} \rangle \quad \forall \check{w} \in D(\check{\Omega}). \quad (1.2.3)$$

Ci-dessus, $D(\check{\Omega})$ dénote l'espace des fonctions indéfiniment différentiables à support compact dans $\check{\Omega}$ et $D'(\check{\Omega})$ l'espace des distributions associé.

Définition 1.2.1 Le problème $[\check{A}, \check{B}]$ est dit axisymétrique si, pour tout η dans $[-\pi, \pi]$ il existe un automorphisme I_η de \mathbb{R}^M et un automorphisme J_η de \mathbb{R}^m tels que toute fonction

régulière $\check{\mathfrak{v}} : \check{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}^M$ satisfasse :

$$\begin{cases} \check{\mathbf{A}}(I_\eta(\check{\mathfrak{v}} \circ R_\eta)) = I_\eta \left((\check{\mathbf{A}}\check{\mathfrak{v}}) \circ R_\eta \right), \\ \check{\mathbf{B}}(J_\eta(\check{\mathfrak{v}} \circ R_\eta)) = J_\eta \left((\check{\mathbf{B}}\check{\mathfrak{v}}) \circ R_\eta \right). \end{cases} \quad (1.2.4)$$

Remarque 1.2.1 Dans le cas où $M = 1$, I_η est la fonction multiplication par une constante. La propriété (1.2.4) devient alors $\check{\mathbf{A}}(\check{\mathfrak{v}} \circ R_\eta) = (\check{\mathbf{A}}\check{\mathfrak{v}}) \circ R_\eta$.

1.2.1 Problèmes invariants par rotation

Définition 1.2.2 Le problème $[\check{\mathbf{A}}, \check{\mathbf{B}}]$ est dit invariant par rotation si, pour toute fonction régulière $\check{\mathfrak{v}} : \check{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}^M$ et pour tout $\eta \in [-\pi, \pi]$ on a :

$$\begin{cases} \check{\mathbf{A}}((\check{\mathfrak{v}} \circ R_\eta)) = (\check{\mathbf{A}}\check{\mathfrak{v}}) \circ R_\eta, \\ \check{\mathbf{B}}((\check{\mathfrak{v}} \circ R_\eta)) = (\check{\mathbf{B}}\check{\mathfrak{v}}) \circ R_\eta. \end{cases} \quad (1.2.5)$$

Une propriété équivalente à la définition 1.2.2 est la suivante.

Propriété Le problème $[\check{\mathbf{A}}, \check{\mathbf{B}}]$ est invariant par rotation si et seulement les opérateurs $\check{\mathbf{A}}$ et $\check{\mathbf{B}}$ écrits en coordonnées cylindriques ont des coefficients indépendants de θ , c'est à dire qu'il peuvent être écrits sous la forme :

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{A}}(x, y, z; \partial_x, \partial_y, \partial_z) &= \check{\mathbf{A}}(r, z; \partial_r, \partial_\theta, \partial_z) \\ \check{\mathbf{B}}(x, y, z; \partial_x, \partial_y, \partial_z) &= \check{\mathbf{B}}(r, z; \partial_r, \partial_\theta, \partial_z) \end{aligned} \quad (1.2.6)$$

Exemple 1.2.1 Le laplacien $\Delta = \partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2$ s'écrit en coordonnées cylindriques $\partial_r^2 + \frac{1}{r}\partial_r + \frac{1}{r^2}\partial_\theta^2 + \partial_z^2$. Associé à des conditions de Dirichlet sur le bord, le laplacien est donc invariant par rotation.

Définition 1.2.3 Soit $\check{\mathfrak{v}} \in D'(\check{\Omega})$, $\check{\mathfrak{v}}$ est dit invariant par rotation si :

$$\forall \eta \in [-\pi, \pi], \check{\mathfrak{v}} \circ R_\eta = \check{\mathfrak{v}}. \quad (1.2.7)$$

Maintenant, si toutes les données du problème (1.2.1), à savoir $\check{\mathbf{A}}, \check{\mathbf{B}}, \check{\mathbf{f}}$ et $\check{\mathbf{g}}$, sont invariants par rotation, alors celui ci se réduit au problème bi-dimensionnel suivant :

$$\begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{v} = \mathbf{f} & \text{dans } \Omega, \\ \mathbf{B}\mathbf{v} = \mathbf{g} & \text{sur } \Gamma, \end{cases} \quad (1.2.8)$$

où

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(r, z) &= \check{\mathbf{f}}(x, y, z), \quad \mathbf{g}(r, z) = \check{\mathbf{g}}(x, y, z), \\ \mathbf{A}(r, z; \partial_r, \partial_z) &= \check{\mathbf{A}}(r, z; \partial_r, 0, \partial_z), \\ \mathbf{B}(r, z; \partial_r, \partial_z) &= \check{\mathbf{B}}(r, z; \partial_r, 0, \partial_z). \end{aligned} \quad (1.2.9)$$

On voudrait généraliser cette réduction aux problèmes axisymétriques.

1.2.2 Problèmes axisymétriques avec données axisymétriques

Définition 1.2.4 Soit $\check{v} \in D'(\check{\Omega})$ et \check{g} une fonction définie sur $\partial\check{\Omega}$. La distribution \check{v} , resp. la fonction \check{g} , est dite axisymétrique si, pour tout η dans $[-\pi, \pi]$ il existe un automorphisme I_η de \mathbb{R}^M , resp. un automorphisme J_η de \mathbb{R}^m , tel que :

$$I_\eta(\check{v} \circ R_\eta) = \check{v}, \quad (1.2.10)$$

$$J_\eta(\check{g} \circ R_\eta) = \check{g}. \quad (1.2.11)$$

Remarque 1.2.2 Si le problème $[\check{A}, \check{B}]$ est axisymétrique dans le sens de la définition 1.2.1, alors $\check{A}\check{v}$ est axisymétrique dans le sens (1.2.10) et $\check{B}\check{v}$ est axisymétrique dans le sens (1.2.11).

Dans le but de réduire la dimension d'un problème axisymétrique, nous allons faire l'hypothèse suivante.

Condition 1.2.1 On suppose que les opérateurs $\eta \mapsto I_\eta$, $\eta \mapsto J_\eta$ sont des morphismes de groupes, c'est-à-dire :

$$\forall \eta \in [-\pi, \pi], \forall \xi \in [-\pi, \pi] \quad I_{\eta+\xi} = I_\eta \circ I_\xi \quad \text{et} \quad J_{\eta+\xi} = J_\eta \circ J_\xi. \quad (1.2.12)$$

Moyennant cette hypothèse, on peut montrer facilement que si le problème $[\check{A}, \check{B}]$ et les fonctions \check{v} , \check{f} et \check{g} sont axisymétriques, alors les applications suivantes sont invariantes par rotation :

$$(r, \theta, z) \longrightarrow I_\theta \check{v}(r, \theta, z), \quad (r, \theta, z) \longrightarrow I_\theta \check{f}(r, \theta, z), \quad (r, \theta, z) \longrightarrow I_\theta \check{g}(r, \theta, z)$$

et on a la proposition suivante.

Proposition 1.2.1 Si le problème $[\check{A}, \check{B}]$ est axisymétrique, alors le problème associé $[\check{A}^*, \check{B}^*]$ est invariant par rotation, où $[\check{A}^*, \check{B}^*]$ est défini par :

$$\begin{aligned} (\check{A}^* \check{v})(r, \theta, z) &= I_\theta (\check{A}(I_{-\theta} \check{v}))(r, \theta, z), \\ (\check{B}^* \check{v})(r, \theta, z) &= J_\theta (\check{B}(I_{-\theta} \check{v}))(r, \theta, z). \end{aligned} \quad (1.2.13)$$

On déduit de cette proposition que les opérateurs \check{A}^* et \check{B}^* s'écrivent sous la forme :

$$\begin{aligned} \check{A}^*(x, y, z; \partial_x, \partial_y, \partial_z) &= \tilde{A}(r, z; \partial_r, \partial_\theta, \partial_z), \\ \check{B}^*(x, y, z; \partial_x, \partial_y, \partial_z) &= \tilde{B}(r, z; \partial_r, \partial_\theta, \partial_z) \end{aligned} \quad (1.2.14)$$

et on pose $A(r, z; \partial_r, \partial_z) = \tilde{A}(r, z; \partial_r, 0, \partial_z)$ et $B(r, z; \partial_r, \partial_z) = \tilde{B}(r, z; \partial_r, 0, \partial_z)$.

Proposition 1.2.2 *On suppose que le problème $[\check{A}, \check{B}]$ est axisymétrique et que (\check{A}, \check{B}) est défini sur un espace \check{V} à valeurs dans un espace produit $\check{F} \times \check{G}$. On définit \check{V}_0 , \check{F}_0 et \check{G}_0 comme sous-espaces respectifs de \check{V} , \check{F} et \check{G} des fonctions axisymétriques. Alors il existe des espaces de fonctions V , F et G , définies sur Ω , tels que les fonctions suivantes sont des isomorphismes :*

$$\begin{aligned} \Phi_V : \check{V}_0 &\longrightarrow V & \Phi_F : \check{F}_0 &\longrightarrow F & \Phi_G : \check{G}_0 &\longrightarrow G \\ \Phi_V \check{v}(r, z) &= (I_\theta \check{v})(r, \theta, z), & \Phi_F \check{f}(r, z) &= (I_\theta \check{f})(r, \theta, z), & \Phi_G \check{g}(r, z) &= (J_\theta \check{g})(r, \theta, z). \end{aligned}$$

Par construction, les problèmes $[\check{A}, \check{B}]$ et $[A, B]$ sont équivalents et la réduction est décrite par le diagramme suivant :

$$\begin{array}{ccc} \check{V}_0 & \xrightarrow{(\check{A}, \check{B})} & \check{F}_0 \times \check{G}_0 \\ \Phi_V \downarrow & & \downarrow \Phi_F \times \Phi_G \\ V & \xrightarrow{(A, B)} & F_0 \times G_0 \end{array}$$

Finalement, si $[\check{A}, \check{B}]$ est axisymétrique et si les données \check{f} et \check{g} sont axisymétriques, alors on a l'équivalence entre i) et ii) :

- i) \check{v} est solution du problème $[\check{A}, \check{B}]$ et est axisymétrique,
- ii) v est solution du problème $[A, B]$.

En plus, si $[\check{A}, \check{B}]$ est bien posé, toute solution \check{v} associée à des données axisymétriques est axisymétrique.

1.2.3 Problèmes axisymétriques avec données quelconques

On peut transformer les problèmes axisymétriques avec des données non nécessairement axisymétriques, en problèmes invariants par rotation. On commence par définir $\tilde{\Omega}$ comme un produit :

$$\tilde{\Omega} = \{(r, \theta, z); (r, z) \in \Omega, -\pi \leq \theta \leq \pi\}. \quad (1.2.15)$$

Proposition 1.2.3 *On suppose que le problème $[\check{A}, \check{B}]$ est axisymétrique et que (\check{A}, \check{B}) est défini sur un espace \check{V} à valeurs dans un espace produit $\check{F} \times \check{G}$. Alors il existe des espaces de fonctions \tilde{V} , \tilde{F} et \tilde{G} , définies sur $\tilde{\Omega}$, tels que les fonctions suivantes sont des isomorphismes :*

$$\begin{aligned} \Phi_V : \check{V} &\longrightarrow \tilde{V} & \Phi_F : \check{F} &\longrightarrow \tilde{F} & \Phi_G : \check{G} &\longrightarrow \tilde{G} \\ \Phi_V \check{v}(r, \theta, z) &= (I_\theta \check{v})(r, \theta, z) & \Phi_F \check{f}(r, \theta, z) &= (I_\theta \check{f})(r, \theta, z) & \Phi_G \check{g}(r, \theta, z) &= (J_\theta \check{g})(r, \theta, z) \end{aligned}$$

En plus, les opérateurs $\tilde{A}(r, z; \partial_r, \partial_\theta, \partial_z)$ et $\tilde{B}(r, z; \partial_r, \partial_\theta, \partial_z)$ donnés par (1.2.14) sont tels que les problèmes $[\check{A}, \check{B}]$ et $[\tilde{A}, \tilde{B}]$ sont équivalents et la réduction est décrite par le diagramme suivant :

$$\begin{array}{ccc} \check{V} & \xrightarrow{(\check{A}, \check{B})} & \check{F} \times \check{G} \\ \Phi_V \downarrow & & \downarrow \Phi_F \times \Phi_G \\ V & \xrightarrow{(A, B)} & F \times G \end{array}$$

Un moyen naturel de réduire un problème axisymétrique défini sur $\tilde{\Omega}$ en une suite de problèmes posés sur Ω est d'utiliser le développement de Fourier par rapport à la variable angulaire θ . Ce cadre est d'autant plus intéressant que le problème réduit ne dépend pas de θ et donc le problème initial induit une suite de problèmes complètement découplés.

Soit \tilde{v} une fonction définie sur Ω et soit $\tilde{v} = I_\theta \tilde{v}$ la fonction correspondante définie dans $\tilde{\Omega}$. Pour chaque $k \in \mathbb{Z}$ on associe le coefficient de Fourier

$$v^k(r, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} \tilde{v}(r, \theta, z) e^{-ik\theta} d\theta. \quad (1.2.16)$$

Alors le problème $[\tilde{A}, \tilde{B}]$ est équivalent à la famille dénombrable des problèmes réduits suivants :

$$\forall k \in \mathbb{Z} \begin{cases} A_k v^k = f^k & \text{dans } \Omega, \\ B_k v^k = g^k & \text{sur } \partial\Omega, \end{cases} \quad (1.2.17)$$

où les opérateurs A_k et B_k sont définis par :

$$\begin{aligned} A_k(r, z; \partial_r, \partial_z) &= \tilde{A}(r, z; \partial_r, ik, \partial_z), \\ B_k(r, z; \partial_r, \partial_z) &= \tilde{B}(r, z; \partial_r, ik, \partial_z). \end{aligned} \quad (1.2.18)$$

Remarque 1.2.3 Si les fonctions \tilde{v} , \tilde{f} et \tilde{g} sont axisymétriques, tous leurs coefficients de Fourier sont nuls, sauf v^0 , f^0 et g^0 respectivement et le problème $[A_0, B_0]$ coïncide avec le problème $[A, B]$.

1.3 Exemples

Afin d'appliquer ce qui précède à des problèmes physiques réels tels que le problème de Laplace ou celui de Stokes, on commence par écrire les différents opérateurs qui interviennent en coordonnées cylindriques, dans les deux cas scalaire et vectoriel.

Soit $(\tau_r, \tau_\theta, \tau_z)$ une base cylindrique orthonormée associée à la base (τ_x, τ_y, τ_z) cartésienne. On a les formules de bases :

$$\partial_x = \cos \theta \partial_r - \frac{1}{r} \sin \theta \partial_\theta \quad \text{et} \quad \partial_y = \sin \theta \partial_r + \frac{1}{r} \cos \theta \partial_\theta. \quad (1.3.1)$$

On en déduit les formules suivantes.

1) Cas scalaire :

	Coordonnées cartésiennes	Coordonnées cylindriques
$\nabla \tilde{v}$	$\partial_x \tilde{v} \tau_x + \partial_y \tilde{v} \tau_y + \partial_z \tilde{v} \tau_z$	$\partial_r v \tau_r + \frac{1}{r} \partial_\theta v \tau_\theta + \partial_z v \tau_z$
$\Delta \tilde{v}$	$\partial_x^2 \tilde{v} + \partial_y^2 \tilde{v} + \partial_z^2 \tilde{v}$	$\partial_r^2 v + \frac{1}{r} \partial_r v + \frac{1}{r^2} \partial_\theta^2 v + \partial_z^2 v$

2) Cas vectoriel :

Pour le cas vectoriel, on rappelle qu'un vecteur \tilde{v} à valeurs dans \mathbb{R}^3 s'écrit en coordonnées cartésiennes $v_x \tau_x + v_y \tau_y + v_z \tau_z$ et en coordonnées cylindriques $v_r \tau_r + v_\theta \tau_\theta + v_z \tau_z$ ce qui implique que

$$v_r = v_x \cos \theta + v_y \sin \theta \quad \text{et} \quad v_\theta = -v_x \sin \theta + v_y \cos \theta, \quad (1.3.2)$$

et on a

	Coordonnées cartésiennes	Coordonnées cylindriques
$div \vec{v}$	$\partial_x v_x + \partial_y v_y + \partial_z v_z$	$\partial_r v_r + \frac{1}{r} v_r + \frac{1}{r} \partial_\theta v_\theta + \partial_z v_z$
$\Delta \vec{v}$	$(\partial_x^2 v_x + \partial_y^2 v_x + \partial_z^2 v_x) \tau_x +$ $(\partial_x^2 v_y + \partial_y^2 v_y + \partial_z^2 v_y) \tau_y +$ $(\partial_x^2 v_z + \partial_y^2 v_z + \partial_z^2 v_z) \tau_z$	$(\partial_r^2 v_r + \frac{1}{r} \partial_r v_r + \frac{1}{r} \partial_\theta^2 v_r + \partial_z^2 v_r$ $- \frac{1}{r^2} v_r - \frac{2}{r^2} \partial_\theta v_\theta) \tau_r$ $+ (\partial_r^2 v_\theta + \frac{1}{r} \partial_r v_\theta + \frac{1}{r} \partial_\theta^2 v_\theta + \partial_z^2 v_\theta$ $- \frac{1}{r^2} v_\theta + \frac{2}{r^2} \partial_\theta v_r) \tau_\theta$ $+ (\partial_r^2 v_z + \frac{1}{r} \partial_r v_z + \frac{1}{r} \partial_\theta^2 v_z + \partial_z^2 v_z) \tau_z$

1.4 Espaces de Sobolev à poids

Par le changement de variables des coordonnées cartésiennes en coordonnées cylindriques, la mesure $dx dy dz$ se transforme en $r dr d\theta dz$. En écrivant le problème de Laplace ou celui de Stokes sous forme variationnelle réduite définie sur Ω , il apparaît des mesures comme $r dr dz$ ou $r^{-1} dr dz$. Ce changement de mesure donne lieu à de nouveaux espaces de Sobolev à poids.

Définition 1.4.1 1) On définit l'espace

$$L_{\pm 1}^2(\Omega) = \{u : \Omega \rightarrow \mathbb{C} \text{ mesurable}, (\int_{\Omega} |u|^2(r, z) |r^{\pm 1} dr dz)^{\frac{1}{2}} < +\infty\} \quad (1.4.1)$$

qui est un espace de Hilbert quand il est muni de la norme suivante

$$\|u\|_{L_{\pm 1}^2(\Omega)} = (\int_{\Omega} |u|^2(r, z) r^{\pm 1} dr dz)^{\frac{1}{2}}.$$

2) Pour $m \in \mathbb{N}^*$, on définit l'espace

$$H_1^m(\Omega) = \{u : \Omega \rightarrow \mathbb{C} \text{ mesurable}, (\sum_{k=0}^m \sum_{\ell=0}^k \|\partial_r^\ell \partial_z^{k-\ell} u\|_{L_1^2(\Omega)}^2)^{\frac{1}{2}} < +\infty\} \quad (1.4.2)$$

qui est un espace de Hilbert quand il est muni de la norme suivante

$$\|u\|_{H_1^m(\Omega)} = (\sum_{k=0}^m \sum_{\ell=0}^k \|\partial_r^\ell \partial_z^{k-\ell} u\|_{L_1^2(\Omega)}^2)^{\frac{1}{2}};$$

il est aussi muni de la semi norme

$$|u|_{H_1^m(\Omega)} = (\sum_{\ell=0}^m \|\partial_r^\ell \partial_z^{m-\ell} u\|_{L_1^2(\Omega)}^2)^{\frac{1}{2}}.$$

3) Pour s réel positif non entier, on définit l'espace $H_1^s(\Omega)$ par interpolation entre l'espace $H_1^{[s]+1}(\Omega)$ et $H_1^{[s]}(\Omega)$, où $[s]$ désigne la partie entière de s .

4) On définit l'espace de Hilbert $V_1^1(\Omega)$, muni de la norme $(\| \cdot \|_{H_1^1(\Omega)}^2 + \| \cdot \|_{L_{-1}^2(\Omega)}^2)^{\frac{1}{2}}$ par :

$$V_1^1(\Omega) = H_1^1(\Omega) \cap L_{-1}^2(\Omega). \quad (1.4.3)$$

1.5 Fonctions axisymétriques

On étudie séparément les cas covariant et contravariant, qui correspondent respectivement aux fonctions invariantes par rotation et axisymétriques avec $I_\eta = R_{-\eta}$.

1.5.1 Cas covariant

On considère les fonctions de $H^s(\check{\Omega})$ qui sont invariantes par rotation dans le sens (1.2.7). On note l'espace correspondant $\check{H}^s(\check{\Omega})$. Soit $\check{v} \in \check{H}^s(\check{\Omega})$, \check{v} est caractérisé par l'existence d'une fonction v définie sur Ω par :

$$v(r, z) = \check{v}(x, y, z). \quad (1.5.1)$$

Théorème 1.5.1 Soit s un réel positif, alors l'application :

$$\begin{array}{ccc} \check{H}^s(\check{\Omega}) & \longrightarrow & H_+^s(\Omega) \\ \check{v} & \longmapsto & v \end{array}$$

est un isomorphisme, où $H_+^s(\Omega)$ est défini comme suit :

i) si s n'est pas un entier pair

$$H_+^s(\Omega) = \{w \in H_1^s(\Omega), \partial_r^{2j-1} w|_{\Gamma_0} = 0, \text{ et } 1 \leq j < s/2\}, \quad (1.5.2)$$

muni de la norme $\|\cdot\|_{H_+^s(\Omega)} = \|\cdot\|_{H_1^s(\Omega)}$,

ii) si s est un entier pair

$$H_+^s(\Omega) = \{w \in H_1^s(\Omega), \partial_r^{2j-1} w|_{\Gamma_0} = 0, 1 \leq j < s/2 \text{ et } \partial_r^{s-1} w \in L_{-1}^2(\Omega)\} \quad (1.5.3)$$

muni de la norme $\|w\|_{H_+^s(\Omega)} = \left(\|w\|_{H_1^s(\Omega)}^2 + \|\partial_r^{s-1} w\|_{L_{-1}^2(\Omega)}^2 \right)^{1/2}$.

1.5.2 Cas contravariant

Soit $\check{\check{H}}^s(\check{\check{\Omega}})$ l'espace des fonctions $\check{\check{v}} = (v_1, v_2, v_3) \in \check{\check{H}}^s(\check{\check{\Omega}})$ qui vérifient (1.2.10) avec $I_\eta = R_{-\eta}$. On considère la fonction invariante par rotation $\check{\check{v}} = (v_r, v_\theta, v_z) = I_\theta \check{\check{v}}$, alors on a :

$$\begin{aligned} v_r &= \cos \theta v_x + \sin \theta v_y \\ v_\theta &= -\sin \theta v_x + \cos \theta v_y \\ v_z &= v_z. \end{aligned} \quad (1.5.4)$$

En conséquence de la Proposition 1.2.1 on a :

$$\begin{aligned} \forall \eta &\in [-\pi, \pi], R_{-\eta}(\check{\check{v}} \circ R_\eta) = \check{\check{v}} \\ \iff v_r, v_\theta, v_z &\text{ sont invariants par rotations.} \end{aligned}$$

Théorème 1.5.2 Soit s un réel positif alors l'application :

$$\begin{aligned} \check{H}^s(\check{\Omega}) &\longrightarrow H_-^s(\Omega) \times H_-^s(\Omega) \times H_+^s(\Omega) \\ \check{v} &\longmapsto \check{v}(v_r, v_\theta, v_z) \end{aligned}$$

est bien définie et injective où $H_-^s(\Omega)$ est défini comme suit :

i) si s n'est pas un entier impair

$$H_-^s(\Omega) = \left\{ w \in H_1^s(\Omega), \partial_r^{2j} w|_{\Gamma_0} = 0, \text{ et } 1 \leq j < \frac{s-1}{2} \right\} \quad (1.5.5)$$

muni de la norme

$$\|w\|_{H_-^s(\Omega)} = \|w\|_{H_1^s(\Omega)},$$

ii) si s est un entier impair

$$H_-^s(\Omega) = \left\{ w \in H_1^s(\Omega), \partial_r^{2j} w|_{\Gamma_0} = 0, 1 \leq j < \frac{s-1}{2} \text{ et } \partial_r^{s-1} w \in L_{-1}^2(\Omega) \right\}, \quad (1.5.6)$$

muni de la norme

$$\|w\|_{H_-^s(\Omega)} = \left(\|w\|_{H_1^s(\Omega)}^2 + \|\partial_r^{s-1} w\|_{L_{-1}^2(\Omega)}^2 \right)^{1/2}.$$

1.6 Coefficients de Fourier

Le but ici est d'étendre les résultats de la section précédente aux espaces standards de Sobolev $H^s(\check{\Omega})$.

Définition 1.6.1 Soit $\check{v} \in H^s(\check{\Omega})$. On définit, comme dans (1.2.16), les coefficients de Fourier de \check{v} notés v^k par :

$$v^k(r, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} \check{v}(r, \theta, z) e^{-ik\theta} d\theta. \quad (1.6.1)$$

On définit aussi la troncature de la série de Fourier pour chaque entier positif K par :

$$\check{v}_K(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{|k| \leq K} v^k(r, z) e^{ik\theta} \quad (1.6.2)$$

On traite comme précédemment les deux cas covariant et contravariant.

1.6.1 Cas covariant

Théorème 1.6.1 1) Soit s un réel positif alors l'application suivante est un isomorphisme :

$$\begin{aligned} \check{H}^s(\check{\Omega}) &\longrightarrow \prod_{k \in \mathbb{Z}} H^s(k)(\Omega) \\ \check{v} &\longmapsto (v^k)_{k \in \mathbb{Z}} \end{aligned}$$

où

i) si $|k| > s - 1$, $H_{(k)}^s(\Omega) = V_1^s(\Omega)$ muni de la norme

$$\|w\|_{H_{(k)}^s(\Omega)} = \left(\|w\|_{H_+^s(\Omega)}^2 + |k|^{2s} \|r^{-s}w\|_{L^2_1(\Omega)}^2 \right)^{1/2}, \quad (1.6.3)$$

ii) si $|k| \leq s - 1$

$$H_{(k)}^s(\Omega) = \begin{cases} \{w \in H_+^s(\Omega), \partial_r^j w / \Gamma_0 = 0, 1 \leq j \leq |k| - 1\}, & \text{si } k \text{ est pair,} \\ \{w \in H_-^s(\Omega), \partial_r^j w / \Gamma_0 = 0, 1 \leq j \leq |k| - 1\}, & \text{si } k \text{ est impair,} \end{cases} \quad (1.6.4)$$

muni de la norme

$$\|w\|_{H_{(k)}^s(\Omega)} = \begin{cases} \|w\|_{H_+^s(\Omega)}, & \text{si } k \text{ est pair,} \\ \|w\|_{H_-^s(\Omega)}, & \text{si } k \text{ est impair} \end{cases}$$

On a en plus l'équivalence suivante des normes :

$$c \|\tilde{v}\|_{H^s(\tilde{\Omega})} \leq \left(\sum_{k \in \mathbb{Z}} \|v^k\|_{H_{(k)}^s(\Omega)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \leq c' \|\tilde{v}\|_{H^s(\tilde{\Omega})}. \quad (1.6.5)$$

2) Soit t un réel positif tel que $t \leq s$. Il existe une constante c telle que pour tout entier naturel K , on a :

$$\|\tilde{v} - \check{v}_K\|_{H^t(\tilde{\Omega})} \leq cK^{t-s} \|\tilde{v}\|_{H^s(\tilde{\Omega})}, \quad \forall \tilde{v} \in H^s(\tilde{\Omega}). \quad (1.6.6)$$

1.6.2 Cas contravariant

Théorème 1.6.2 Soit s un réel positif. On introduit l'espace $H_{(k)*}^s(\Omega)$ comme suit :

i) si $|k| > s$, $H_{(k)*}^s(\Omega) = V_1^s(\Omega)$,

ii) si $|k| \leq s$,

$$H_{(k)*}^s(\Omega) = \begin{cases} \{w \in H_-^s(\Omega), \partial_r^j w / \Gamma_0 = 0, 1 \leq j \leq |k| - 2\}, & \text{si } k \text{ est pair,} \\ \{w \in H_+^s(\Omega), \partial_r^j w / \Gamma_0 = 0, 1 \leq j \leq |k| - 2\}, & \text{si } k \text{ est impair.} \end{cases} \quad (1.6.7)$$

Alors l'application

$$\begin{aligned} H^s(\tilde{\Omega}) &\longrightarrow \prod_{k \in \mathbb{Z}} H_{(k)}^s(\Omega) \\ \tilde{v} &\longmapsto (v_r^k, v_\theta^k, v_z^k)_{k \in \mathbb{Z}} = (v^k)_{k \in \mathbb{Z}} \end{aligned}$$

est un isomorphisme, où $H_{(k)}^s(\Omega)$ est l'espace des $(w_r^k, w_\theta^k, w_z^k) \in H_{(k)*}^s(\Omega) \times H_{(k)*}^s(\Omega) \times H_{(k)}^s(\Omega)$ qui vérifient :

$$\begin{cases} \partial_r^{|k|-1}(w_r + \frac{ik}{|k|}w_\theta) \in L^2_1(\Omega) & \text{si } |k| = s, \\ \partial_r^{|k|-1}(w_r + \frac{ik}{|k|}w_\theta) / \Gamma_0 = 0 & \text{si } |k| < s, \end{cases}$$

avec

1) Si $|k| \neq s$

$$\|(w_r, w_\theta, w_z)\|_{\mathbf{H}_{(k)}^s(\Omega)} = \left(\|w_r\|_{H_{(k),*}^s(\Omega)}^2 + \|w_\theta\|_{H_{(k),*}^s(\Omega)}^2 + \|w_z\|_{H_{(k)}^s(\Omega)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

2) Si $|k| = s$

$$\begin{aligned} \|(w_r, w_\theta, w_z)\|_{\mathbf{H}_{(k)}^s(\Omega)} &= \left(\|w_r\|_{H_{(k),*}^s(\Omega)}^2 + \|w_\theta\|_{H_{(k),*}^s(\Omega)}^2 + \|w_z\|_{H_{(k)}^s(\Omega)}^2 \right. \\ &\quad \left. + \|\partial_r^{|k|-1}(w_r + \frac{ik}{|k|}w_\theta)\|_{L_{-1}^2(\Omega)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Et on a l'équivalence suivante :

$$c\|\check{v}\|_{\mathbf{H}^s(\check{\Omega})} \leq \left(\sum_{k \in \mathbb{Z}} \|v^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^s(\Omega)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \leq c'\|\check{v}\|_{\mathbf{H}^s(\check{\Omega})}. \quad (1.6.8)$$

1.6.3 Le problème de Laplace

On considère le problème de Laplace tridimensionnel dans $\check{\Omega}$

$$\begin{cases} -\Delta \check{u} = \check{f} & \text{dans } \check{\Omega}, \\ \check{u} = \check{g} & \text{sur } \partial\check{\Omega}. \end{cases} \quad (1.6.9)$$

Si \check{f} et \check{g} sont invariants par rotation autour de l'axe (Oz), alors le problème (1.6.9) se ramène au problème défini sur Ω par

$$\begin{cases} -\partial_r^2 u - \frac{1}{r}\partial_r u - \partial_z^2 u = f & \text{dans } \Omega, \\ u = g & \text{sur } \Gamma, \end{cases} \quad (1.6.10)$$

où u , f et g sont des fonctions de r et z , Ω et Γ sont définis dans la section 1.

Si \check{f} ou \check{g} ne sont pas invariants par rotation, alors le problème (1.6.9) se ramène à un nombre dénombrable de problèmes définis de la façon suivante :

$$\begin{cases} -\partial_r^2 u^k - \frac{1}{r}\partial_r u^k - \partial_z^2 u^k + \frac{k^2}{r^2}u^k = f^k & \text{dans } \Omega, \\ u^k = g^k & \text{sur } \Gamma, \end{cases} \quad (1.6.11)$$

où, pour k entier relatif, u^k , f^k et g^k sont les coefficients de Fourier respectivement de \check{u} , \check{f} et \check{g} , comme définis dans (1.6.1).

1.6.4 Formulation variationnelle

La formulation variationnelle du problème (1.6.9) s'écrit :

$$\begin{cases} \text{Trouver } \check{u} \text{ dans } H^1(\check{\Omega}) \\ \text{avec } \check{u} - \check{g} \text{ dans } H_0^1(\check{\Omega}), \text{ tel que} \\ \check{a}(\check{u}, \check{v}) = \langle \check{f}, \check{v} \rangle, \forall \check{v} \in H_0^1(\check{\Omega}), \end{cases} \quad (1.6.12)$$

où $\check{a}(\check{u}, \check{v}) = \int_{\check{\Omega}} \nabla \check{u} \cdot \nabla \check{v} \, d\check{\Omega}$, et $\langle \check{f}, \check{v} \rangle = \int_{\check{\Omega}} \check{f} \check{v} \, d\check{\Omega}$.

On note encore \check{y} un relèvement de la trace de \check{y} dans $H^1(\check{\Omega})$. Par application du lemme de Lax Milgram, pour \check{f} dans $H^{-1}(\check{\Omega})$ et \check{y} dans $H^1(\check{\Omega})$, la problème (1.6.12) a une solution unique dans $H^1(\check{\Omega})$.

Cas axisymétrique

On introduit l'espace

$$H_{1\circ}^1(\Omega) = \{v \in H_1^1(\Omega); v = 0 \text{ sur } \Gamma\}. \quad (1.6.13)$$

L'application \mathcal{I} définie sur $\check{H}_0^1(\check{\Omega})$ à valeurs dans $H_{1\circ}^1(\Omega)$ par

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(\check{v}) &= v, \\ v(r, z) &= \check{v}(x, y, z) \end{aligned} \quad (1.6.14)$$

est un isomorphisme appelé opérateur de réduction. On note $H_{1\circ}^1(\Omega)'$ l'espace dual de $H_{1\circ}^1(\Omega)$. On a pour $f \in H_{1\circ}^1(\Omega)'$, $\check{f} \in H^{-1}(\check{\Omega})$ et

$$\forall v \in H_{1\circ}^1(\Omega), \langle f, v \rangle = \langle \check{f}, \check{v} \rangle.$$

(On rappelle que $\langle f, v \rangle = \int_{\Omega} f v \, r \, dr \, dz$ si f et $g \in L_1^2(\Omega)$).

Soit g l'image de \check{y} par l'isomorphisme

$$\check{H}^1(\check{\Omega}) \longrightarrow H_1^1(\Omega)$$

avec $u - g$ appartenant à $H_{1\circ}^1(\Omega)$, voir [8, Chapitre II].

On définit la forme bilinéaire a associée à \check{a} par

$$a(u, v) = \check{a}(\check{u}, \check{v}) \quad \forall (u, v) \in H_1^1(\Omega)$$

et qui est donnée par

$$a(u, v) = \int_{\Omega} (\partial_r u \partial_r v + \partial_z u \partial_z v) \, r \, dr \, dz.$$

Le problème (1.6.10) s'écrit :

$$\begin{cases} \text{Trouver } u \text{ dans } H_1^1(\Omega), \\ \text{avec } u - g \text{ dans } H_{1\circ}^1(\Omega), \text{ tel que} \\ \forall v \in H_{1\circ}^1(\Omega), a(u, v) = \langle f, v \rangle. \end{cases} \quad (1.6.15)$$

Proposition 1.6.1 *La forme $a(\dots)$ est elliptique sur $H_{1\circ}^1(\Omega)$. Pour tout f dans $H_{1\circ}^1(\Omega)'$ et g dans $H_1^1(\Omega)$, le problème (1.6.15) a une unique solution. Elle coïncide avec l'image de \check{u} solution du problème (1.6.12) par \mathcal{I} définie dans (1.6.14), avec \check{f} dans $H^{-1}(\check{\Omega})$ et \check{y} dans $H^1(\check{\Omega})$. De plus si on suppose que $f \in L_1^2(\Omega)$, alors il existe $C > 0$ telle que*

$$\|u\|_{H_1^1(\Omega)} \leq C(\|f\|_{L_1^2(\Omega)} + \|g\|_{H_1^1(\Omega)}).$$

Cas général

Dans le cas général, on constate d'après le théorème 1.6.1 que si \check{v} est dans $H^1(\check{\Omega})$, alors son coefficient de Fourier v^0 d'ordre 0 est dans l'espace $H_1^1(\Omega)$ alors que pour $k \neq 0$, $v^k \in V_1^1(\Omega)$. Pour cela on a besoin d'introduire l'espace

$$V_{1\circ}^1(\Omega) = \{v \in V_1^1(\Omega); v = 0 \text{ sur } \Gamma\}. \quad (1.6.16)$$

On introduit maintenant la forme sesquilinéaire a_k définie sur $V_1^1(\Omega) \times V_1^1(\Omega)$ par :

$$a_k(u, v) = \int_{\Omega} (\partial_r u \partial_r \bar{v} + \partial_z u \partial_z \bar{v}) r dr dz + k^2 \int_{\Omega} u \bar{v} r^{-1} dr dz.$$

On a pour \check{u} et \check{v} dans $H^1(\check{\Omega})$:

$$\sum_k a_k(u^k, v^k) = \check{a}(\check{u}, \check{v}).$$

On considère pour $k \neq 0$ le problème variationnel :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trouver } u^k \text{ dans } V_1^1(\Omega), \\ \text{avec } u^k - g^k \text{ dans } V_{1\circ}^1(\Omega), \text{ tel que} \\ \forall v \in V_{1\circ}^1(\Omega), a_k(u^k, v) = \langle f^k, v \rangle. \end{array} \right. \quad (1.6.17)$$

Proposition 1.6.2 Soit k un entier non nul. Pour $f^k \in V_{1\circ}^1(\Omega)$ et $g^k \in V_1^1(\Omega)$, le problème (1.6.17) a une unique solution. Elle coïncide avec le $k^{\text{ème}}$ coefficient de Fourier u^k de \check{u} solution du problème (1.6.12) où f^k et g^k sont les $k^{\text{ème}}$ coefficients de Fourier de \check{f} et \check{g} . De plus il existe une constante $C > 0$ indépendante de k telle que

$$\|u^k\|_{H_{(k)}^1(\Omega)} \leq C(\|f^k\|_{L_1^2(\Omega)} + \|g^k\|_{H_{(k)}^1(\Omega)}).$$

On finit ce paragraphe par un résultat d'approximation par troncature de séries de Fourier. Pour cela, on introduit pour m et s des entiers relatifs, l'espace $H^{m,s}(\check{\Omega})$ par :

$$H^{m,s}(\check{\Omega}) = \{\check{v} \in H^m(\check{\Omega}); \partial_0^\ell \check{v} \in H^m(\check{\Omega}), 1 \leq \ell \leq s\}.$$

Si s n'est pas entier, on définit $H^{m,s}(\check{\Omega})$ par interpolation entre $H^{m,[s]}(\check{\Omega})$ et $H^{m,[s]+1}(\check{\Omega})$. On signale aussi que la norme induite par la définition de cet espace est équivalente à la norme $(\sum_{k \in \mathbb{Z}} (1 + |k|^2)^s \|v^k\|_{H_{(k)}^m(\Omega)}^2)^{1/2}$.

1.6.5 Approximation par troncature

Pour s réel strictement positif, on suppose que $(\check{f}, \check{g}) \in H^{-1,s}(\check{\Omega}) \times H^{1,s}(\check{\Omega})$ alors on a :

$$\|\check{u} - \check{u}_{[K]}\|_{H^1(\check{\Omega})} \leq CK^{-s}(\|\check{f}\|_{H^{-1,s}(\check{\Omega})} + \|\check{g}\|_{H^{1,s}(\check{\Omega})}),$$

où \check{u} est la solution du problème (1.6.9), et $\check{u}_{[K]}$ son approximation obtenue par troncature de la série de Fourier définie dans (1.6.2).

1.6.6 Régularité

Cas axisymétrique

Pour $(f, g) \in H_+^{s-1}(\Omega) \times H_+^{s+1}(\Omega)$, s réel positif, la solution u du problème (1.6.9) n'est pas en général dans $H_+^{s+1}(\Omega)$. Ceci est dû au domaine Ω qui n'est pas régulier aux points e_i et c_i , voir figure 1.1 et 1.2. Toutefois il y a des conditions sur s pour que la solution u soit dans $H_+^{s+1}(\Omega)$.

La première est que s soit inférieur au minimum des $\frac{\pi}{\omega_j}$, où ω_j est l'angle au point e_j . La seconde est que s soit inférieur au minimum des $\nu_i^{(0)} + \frac{1}{2}$, où $\nu_i^{(0)}$ est le plus petit réel strictement positif solution du problème $P_\nu^0(\cos \alpha_i) = 0$ où α_i est l'angle au point c_i et P_ν^0 est la fonction de Legendre ($\nu > 0$) [8, Prop. 18. 10] et [2, Chap 8].

Cas général

Dans le cas général la première condition aux points e_i reste la même. Pour la deuxième, on considère P_ν^k au lieu du polynôme P_ν^0 . P_ν^k est ici la fonction de Legendre de degré ν et d'ordre k et $\nu_i^{(k)}$ est le plus petit réel strictement positif solution du problème $P_\nu^k(\cos \alpha_i) = 0$.

On énonce maintenant un théorème qui va résumer les deux situations.

Théorème 1.6.3 Soit $s > 0$

- 1) Si $(f, g) \in H_+^{s-1}(\Omega) \times H_+^{s+1}(\Omega)$, $s < \frac{\pi}{\omega_j}$, $j = 1, \dots, J$, et $s < \nu_i^{(0)} + \frac{1}{2}$, $i = 1, \dots, I$, alors la solution u du problème (1.6.15) est dans $H_+^{s+1}(\Omega)$.
- 2) Si $(f^k, g^k) \in H_{(k)}^{s-1}(\Omega) \times H_{(k)}^{s+1}(\Omega)$, $s < \frac{\pi}{\omega_j}$, $j = 1, \dots, J$, et $s < \nu_i^{(k)} + \frac{1}{2}$, $i = 1, \dots, I$, alors la solution u^k du problème (1.6.17) est dans $H_{(k)}^{s+1}(\Omega)$.
- 3) Si $(\check{f}, \check{g}) \in H^{s-1}(\check{\Omega}) \times H^{s+1}(\check{\Omega})$, $s < \frac{\pi}{\omega_j}$, $j = 1, \dots, J$, et $s < \nu_i^{(k)} + \frac{1}{2}$, $k \in \mathbb{Z}$, $i = 1, \dots, I$, alors la solution \check{u} du problème (1.6.9) est dans $H^{s+1}(\check{\Omega})$ et elle vérifie :

$$\|\check{u}\|_{H^{s+1}(\check{\Omega})} \leq c(\|\check{f}\|_{H^{s-1}(\check{\Omega})} + \|\check{g}\|_{H^{s+1}(\check{\Omega})}).$$

1.6.7 Les singularités

On a vu dans le paragraphe précédent que les singularités du domaine ont une influence majeure sur la régularité de la solution u . Dans ce paragraphe on a choisi trois domaines d'études $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ (voir fig 1.3), qu'on va les adopter dans la partie numérique.

Dans ces cas de domaines, il n'y a pas de singularités de coins, (en effet en faisant tourner ces domaines autour de l'axe ($r = 0$), on ne voit que des arêtes). Pour cela on se limitera à l'étude des fonctions singulières aux voisinages des arêtes.

Fonctions singulières au voisinage des arêtes

Fixons e dans $\{e_1, e_2, \dots, e_6\}$ et \mathcal{V}_e un voisinage de e dans Ω . On peut déterminer les fonctions singulières $S_e^{(k)}$ du problème (1.6.11) pour chaque k dans \mathbb{Z} . L'avantage est

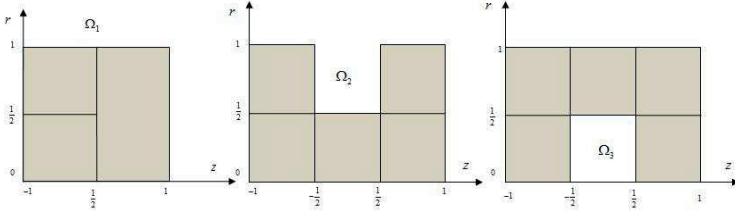


FIGURE 1.3 – Domaines d'étude

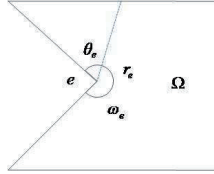


FIGURE 1.4 – Schéma explicatif

que le terme dominant de $S_e^{(k)\ell}$ ne dépend pas de k et coïncide avec la fonction singulière $S_c^{\Delta\ell}$ du problème de Laplace bidimensionnel, [8, Chapitre II]. On a

$$S_c^{\Delta\ell} = \begin{cases} r_e^{\frac{\ell\pi}{\omega_e}} \sin(\frac{\ell\pi}{\omega_e} \theta_e) & \text{si } \frac{\ell\pi}{\omega_e} \notin \mathbb{N}, \\ r_e^{\frac{\ell\pi}{\omega_e}} [\log r_e \sin(\frac{\ell\pi}{\omega_e} \theta_e) + \theta_e \cos(\frac{\ell\pi}{\omega_e} \theta_e)] & \text{si } \frac{\ell\pi}{\omega_e} \in \mathbb{N}, \end{cases} \quad (1.6.18)$$

(r_e, θ_e) étant les coordonnées polaires de e . On choisit les points (r_e, θ_e) dans le repère tel que le secteur de sommet e vérifiant $0 < \theta_e < \omega_e$. Voir la figure 1.4.

$$S_e^{(k)\ell} = S_c^{\Delta\ell} + r_e^{\frac{\ell\pi}{\omega_e}} \sum_{n \geq 0} \sum_{p \geq 1} \sum_{q \geq 0} k^n r_e^p \log^q r_e \varphi_{\ell n p q}^e(\theta_e), \quad (1.6.19)$$

où $\varphi_{\ell n p q}^e$ est une fonction régulière en θ_e .

On fait le changement de variables :

$$(r_e, \theta_e) \rightarrow (\bar{r}_e, \theta_e) = (|k|r_e, \theta_e) \quad \text{si } k \neq 0 \text{ et} \quad (1.6.20)$$

$$S_e^{(k)\ell}(r_e, \theta_e) = |k|^{-\frac{\ell\pi}{\omega_e}} \sum_{n \geq 0} S_e^{n\ell}(|k|r_e, \theta_e).$$

On peut alors énoncer le théorème suivant.

Théorème 1.6.4 Soit $e \in \{e_1, e_2, \dots, e_6\}$ et \mathcal{V}_e un voisinage de e dans Ω disjoint avec de certains voisinages \mathcal{V}_{e_j} de e_j , pour tout $e_j \in \{e_1, e_2, \dots, e_6\} \setminus \{e\}$. Soit χ_e une fonction de troncature de r_e à support dans \mathcal{V}_e et qui vaut 1 dans un voisinage de e . Soit s un réel strictement positif et soit (\check{f}, \check{g}) dans $H^{s-1}(\check{\Omega}) \times H^{s+1}(\check{\Omega})$. Si $s \neq \frac{\ell\pi}{\omega_e}$, $\ell = 1, 2, \dots$ alors pour tout k , u^k vérifie :

$$u^k = u_{reg}^k + \sum_{\ell} \gamma_e^{(k)\ell} \cdot \chi_e(|k|r_e) S_e^{(k)\ell} \text{ dans } \mathcal{V}_e \cap \Omega \text{ et } u_{reg}^k \in H_{(k)}^{s+1}(\mathcal{V}_e \cap \Omega) \quad (1.6.21)$$

où $S_e^{(k)\ell}$ est définie dans (1.6.20). Pour s vérifiant $0 < \frac{\ell\pi}{\omega_e} < s$ on a

$$\|u_{reg}^k\|_{H_{(k)}^{s+1}(\mathcal{V}_e \cap \Omega)} + (1 + |k|^{s - \frac{\ell\pi}{\omega_e}}) |\gamma_e^{(k)\ell}| \leq (\|f^k\|_{H^{s-1}(\check{\Omega})} + \|g^k\|_{H^{s+1}(\check{\Omega})}). \quad (1.6.22)$$

On déduit de (1.6.21) que

$$\check{u} = \check{u}_{reg} + \sum_{\ell} \check{u}_{sing \ell} \text{ avec } \check{u}_{reg} \in H^{s+1}(\check{\mathcal{V}}_e \cap \check{\Omega}) \quad (1.6.23)$$

\check{u}_{reg} et $\check{u}_{sing \ell}$ sont définis par :

$$\begin{aligned} \check{u}_{reg} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} u_{reg}^k(r, z) e^{ik\theta} \\ \check{u}_{sing \ell} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{\ell} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \gamma_e^{(k)\ell} \cdot \chi_e(|k|r_e) S_e^{(k)\ell}(r, z) e^{ik\theta}. \end{aligned} \quad (1.6.24)$$

Le principal terme de $\check{u}_{sing \ell}$ est $\gamma_e^{(\ell)}(\theta) S_e^{\Delta \ell}$, où

$$\gamma_e^{(\ell)}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \gamma_e^{(k)\ell} e^{ik\theta} \text{ et } \gamma_e^{(\ell)} \in H^{s - \frac{\ell\pi}{\omega_e}}(\mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z}).$$

Cas d'arête non convexe

On suppose que \check{f} soit dans $L^2(\check{\Omega})$ et \check{g} dans $H^2(\check{\Omega})$. Si $\omega_e > \pi$ alors

$$u^k = u_{reg}^k + \gamma_e^{(k)} \cdot \chi_e(|k|r_e) S_e \text{ et } u_{reg}^k \in H_{(k)}^2(\mathcal{V}_e \cap \Omega) \quad (1.6.25)$$

avec $S_e = r_e^{\frac{\pi}{\omega_e}} \sin(\frac{\pi\theta_e}{\omega_e})$ et on a

$$\check{u} = \check{u}_{reg} + (\gamma_e * \hat{\chi}_e) \text{ dans } \check{\mathcal{V}}_e$$

où

$$\gamma_e(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \gamma_e^{(k)} e^{ik\theta} \text{ et } \gamma_e * \hat{\chi}_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \gamma_e^{(k)} \cdot \chi_e(|k|r_e) e^{ik\theta}$$

et $\gamma_e \in H^{1 - \frac{\pi}{\omega_e}}(\mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z})$.

Estimations de bases

Les formules (1.6.19) et (1.6.20) du paragraphe précédent, nous mènent à définir les ensembles suivants.

i) pour $k = 0$, chaque fonction est la somme d'un nombre fini d'éléments de l'ensemble suivant

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_e^{(0)\lambda,q} &= \{S_e^{(0)}, S_e^{(0)} = \chi_e(r_e^\lambda) r_e^{-\lambda} \log(r_e)^q \varphi(\theta_e), \\ \varphi &\in C^\infty[0, \omega_e] \text{ et } \varphi(0) = \varphi(\omega_e) = 0\}, \end{aligned} \quad (1.6.26)$$

avec $\lambda = \frac{\ell\pi}{\omega_e} + p$ où p et $q \geq 0$.

ii) Pour $k \neq 0$, on note l'ensemble

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_e^{(k)\lambda,q} &= \{S_e^{(k)}, S_e^{(k)} = \chi_e(|k|r_e^\lambda) r_e^{-\lambda} \log(|k|r_e)^q \varphi(\theta_e), \\ \varphi &\in C^\infty[0, \omega_e] \text{ et } \varphi(0) = \varphi(\omega_e) = 0\}. \end{aligned} \quad (1.6.27)$$

avec $\lambda = \frac{\ell\pi}{\omega_e} + p$ où p et $q \geq 0$.

On définit les espaces $H_{\star+}^s(\Omega)$ et $H_{\star-}^s(\Omega)$ par :

$$\begin{aligned} H_{\star+}^s(\Omega) &= L_1^2(\Lambda; D(A^{\frac{s}{2}})) \cap D(A_1^{\frac{s}{2}}(\Lambda); L^2(\Lambda)), \\ H_{\star-}^s(\Omega) &= L_{-1}^2(\Lambda; D(A^{\frac{s}{2}})) \cap D(A_1^{\frac{s}{2}}(\Lambda); L^2(\Lambda)) \end{aligned}$$

où A est l'opérateur de *Strum – Liouville* défini par :

$$A = -[(1 - \xi^2)\psi']'$$

et A_1 et A_{-1} sont définis par :

$$\begin{aligned} A_1 &= -(1 + \xi)^{-1}[(1 - \xi)(1 + \xi)^2\psi']', \\ A_{-1} &= -(1 + \xi)[(1 - \xi)\psi']'. \end{aligned}$$

Proposition 1.6.3 1) La fonction $S_e^{(0)}$ définie dans (1.6.26) est dans $H_{\star+}^s(\Omega)$ pour $s < 2\lambda + 2$.

2) La fonction $S_e^{(k)}$ définie dans (1.6.27) est dans $H_{\star-}^s(\Omega)$ pour $s < 2\lambda + 2$ et on a

$$\|S_e^{(k)}\|_{H_{\star-}^s(\Omega)} \leq c |k|^{\frac{s}{2} - \lambda - 1} \text{ pour } k \neq 0.$$

Pour la preuve consulter [8, Chapitre V] et [24, Prop. 14].

On utilisera ces espaces pour améliorer les estimations.

On note $\Lambda =]-1, 1[$, $\Sigma = (]-1, 1])^2$, $\mathbb{P}_N(\Lambda)$ l'ensemble des fonctions polynomiales définies sur Λ de degré inférieur ou égal à N et $\mathbb{P}_N^*(\Lambda)$ est l'ensemble des polynômes de $\mathbb{P}_N(\Lambda)$ qui s'annulent en -1 . On introduit les opérateurs de projection orthogonale suivants :

$$\pi_N : L^2(\Lambda) \rightarrow \mathbb{P}_N(\Lambda), \pi_N^+ : L_1^2(\Lambda) \rightarrow \mathbb{P}_N(\Lambda) \text{ et } \pi_N^- : L_{-1}^2(\Lambda) \rightarrow \mathbb{P}_N^*(\Lambda).$$

On définit les opérateurs de projection orthogonale bidimensionnels par

$$\begin{aligned}\Pi_N^+ &= \pi_N^{+(\zeta)} \circ \pi_N^{(\xi)} : L_1^2(\Sigma) \longrightarrow \mathbb{P}_N(\Sigma), \\ \Pi_N^- &= \pi_N^{-(\zeta)} \circ \pi_N^{(\xi)} : L_{-1}^2(\Sigma) \longrightarrow \mathbb{P}_N(\Sigma).\end{aligned}$$

voir [8, Chapites I et II].

Proposition 1.6.4

1) Pour tout s et tout t tels que $0 \leq 2t \leq s$, il existe c positif tel que pour tout $v \in H_{*+}^s(\Sigma)$ on ait

$$\|v - \Pi_N^+ v\|_{H_1^t(\Sigma)} \leq cN^{2t-s} \|v\|_{H_{*+}^s(\Sigma)}.$$

2) Pour tout s et t tels que $0 \leq 2t \leq s$, il existe C positif tel que pour tout $v \in H_{*-}^s(\Sigma)$ on ait

$$\|v - \Pi_N^- v\|_{H_1^t(\Sigma)} + \|v - \Pi_N^- v\|_{L^2_{-1}(\Sigma)} \leq CN^{2t-s} \|v\|_{H_{*-}^s(\Sigma)}.$$

Remarque 1.6.1 1) Soit $\varepsilon > 0$, Si $s = 2\lambda + 2 - \varepsilon$, alors $\|S_\varepsilon^{(k)}\|_{H_{*+}^s(\Sigma)}$ et $\|S_\varepsilon^{(k)}\|_{H_{*-}^s(\Sigma)}$ sont majorées par $\varepsilon^{-q-\frac{1}{2}}$.

2) On peut poser dans ce cas $\varepsilon = (\ell \log N)^{-1}$, et on a alors $N^\varepsilon = e$.

3) La proposition 1.6.4 reste vraie si on remplace Σ par Ω , où Ω est un rectangle quelconque (avec un côté sur l'axe).

Voir [8, Chapitre V] pour les détails.



Discrétisation du problème de Laplace par la méthode des joints

Sommaire

2.1	Introduction	30
2.2	Géométrie de la décomposition	30
2.2.1	Géométrie	30
2.2.2	Formules de quadrature	30
2.3	Le problème de Laplace : Cas axisymétrique	33
2.3.1	Problème continu	33
2.3.2	Problème discret	35
2.3.3	Estimations d'erreurs	41
2.3.4	Estimations d'erreur : (cas des fonctions singulières)	55
2.4	Le problème de Laplace : Cas général ($k \neq 0$)	61
2.4.1	Problème continu	61
2.4.2	Problème discret	63
2.4.3	Estimations d'erreur	64
2.4.4	Estimations d'erreur (Cas avec singularités)	71
2.5	Retour au problème tridimensionnel	74
2.5.1	Algorithme de Strang et Fix : cas axisymétrique	78

2.5.2	Estimation d'erreurs	82
2.5.3	Algorithme de Strang et Fix : cas général	84
2.5.4	Estimation d'erreurs	87
2.5.5	Retour au problème tridimensionnel : Algorithme de Strang et Fix	88
2.6	Mise en œuvre de l'Algorithme de résolution	91
2.6.1	Description du système linéaire	91
2.6.2	La matrice des joints	93
2.6.3	Mise en œuvre de l'Algorithme de Strang et Fix	93
2.7	Résultats numériques	94
2.7.1	Cas axisymétrique	94
2.7.2	Algorithme de Strang et Fix	103
2.7.3	Cas général	104

2.1 Introduction

Dans cette partie on va utiliser la méthode des joints, pour discrétiser le problème de Laplace dans un domaine Ω qu'on décompose en sous domaines. Chaque sous-domaine est un rectangle de côtés parallèles aux axes $r = 0$ et $z = 0$. Ensuite on va considérer l'algorithme de Strang et Fix et mettre en évidence son importance dans l'amélioration de l'erreur entre la solution du problème continu et la solution discrète.

2.2 Géométrie de la décomposition

2.2.1 Géométrie

On décompose le domaine Ω en sous-domaines rectangulaires ouverts Ω_ℓ , $1 \leq \ell \leq L$, voir *fig 1.3* de sorte que

$$\bar{\Omega} = \bigcup_{\ell=1}^L \bar{\Omega}_\ell, \quad \Omega_\ell \cap \Omega_m = \emptyset, \quad 1 \leq \ell < m \leq L.$$

On note $\Gamma^{\ell,j}$, $1 \leq j \leq 4$, les côtés de $\bar{\Omega}_\ell$ et $\gamma^{\ell t} = \partial\bar{\Omega}_\ell \cap \partial\bar{\Omega}_t$, $\ell \neq t$, quand $\bar{\Omega}_\ell$ et $\bar{\Omega}_t$ ont un côté commun. On désigne par $(\Omega_\ell)_{1 \leq \ell \leq L_0}$ les rectangles tels que $\partial\bar{\Omega}_\ell \cap \Gamma_0 \neq \emptyset$ et par $(\Omega_\ell)_{L_0+1 \leq \ell \leq L}$ ceux tels que $\partial\bar{\Omega}_\ell \cap \Gamma_0 = \emptyset$, où L_0 est un entier naturel compris entre 1 et L . Pour $1 \leq \ell \leq L_0$, on note $\Omega_\ell =]0, r'_\ell[\times]z_\ell, z'_\ell[$ et pour $L_0 + 1 \leq \ell \leq L$, on note $\Omega_\ell =]r_\ell, r'_\ell[\times]z_\ell, z'_\ell[$.

2.2.2 Formules de quadrature

On rappelle dans ce paragraphe quelques résultats démontrés dans [8, Chapitre III]. On note $\xi_0 = -1$, $\xi_N = 1$ et $(\xi_i)_{1 \leq i \leq N-1}$ les zéros du polynôme L'_N , où L_N désigne le polynôme de Legendre de degré N . Soit $\mathbb{P}_N(\mathbb{A})$ l'espace des fonctions polynômiales

définies sur Λ de degré $\leq N$. La formule de quadrature de Gauss-Lobatto sur l'intervalle $\Lambda =]-1, 1[$ s'écrit

$$\forall \phi \in \mathbb{P}_{2N-1}(\Lambda), \quad \int_{-1}^1 \phi(\xi) d\xi = \sum_{i=0}^N \phi(\xi_i) \rho_i, \quad (2.2.1)$$

où les ρ_i , $0 \leq i \leq N$, désignent les poids de Gauss-Lobatto pour la mesure $d\xi$. On définit un produit discret sur l'ensemble des fonctions continues sur Λ par :

$$(\phi, \psi)_N^0 = \sum_{j=0}^N \phi(\xi_j) \psi(\xi_j) \rho_j \quad (2.2.2)$$

et on a

$$\forall \phi_N \in \mathbb{P}_N(\Lambda), \quad \|\phi_N\|_{L^2(\Lambda)}^2 \leq (\phi_N, \phi_N)_N^0 \leq 3 \|\phi_N\|_{L^2(\Lambda)}^2.$$

Voir [8, (VI.1.4)]

Remarque 2.2.1 On note que $(\cdot, \cdot)_N^0$ est un produit scalaire sur $\mathbb{P}_N(\Lambda)$.

On définit à présent une seconde formule de quadrature. Soient $\zeta_1 = -1$, $\zeta_{N+1} = 1$ et $(\zeta_j)_{2 \leq j \leq N}$ les zéros du polynôme M'_N où M_N est défini par $M_N(\zeta) = \frac{L_N(\zeta) + L_{N+1}(\zeta)}{1 + \zeta}$. On rappelle que la famille $(M_n)_n$ est orthogonale pour la mesure $(1 + \zeta) d\zeta$. On considère la formule de quadrature :

$$\forall \phi_N \in \mathbb{P}_{2N-1}(\Lambda), \quad \int_{-1}^1 \phi_N(\zeta) (1 + \zeta) d\zeta = \sum_{i=1}^{N+1} \phi_N(\zeta_i) \omega_i, \quad (2.2.3)$$

où ω_i , $1 \leq i \leq N + 1$, sont les poids de Gauss-Lobatto pour la mesure $(1 + \zeta) d\zeta$. Le produit discret associé est défini, pour des fonctions ϕ et ψ continues, par :

$$(\phi, \psi)_N^1 = \sum_{j=1}^{N+1} \phi(\zeta_j) \psi(\zeta_j) \omega_j, \quad (2.2.4)$$

et vérifie [8, lemme VI.1.4]

$$\forall \phi_N \in \mathbb{P}_N(\Lambda), \quad \|\phi_N\|_{L^2(\Lambda)}^2 \leq (\phi_N, \phi_N)_N^1 \leq 4 \|\phi_N\|_{L^2(\Lambda)}^2.$$

En combinant les formules (2.2.2) et (2.2.4), on obtient la formule de quadrature sur le carré $\Sigma =]-1, 1[$:

$$\forall \phi_N \in \mathbb{P}_{2N-1}(\Sigma), \quad \int_{\Sigma} \phi_N(\zeta, \xi) (1 + \zeta) d\zeta d\xi = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=0}^N \phi_N(\zeta_i, \xi_j) \omega_i \rho_j.$$

Le produit discret associé est donné par :

$$((\phi_N, \psi_N))_N = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=0}^N \phi_N(\zeta_i, \xi_j) \psi_N(\zeta_i, \xi_j) \omega_i \rho_j.$$

Ceci nous permet d'avoir les inégalités suivantes

$$\forall \phi_N \in \mathbb{P}_N(\Sigma), \|\phi_N\|_{L^2_1(\Sigma)}^2 \leq ((\phi_N, \phi_N))_N \leq 12 \|\phi_N\|_{L^2_1(\Sigma)}^2. \quad (2.2.5)$$

On peut aussi définir la formule de quadrature

$$\forall \phi_N \in \mathbb{P}_{2N-1}(\Sigma), \int_{\Sigma} \phi_N(\zeta, \xi) d\zeta d\xi = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \phi_N(\xi_i, \xi_j) \rho_i \rho_j$$

et le produit scalaire associé

$$((\phi_N, \psi_N))_N^1 = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \phi_N(\xi_i, \xi_j) \psi_N(\xi_i, \xi_j) \rho_i \rho_j$$

et on a

$$\forall \phi_N \in \mathbb{P}_N(\Sigma), \|\phi_N\|_{L^2(\Sigma)}^2 \leq ((\phi_N, \phi_N))_N^1 \leq 9 \|\phi_N\|_{L^2(\Sigma)}^2. \quad (2.2.6)$$

Le changement de variable $r = \frac{1}{2}(1 + \zeta)$ permet d'en déduire des formules d'intégration correspondant à la mesure $r dr$ sur $[0, 1]$.

Par transformations affines, on définit les formules de quadrature sur Ω_ℓ de la manière suivante. Pour $1 \leq \ell \leq L$, soient $(\xi_i^\ell)_{0 \leq i \leq N_\ell}$ et $(\rho_i^\ell)_{0 \leq i \leq N_\ell}$ respectivement les nœuds et poids de Gauss-Lobatto sur Ω_ℓ pour la mesure $d\xi$ et $(\zeta_j^\ell)_{1 \leq j \leq N_\ell+1}$, $(\omega_j^\ell)_{1 \leq j \leq N_\ell+1}$ ceux de Gauss-Lobatto pour la mesure $r dr$. Les nœuds ξ_i^ℓ, ζ_j^ℓ et les poids $\rho_i^\ell, \omega_j^\ell$ sont les nœuds et poids correspondant respectivement à $\xi_i, \zeta_j, \rho_i, \omega_j$ et sont donnés par les formules :

$$\begin{aligned} & \text{pour } 1 \leq \ell \leq L_0, \xi_i^\ell = \frac{r_\ell}{2}(\zeta_i + 1), 1 \leq i \leq N_\ell + 1, \\ & \text{pour } L_0 + 1 \leq \ell \leq L, \xi_i^{(r)\ell} = \frac{(r'_\ell - r_\ell)}{2} \xi_i + \frac{(r'_\ell + r_\ell)}{2}, 0 \leq i \leq N_\ell, \\ & \text{et pour } 1 \leq \ell \leq L, \xi_i^\ell = \frac{(z'_\ell - z_\ell)}{2} \xi_i + \frac{(z'_\ell + z_\ell)}{2}, 0 \leq i \leq N_\ell. \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

Pour $1 \leq \ell \leq L_0$, on prend sur Ω_ℓ la formule déduite de celle de Gauss-Lobatto, pour la mesure $d\zeta$ sur $]-1, 1[$, dans la direction axiale et pour la mesure $(1 + \zeta)d\zeta$ dans la direction radiale. Pour $L_0 + 1 \leq \ell \leq L$, on prend sur Ω_ℓ la formule déduite de celle de Gauss-Lobatto, pour la mesure $d\zeta$ dans les deux directions. On définit un produit discret sur Ω pour $\phi, \psi \in C^0(\bar{\Omega})$ par

$$\begin{aligned} (\phi, \psi)_\delta &= \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{i=1}^{N_\ell+1} \sum_{j=0}^{N_\ell} \phi|_{\Omega_\ell}(\zeta_j^\ell, \xi_i^\ell) \psi|_{\Omega_\ell}(\zeta_j^\ell, \xi_i^\ell) \omega_j^\ell \rho_i^\ell \\ &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \sum_{i=0}^{N_\ell} \phi|_{\Omega_\ell}(\xi_i^{(r)\ell}, \xi_j^\ell) \psi|_{\Omega_\ell}(\xi_i^{(r)\ell}, \xi_j^\ell) \xi_i^{(r)\ell} \rho_i^\ell \rho_j^\ell. \end{aligned} \quad (2.2.8)$$

2.3 Le problème de Laplace : Cas axisymétrique

2.3.1 Problème continu

On considère le problème (1.6.10), avec g nul sur le bord Γ . Ω est décomposé en L sous-domaines disjoints. La forme bilinéaire $a(\cdot, \cdot)$ s'écrit, pour tout u et $v \in C^0(\bar{\Omega})$,

$$a(u, v) = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla u_\ell(r, z) \cdot \nabla v_\ell(r, z) r dr dz \quad (2.3.1)$$

où ∇v désigne le vecteur $(\partial_r v, \partial_z v)$. Et u_ℓ désigne la restriction de u à Ω_ℓ .

On introduit les espaces \mathcal{X}_1^1 et $\mathcal{X}_{1\circ}^1$ par :

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_1^1(\Omega) &= \{v = (v_1, \dots, v_\ell) \in \prod_{\ell=1}^L H_1^1(\Omega_\ell)\} \\ \mathcal{X}_{1\circ}^1(\Omega) &= \{v \in \mathcal{X}_1^1(\Omega), v = 0 \text{ sur } \Gamma\}. \end{aligned}$$

On munit $\mathcal{X}_1^1(\Omega)$ de la norme $\|\cdot\|_{\mathcal{X}_1^1}$ et de la semi-norme $|\cdot|_{\mathcal{X}_1^1}$ données par :

$$\begin{aligned} \|v\|_{\mathcal{X}_1^1} &= \left(\sum_{\ell=1}^L \|v_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \\ |v|_{\mathcal{X}_1^1} &= \left(\sum_{\ell=1}^L |v_\ell|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

On définit l'espace $\mathcal{H}_{1\circ}^1(\Omega)$ par :

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{1\circ}^1(\Omega) &= \{v = (v_1, \dots, v_\ell) \in \prod_{\ell=1}^L H_1^1(\Omega_\ell) \\ &v_\ell = 0 \text{ sur } (\partial\Omega \cap \partial\Omega_\ell) \setminus \Gamma_0 \text{ et } v_m = v_\ell \text{ sur } \gamma^{m\ell}, 1 \leq m < \ell \leq L\}, \end{aligned}$$

et on le munit de la norme induite :

$$\|v\|_{\mathcal{H}_{1\circ}^1} = \left(\sum_{\ell=1}^L \|v_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Vue la continuité des traces sur les interfaces, $\mathcal{H}_{1\circ}^1(\Omega)$ est isomorphe à l'espace $H_{1\circ}^1(\Omega)$ et on a la proposition suivante.

Proposition 2.3.1 *Le problème (1.6.10) admet la formulation variationnelle suivante :*

$$\begin{cases} \text{Trouver } u \in H_{1\circ}^1(\Omega), \text{ vérifiant} \\ a(u, v) = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} (fv_\ell)(r, z) r dr dz, \forall v \in H_{1\circ}^1(\Omega). \end{cases} \quad (2.3.3)$$

Et pour toute donnée f dans $L_1^2(\Omega)$, le problème (2.3.3) admet une solution unique qui vérifie :

$$\|u\|_{\mathcal{X}_1^1} \leq c \|f\|_{L_1^2(\Omega)}. \quad (2.3.4)$$

où la norme $\|\cdot\|_{L^2_1(\Omega)}$ est définie par

$$\|\cdot\|_{L^2_1(\Omega)} = \left(\sum_{\ell=1}^L \|\cdot\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.3.5)$$

Preuve 1) Soit u, v et $w \in H^1_{1\circ}(\Omega)$. On a au sens des distributions, $\Delta u = \partial_r^2 u + \frac{1}{r} \partial_r u + \partial_z^2 u$ et la formule de Green donne :

$$\begin{aligned} - \int_{\Omega} (\Delta u) w r dr dz &= - \sum_{\ell=1}^L \sum_{m=\ell+1}^L \int_{\gamma^{\ell m}} \left(\frac{\partial u}{\partial n_\ell} \right) [w] d\tau \\ &\quad + \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla u_\ell \nabla w_\ell r dr dz, \end{aligned}$$

où $[w]$ est le saut de continuité à travers $\gamma^{\ell m}$. En effet sur $\gamma^{\ell m}$ on a $u_\ell|_{\gamma^{\ell m}} = u_m|_{\gamma^{\ell m}}$. Comme $f \in L^2_1(\Omega)$, on a $u \in H^1_s(\Omega)$, $s \geq \frac{3}{2}$ [8, Chapitre II] ce qui implique que :

$$\frac{\partial u_\ell}{\partial n_\ell} = - \frac{\partial u_m}{\partial n_m}.$$

Le terme $\sum_{\ell=1}^L \sum_{m=\ell+1}^L \int_{\gamma^{\ell m}} \left(\frac{\partial u}{\partial n_\ell} \right) [w] d\tau$ s'annule puisque $[w] = w_\ell|_{\gamma^{\ell m}} - w_m|_{\gamma^{\ell m}} = 0$. On en déduit que u est solution du problème (2.3.3).

2) Pour l'existence et l'unicité on a besoin de montrer la continuité et la coercivité de la forme bilinéaire a sur l'espace de Hilbert $H^1_{1\circ}(\Omega)$ à savoir qu'il existe deux constantes c et c' telles que :

$$\begin{aligned} |a(u, v)| &\leq c \|u\|_{\mathcal{X}^1_1} \|v\|_{\mathcal{X}^1_1} \quad \forall (u, v) \in H^1_{1\circ}(\Omega) \times H^1_{1\circ}(\Omega), \\ a(u, u) &\geq c' \|u\|_{\mathcal{X}^1_1}^2 \quad \forall u \in H^1_{1\circ}(\Omega). \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

a) La première inégalité est obtenue facilement, avec $c = 1$, en utilisant l'inégalité de Cauchy-Schwarz sur chaque sous domaine Ω_ℓ .

b) Pour la deuxième inégalité, on écrit $a(u, u) = |u|_{\mathcal{X}^1_1}^2$ et on suppose par l'absurde que pour chaque entier n strictement positif, il existe $u_n \in H^1_{1\circ}(\Omega)$ non nul tel que

$$\|u_n\|_{\mathcal{X}^1_1} \geq n |u_n|_{\mathcal{X}^1_1}.$$

On pose

$$\frac{u_n}{\|u_n\|_{\mathcal{X}^1_1}} = v_n.$$

On a alors $\|v_n\|_{\mathcal{X}^1_1} = 1$ et $\lim_{n \rightarrow +\infty} |v_n|_{\mathcal{X}^1_1} = 0$. La suite $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est donc bornée dans $H^1_1(\Omega_\ell)$. Comme l'espace $H^1_1(\Omega_\ell)$ est un espace de Hilbert (donc réflexif) et l'injection de $H^1_1(\Omega_\ell)$ dans $L^2_1(\Omega_\ell)$ est compacte [8], il existe une sous-suite de $(v_n)_n$ notée encore

$(v_n)_n$ qui converge faiblement dans $H_1^1(\Omega_\ell)$ et fortement dans $L_1^2(\Omega_\ell)$ vers un élément $v_\ell \in H_1^1(\Omega_\ell)$. On en déduit que

$$0 = \liminf_{n \rightarrow +\infty} \|v_n\|_{X_1^1} \geq \sum_{\ell=1}^L \|\nabla v_\ell\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}^2.$$

Ceci implique que v_ℓ est constante dans Ω_ℓ pour tout ℓ et que par conséquent $v_\ell = 0$ pour tous les ℓ tels que $\text{mes}(\partial\Omega_\ell \cap \Gamma) > 0$.

Puisque $v_\ell = v_m$ sur $\gamma^{\ell m}$ alors on déduit que v_ℓ est nul pour tout $1 \leq \ell \leq L$. Ceci contredit le fait que $\|v\|_{X_1^1} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \|v_n\|_{X_1^1} = 1$, donc la propriété $a(u, u) \geq c \|u\|_{X_1^1}^2$ est vérifiée.

c) Pour prouver l'inégalité (2.3.4), il suffit d'écrire

$$\begin{aligned} a(u, u) &= \|u\|_{X_1^1}^2 = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} f u \, r \, dr \, dz \\ &\leq \|f\|_{L_1^2(\Omega)} \|u\|_{L_1^2(\Omega)} \leq \|f\|_{L_1^2(\Omega)} \|u\|_{X_1^1} \end{aligned}$$

et utiliser b). ■

2.3.2 Problème discret

On considère la forme bilinéaire discrète définie par :

$$a_\delta(u, v) = (\nabla u, \nabla v)_\delta.$$

D'après (2.2.8) on a

$$\begin{aligned} a_\delta(u, v) &= \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{i=1}^{N_\ell+1} \sum_{j=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial r} \frac{\partial v_\ell}{\partial r} + \frac{\partial u_\ell}{\partial z} \frac{\partial v_\ell}{\partial z} \right) (\zeta_j^\ell, \xi_i^\ell) \omega_i^\ell \rho_j^\ell \\ &\quad + \sum_{\ell=L_0+1}^L \sum_{j=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial r} \frac{\partial v_\ell}{\partial r} + \frac{\partial u_\ell}{\partial z} \frac{\partial v_\ell}{\partial z} \right) (\xi_i^{(r)\ell}, \xi_j^\ell) \xi_i^{(r)\ell} \rho_i^\ell \rho_j^\ell. \end{aligned}$$

Choix de l'espace discret X_δ^\diamond

On note S l'union des côtés des sous-domaines Ω_ℓ qui sont intérieurs à Ω , c'est-à-dire $S = \bigcup_{\ell=1}^L \partial\Omega_\ell \setminus \partial\Omega$. On choisit un sous-ensemble de côtés des sous-domaines Ω_ℓ qui recouvre S . Soit $(\gamma_\mu^+)_{1 \leq \mu \leq M^+}$, tels que :

$$S = \bigcup_{\mu=1}^{M^+} \gamma_\mu^+, \quad \gamma_\mu^+ \cap \gamma_{\mu'}^+ = \emptyset \text{ pour } \mu \neq \mu', \quad (2.3.7)$$

et tels que pour tous entiers $1 \leq \mu \leq M^+$, il existe deux entiers $\ell(\mu)$ et $j(\mu)$ avec

$$\gamma_\mu^+ = \Gamma^{\ell(\mu), j(\mu)}, \quad 1 \leq \ell(\mu) \leq L, 1 \leq j(\mu) \leq 4.$$

Pour $v \in L_1^2(\Omega)$, on construit une fonction ϕ , qu'on appellera fonction joint associée à v sur \mathcal{S} , par :

$$\phi|_{\gamma_\mu^+} = v|_{\Gamma^{\ell(\mu), j(\mu)}}.$$

On définit l'espace discret X_δ comme suit :

$$\begin{aligned} X_\delta(\Omega) = \{v_\delta \in L_1^2(\Omega) \text{ tels que } v_\delta|_{\Omega_\ell} = v_\ell \in \mathbb{P}_{N_\ell}(\Omega_\ell), \quad (2.3.8) \\ v_\ell|_{\Gamma^{\ell, j}} = \phi|_{\gamma_\mu^+} \text{ si } (\ell, j) = (\ell(\mu), j(\mu)), \\ \int_{\Gamma^{\ell, j}} (v_\ell - \phi)(\tau) \psi(\tau) d\tau = 0, \forall \psi \in \mathbb{P}_{N_\ell-2}(\Gamma^{\ell, j}), 1 \leq j \leq 4 \text{ et } 1 \leq \ell \leq L \text{ si} \\ (\ell, j) \neq (\ell(\mu), j(\mu))\} \end{aligned}$$

La mesure $d\tau$ intervenant ci-dessus correspond à :

- a) la mesure dz sur les côtés parallèles à l'axe (Oz) ,
 - b) la mesure $r dr$ sur les côtés strictement parallèles à l'axe (Or) ,
- Finalement on définit l'espace X_δ° :

$$X_\delta^\circ(\Omega) = \{v_\delta \in X_\delta(\Omega); v_\delta = 0 \text{ sur } \Gamma\} \quad (2.3.9)$$

Remarque 2.3.1 On désigne les non joints par γ_m^- , (c'est à dire les côtés des Ω_ℓ qui ne coïncident pas avec un γ_μ^+) et on a $\mathcal{S} = \bigcup_{m=1}^{M^-} \gamma_m^-$, $\gamma_m^- \cap \gamma_{m'}^- = \emptyset$ pour $m \neq m'$, et

$$\int_{\gamma_m^-} (v_{\gamma_m^-} - \phi)(\tau) \psi(\tau) d\tau = 0, \forall \psi \in \mathbb{P}_{N_{(\gamma_m^-)}-2}(\gamma_m^-). \quad (2.3.10)$$

(où $N_{(\gamma_m^-)} = N_{\ell_s} \gamma_m^-$ côté de Ω_ℓ).

On munit X_δ° de la norme induite $\|\cdot\|_{X_\delta^\circ(\Omega)}$ donnée par :

$$\|v_\delta\|_{X_\delta^\circ} = \left(\sum_{\ell=1}^L \|v_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Remarque 2.3.2 L'espace discret X_δ° n'est pas inclus dans $\mathcal{H}_{1,0}^1(\Omega)$, l'approximation est dite non conforme. Cette non conformité est due à la continuité sur les interfaces qui est imposée uniquement dans un sens faible et dite condition des joints.

Formulation variationnelle

On définit les opérateurs suivants [8, Chapitre VI] :

\mathcal{I}_N^+ l'opérateur d'interpolation de $L_1^2(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_N(\Omega_\ell)$, qui vérifie $f(\zeta_j^\ell, \xi_i^\ell) = \mathcal{I}_N^+ f(\zeta_j^\ell, \xi_i^\ell)$, pour f continue sur $\bar{\Omega}_\ell$,

\mathcal{I}_N l'opérateur d'interpolation de $L^2(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_N(\Omega_\ell)$, qui vérifie $f(\xi_j^{(r)\ell}, \xi_i^\ell) = \mathcal{I}_N f(\xi_j^{(r)\ell}, \xi_i^\ell)$, pour f continue sur $\bar{\Omega}_\ell$, où ζ_j^ℓ, ξ_i^ℓ sont les zéros définis dans (2.2.7).

On considère le problème discret

$$\begin{cases} \text{Trouver } u_\delta \in X_\delta^\circ \text{ vérifiant :} \\ \forall v_\delta \in X_\delta^\circ, a_\delta(u_\delta, v_\delta) = (\mathcal{I}_\delta f, v_\delta)_\delta. \end{cases} \quad (2.3.11)$$

où $\mathcal{I}_\delta|_{\Omega_\ell} = \mathcal{I}_{N_\ell}^+$, si Ω_ℓ touche l'axe $r = 0$ et $\mathcal{I}_\delta|_{\Omega_\ell} = \mathcal{I}_{N_\ell}$ sinon.

On va maintenant étudier l'existence et l'unicité de solution pour le problème (2.3.11). Pour ceci, on a besoin des deux propositions suivantes.

Proposition 2.3.2 *La formule bilinéaire a_δ est continue et coercive sur X_δ° muni de sa semi-norme c est à dire, il existe deux constantes c et c' qui ne dépendent que de Ω telles que :*

$$\begin{cases} \forall u_\delta \in X_\delta^\circ(\Omega), \forall v_\delta \in X_\delta^\circ(\Omega), \\ |a_\delta(u_\delta, v_\delta)| \leq c |u_\delta|_{\mathcal{X}_1^1} |v_\delta|_{\mathcal{X}_1^1} \\ a_\delta(u_\delta, u_\delta) \geq c' |u_\delta|_{\mathcal{X}_1^1}^2. \end{cases} \quad (2.3.12)$$

Preuve 1) Continuité : On a, pour $(u_\delta, v_\delta) \in X_\delta^\circ(\Omega) \times X_\delta^\circ(\Omega)$:

$$\begin{aligned} a_\delta(u_\delta, v_\delta) &= \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{i=1}^{N_\ell+1} \sum_{j=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial r} \frac{\partial v_\ell}{\partial r} + \frac{\partial u_\ell}{\partial z} \frac{\partial v_\ell}{\partial z} \right) (\zeta_j^\ell, \xi_i^\ell) \omega_i^\ell \rho_j^\ell \\ &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \sum_{i=1}^{N_\ell} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial r} \frac{\partial v_\ell}{\partial r} + \frac{\partial u_\ell}{\partial z} \frac{\partial v_\ell}{\partial z} \right) (\xi_i^{(r)\ell}, \xi_j^\ell) \xi_i^{(r)\ell} \rho_i^\ell \rho_j^\ell. \end{aligned}$$

Le terme $\frac{\partial u_\ell}{\partial r} \frac{\partial v_\ell}{\partial r}$ est de degré $2N_\ell - 2$ par rapport à r et le terme $\frac{\partial u_\ell}{\partial z} \frac{\partial v_\ell}{\partial z}$ est de degré $2N_\ell - 2$ par rapport à z . On peut donc utiliser (2.2.1) et (2.2.3) pour obtenir :

$$\begin{aligned} a_\delta(u_\delta, v_\delta) &= \sum_{\ell=1}^{L_0} \int_0^{r_\ell} \sum_{j=0}^{N_\ell} \frac{\partial u_\ell}{\partial r} \frac{\partial v_\ell}{\partial r} (r, \xi_i^\ell) \rho_j^\ell r dr \\ &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \int_{r_\ell}^{r_\ell'} \sum_{j=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial r} \frac{\partial v_\ell}{\partial r} \right) (r, \xi_j^\ell) \rho_i^\ell r dr \\ &+ \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{i=1}^{N_\ell+1} \int_{z_\ell}^{z_\ell'} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial z} \frac{\partial v_\ell}{\partial z} \right) (\zeta_j^\ell, z) \omega_i^\ell dz \\ &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \sum_{i=1}^{N_\ell} \int_{z_\ell}^{z_\ell'} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial z} \frac{\partial v_\ell}{\partial z} \right) (\xi_i^{(r)\ell}, z) \xi_i^{(r)\ell} \rho_i^\ell dz. \end{aligned}$$

En utilisant l'inégalité de Cauchy-Schwarz on obtient :

$$\begin{aligned}
 |a_\delta(u_\delta, v_\delta)| &\leq \sum_{\ell=1}^{L_0} \int_0^{r_\ell} \left[\sum_{j=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial r}(r, \xi_j^\ell) \right)^2 \rho_j^\ell \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{j=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial v_\ell}{\partial r}(r, \xi_j^\ell) \right)^2 \rho_j^\ell \right]^{\frac{1}{2}} r dr \\
 &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \int_{r_\ell}^{r'_\ell} \left[\sum_{j=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial r}(r, \xi_j^\ell) \right)^2 \rho_j^\ell \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{j=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial v_\ell}{\partial r}(r, \xi_j^\ell) \right)^2 \rho_j^\ell \right]^{\frac{1}{2}} r dr \\
 &+ \sum_{\ell=1}^{L_0} \int_{z_\ell}^{z'_\ell} \left[\sum_{i=1}^{N_\ell+1} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial z}(\zeta_j^\ell, z) \right)^2 \omega_i^\ell \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=1}^{N_\ell+1} \left(\frac{\partial v_\ell}{\partial z}(\zeta_j^\ell, z) \right)^2 \omega_i^\ell \right]^{\frac{1}{2}} dz \\
 &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \int_{z_\ell}^{z'_\ell} \left[\sum_{i=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial u_\ell}{\partial z}(\xi_i^{(r)\ell}, z) \xi_i^{(r)\ell} \right)^2 \rho_i^\ell \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=0}^{N_\ell} \left(\frac{\partial v_\ell}{\partial z}(\xi_i^{(r)\ell}, z) \xi_i^{(r)\ell} \right)^2 \rho_i^\ell \right]^{\frac{1}{2}} dz.
 \end{aligned}$$

On utilise ensuite (2.2.2) et (2.2.4) pour obtenir :

$$\begin{aligned}
 a_\delta(u_\delta, v_\delta) &\leq 3 \left\{ \sum_{\ell=1}^{L_0} \int_0^{r_\ell} \left\| \frac{\partial u_\ell}{\partial r}(r, \cdot) \right\|_{L^2(z_\ell, z'_\ell)} \left\| \frac{\partial v_\ell}{\partial r}(r, \cdot) \right\|_{L^2(z_\ell, z'_\ell)} r dr \right. \\
 &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \int_{r_\ell}^{r'_\ell} \left\| \frac{\partial u_\ell}{\partial r}(r, \cdot) \right\|_{L^2(z_\ell, z'_\ell)} \left\| \frac{\partial v_\ell}{\partial r}(r, \cdot) \right\|_{L^2(z_\ell, z'_\ell)} r dr \\
 &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \int_{z_\ell}^{z'_\ell} \sum_{\ell=1}^{L_0} \int_{z_\ell}^{z'_\ell} \left\| \frac{\partial u_\ell}{\partial z}(\cdot, z) \right\|_{L^2_1(r_\ell, r'_\ell)} \left\| \frac{\partial v_\ell}{\partial z}(\cdot, z) \right\|_{L^2_1(r_\ell, r'_\ell)} dz \Big\} \\
 &+ 4 \left\{ \sum_{\ell=1}^{L_0} \int_{z_\ell}^{z'_\ell} \left\| \frac{\partial u_\ell}{\partial z}(\cdot, z) \right\|_{L^2_1(0, r_\ell)} \left\| \frac{\partial v_\ell}{\partial z}(\cdot, z) \right\|_{L^2_1(0, r_\ell)} dz \right\}.
 \end{aligned}$$

On utilise une autre fois l'inégalité de Cauchy-Schwarz, on obtient :

$$\begin{aligned}
 a_\delta(u_\delta, v_\delta) &\leq 3 \left\{ \sum_{\ell=1}^{L_0} \left(\left\| \frac{\partial u_\ell}{\partial r} \right\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \left\| \frac{\partial v_\ell}{\partial r} \right\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \right. \right. & (2.3.13) \\
 &+ \left. \left\| \frac{\partial u_\ell}{\partial z} \right\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \left\| \frac{\partial v_\ell}{\partial z} \right\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \right\} \\
 &+ 4 \left\{ \sum_{\ell=L_0+1}^L \left(\left\| \frac{\partial u_\ell}{\partial r} \right\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \left\| \frac{\partial v_\ell}{\partial r} \right\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \right. \right. \\
 &+ \left. \left\| \frac{\partial u_\ell}{\partial z} \right\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \left\| \frac{\partial v_\ell}{\partial z} \right\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \right\}.
 \end{aligned}$$

On en déduit que :

$$a_\delta(u_\delta, v_\delta) \leq 4 \left(\sum_{\ell=1}^L \|u_\ell\|_{H^1_1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{\ell=1}^L \|v_\ell\|_{H^1_1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

et la première inégalité est prouvée.

2) Coercivité : On a pour $u_\delta \in X_\delta^\circ$

$$\begin{aligned} a_\delta(u_\delta, u_\delta) &= \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{i=1}^{N_\ell+1} \sum_{j=0}^{N_\ell} (|\frac{\partial u_\ell}{\partial r}|^2 + |\frac{\partial u_\ell}{\partial z}|^2) (\zeta_j^\ell, \xi_i^\ell) \omega_i^\ell \rho_j^\ell \\ &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \sum_{i=1}^{N_\ell} (|\frac{\partial u_\ell}{\partial r}|^2 + |\frac{\partial u_\ell}{\partial z}|^2) (\zeta_i^\ell, \xi_i^\ell) (\xi_i^{(r)\ell}, \xi_j^\ell) \xi_i^{(r)\ell} \rho_i^\ell \rho_j^\ell. \end{aligned}$$

On remarque que $\frac{\partial u_\ell}{\partial z}$ et $\frac{\partial u_\ell}{\partial r}$ ont des degrés $\leq N_\ell - 1$ en z respectivement en r . On utilise (2.2.1) et (2.2.3) pour obtenir :

$$\begin{aligned} a_\delta(u_\delta, u_\delta) &= \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{j=0}^{N_\ell} \int_0^{r_\ell} |\frac{\partial u_\ell}{\partial r}|^2 (r, \xi_j^\ell) \rho_j^\ell r dr + \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{j=0}^{N_\ell} \int_{r_\ell}^{r_\ell'} |\frac{\partial u_\ell}{\partial z}|^2 (r, \xi_j^\ell) \rho_j^\ell r dr + \\ &+ \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{j=0}^{N_\ell} \int_{z_\ell}^{z_\ell'} |\frac{\partial u_\ell}{\partial r}|^2 (\zeta_i^\ell, z) \omega_i^\ell dz + \sum_{\ell=L_0+1}^L \sum_{i=1}^{N_\ell} \int_{z_\ell}^{z_\ell'} |\frac{\partial u_\ell}{\partial z}|^2 (\xi_i^{(r)\ell}, z) \xi_i^{(r)\ell} \rho_i^\ell dz. \end{aligned}$$

Les inégalités (2.2.2) et (2.2.4) permettent de déduire que :

$$\begin{aligned} a_\delta(u_\delta, u_\delta) &\geq \sum_{\ell=1}^{L_0} (\int_0^{r_\ell} \|\frac{\partial u_\ell}{\partial r}(r, \cdot)\|_{L^2(z_\ell, z_\ell')}^2 r dr + \|\frac{\partial u_\ell}{\partial z}(\cdot, z)\|_{L^2_1(0, r_\ell)}^2 dz) + \\ &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L (\int_{r_\ell}^{r_\ell'} \|\frac{\partial u_\ell}{\partial r}(r, \cdot)\|_{L^2(z_\ell, z_\ell')}^2 r dr + \int_{z_\ell}^{z_\ell'} \|\frac{\partial u_\ell}{\partial z}(\cdot, z)\|_{L^2_1(r_\ell, r_\ell')}^2 dz). \end{aligned}$$

On a alors

$$\begin{aligned} a_\delta(u_\delta, u_\delta) &\geq \sum_{\ell=1}^{L_0} (\|\frac{\partial u_\ell}{\partial r}\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2 + \|\frac{\partial u_\ell}{\partial z}\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2) \\ &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L (\|\frac{\partial u_\ell}{\partial r}\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2 + \|\frac{\partial u_\ell}{\partial z}\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2) \\ &\geq |u_\delta|_{\mathcal{X}^1}^2 \end{aligned}$$

et la preuve est terminée. ■

On va montrer maintenant que $\|v\|_{L^2_1(\Omega)}$ est majoré par la norme $|v|_{\mathcal{X}^1}$ fois une constante indépendante de δ . Pour cela on introduit d'abord le nombre N_a comme étant le nombre maximal de coins de Ω_ℓ contenus dans γ_m^- , $1 \leq m \leq M^-$.

Pour tout $v \in L^2_1(\Omega)$, $v|_{\Omega_\ell} \in V^1_1(\Omega_\ell)$, on associe ϕ la fonction de joint. On définit alors l'espace X par :

$$\begin{aligned} X(\Omega) &= \{v \in L^2_1(\Omega), v|_{\Omega_\ell} \in V^1_1(\Omega_\ell) \text{ tel que} \\ \forall 1 \leq m \leq M^-, \forall \psi \in \mathbb{P}_{N_a}, \int_{\gamma_m^-} (v - \phi)\psi d\tau = 0, v = 0 \text{ sur } \Gamma\}. \end{aligned}$$

On note que l'espace $X(\Omega)$ n'est pas discret mais contient tout les X_δ° pour lesquels les N_ℓ sont $\geq N_a + 2$. On a alors la proposition suivante.

Proposition 2.3.3 Il existe une constante c positive ne dépendant que de Ω telle que l'on a pour tout $v \in X(\Omega)$ défini dans (2.3.9) :

$$\|v\|_{L^2_1(\Omega)} \leq c |v|_{X^1_1}. \quad (2.3.14)$$

Preuve 1) Soit $v \in X(\Omega)$ tel que $|v|_{X^1_1} = 0$, on déduit que v_ℓ est constante pour tous les ℓ en plus $v_\ell = 0$ dans Ω_ℓ tel que $mes(\partial\Omega_\ell \cap \Gamma) > 0$. Mais ici on ne peut pas conclure directement que $v_\ell = 0$ pour tout ℓ , parce qu'on a pas nécessairement $v_\ell = v_m$ sur $\gamma^{\ell m}$. On fixe m tel que $1 \leq m \leq M^-$ et $mes(\partial\Omega_m^- \cap \Gamma) > 0$, on a alors :

$$\int_{\gamma_m^-} (v_{\gamma_m^-} - \phi)(\tau) \psi(\tau) d\tau = 0, \forall \psi \in \mathbb{P}_{N_m^- - 2}(\gamma_m^-).$$

d'où

$$\sum_{j \in J} \int_{\gamma^{jm}} (v_{\gamma_m^-} - v_j) \psi(\tau) d\tau = 0, \forall \psi \in \mathbb{P}_{N_m^- - 2}(\gamma_m^-).$$

avec $\gamma^{jm} = \bar{\Omega}_j \cap \bar{\Omega}_m^-$ et $mes(\gamma^{jm} = \bar{\Omega}_j \cap \bar{\Omega}_m^-) > 0$. Puisque v_ℓ est constante pour tout ℓ , on déduit que

$$\sum_{j \in J} (v_{\gamma_m^-} - v_j) \int_{\gamma^{jm}} \psi(\tau) d\tau = 0.$$

On introduit les extrémités a_{j_0} et a_{j_0-1} de l'interface $\gamma^{j_0 m}$ et on considère le polynôme χ défini sur γ_m^- et de degré $N_m^- - 1$ tel que

$$\chi(a_0) = \chi(a_1) = \dots = \chi(a_{j_0-1}) = 0 \text{ et } \chi(a_{j_0}) = \chi(a_{j_0+1}) = \dots = \chi(a_S) = 1.$$

Voir figure 2.1.

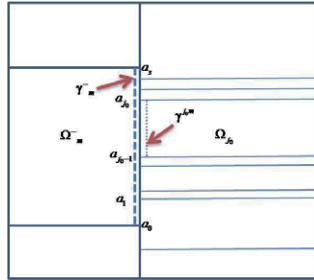


FIGURE 2.1 – Les points a_j

Puisque $S \leq N_a$, alors on peut choisir $\psi_{j_0} = \chi'$. Un tel ψ_{j_0} existe et on a

$$\int_{\gamma^{jm}} \psi_{j_0}(\tau) d\tau = \chi(a_j) - \chi(a_{j-1}) = \delta_{j j_0}$$

où δ désigne le symbole de Kronecker. Par suite, on a

$$\sum_{j \in J} (v_{\gamma_m^-} - v_j) \int_{\gamma^j m} \psi_{j_0}(\tau) d\tau = (v_{\gamma_m^-} - v_{j_0}) = 0,$$

et donc $v_{\gamma_m^-} = v_{j_0}$. On déduit que $v_\ell = 0$ pour tout ℓ tel que Ω_ℓ est adjacent à un rectangle qui touche la frontière $\partial\Omega \setminus \Gamma_0$. Par extension, on peut montrer que tous les v_ℓ sont nuls.

2) On a montré dans 1) que $|v|_{X_1^1}$ est une norme, on peut alors appliquer le lemme de Peetre-Tartar [35, Chapitre1. Thm 2.1] avec $A = \nabla$ et $A \in (E_1, E_2)$, $B = Id_{E_2=E_3}$, $E_1 = H_1^1(\Omega)$ et $E_2 = E_3 = L_1^2(\Omega)$, pour déduire (2.3.14). ■

Remarque 2.3.3 2) On suppose dorénavant que l'espace $X_\delta^\circ(\Omega)$ vérifie la condition

$$N_\ell \geq N_a + 2, \forall 1 \leq \ell \leq L.$$

On peut énoncer maintenant le théorème d'existence et d'unicité.

Théorème 2.3.1 Si f est dans $C^0(\bar{\Omega})$, le problème

$$\begin{cases} \text{Trouver } u_\delta \in X_\delta^\circ \text{ vérifiant :} \\ \forall v_\delta \in X_\delta^\circ, a_\delta(u_\delta, v_\delta) = (\mathcal{I}_\delta f, v_\delta)_\delta. \end{cases} \quad (2.3.15)$$

admet une unique solution. Cette solution vérifie :

$$\|u_\delta\|_{X_1^1} \leq c \|\mathcal{I}_\delta f\|_{L_1^2(\Omega)}. \quad (2.3.16)$$

Preuve Pour prouver l'existence et l'unicité, on utilise le lemme de Lax Milgram et les deux propositions précédentes. Pour prouver l'inégalité (2.3.16), on écrit

$$a_\delta(u_\delta, u_\delta) = (\mathcal{I}_\delta f, u_\delta)_\delta,$$

et on utilise (2.2.5) et (2.2.6) pour conclure que

$$C \|u_\delta\|_{X_1^1}^2 \leq a_\delta(u_\delta, u_\delta) \leq \|f\|_{L_1^2(\Omega)} \|u_\delta\|_{X_1^1}.$$

■

2.3.3 Estimations d'erreurs

Proposition 2.3.4 Soit u la solution du problème (2.3.3), et u_δ celle du problème (2.3.15). On a l'estimation suivante :

$$\begin{aligned} \|u - u_\delta\|_{X_1^1} &\leq C \left(\inf_{v_\delta \in X_\delta^\circ} \|u - v_\delta\|_{X_1^1} \right. & (2.3.17) \\ &+ \sup_{w_\delta \in X_\delta^\circ} \frac{a(v_\delta, w_\delta) - a_\delta(v_\delta, w_\delta)}{\|w_\delta\|_{X_1^1}} \Big\} \\ &+ \sup_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \frac{\int_{\gamma_m^-} (\frac{\partial u}{\partial n_m}) [w_\delta] d\tau}{\|w_\delta\|_{X_1^1}} \\ &+ \sup_{w_\delta \in X_\delta^\circ} \frac{\int_\Omega f w_\delta r dr dz - (\mathcal{I}_\delta f, w_\delta)_\delta}{\|w_\delta\|_{X_1^1}}. \end{aligned}$$

Preuve L'ellipticité de a_δ donne l'existence d'un $\beta > 0$ tel que l'on ait pour tout $v_\delta \in \mathcal{X}_{1\circ}^1$:

$$\beta \|u_\delta - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}^2 \leq a_\delta (u_\delta - v_\delta, u_\delta - v_\delta). \quad (2.3.18)$$

On pose $u_\delta - v_\delta = w_\delta$. On a en utilisant le fait que u_δ est solution du problème discret :

$$a_\delta (u_\delta - v_\delta, w_\delta) = -a_\delta (v_\delta, w_\delta) + (\mathcal{I}_\delta f, w_\delta)_\delta. \quad (2.3.19)$$

En plus on a, moyennant le fait que u est solution du problème continue et $w_\delta \in X^\circ$

$$-\int_{\Omega} (\Delta u) w_\delta r dr dz - \int_{\Omega} f w_\delta r dr dz = 0. \quad (2.3.20)$$

En rappelant que $\Delta u = \partial_z^2 u + \frac{1}{r} \partial_r u + \partial_z^2 u$

$$\begin{aligned} -\int_{\Omega} (\Delta u) w_\delta r dr dz &= -\sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \\ &\quad + \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla u \nabla w_\delta r dr dz, \end{aligned} \quad (2.3.21)$$

où $[w_\delta]$ est le saut de w_δ à travers γ_μ^+ . Utilisant (2.3.19) et (2.3.20), on obtient

$$a_\delta (u_\delta - v_\delta, w_\delta) = -a_\delta (v_\delta, w_\delta) + (\mathcal{I}_\delta f, w_\delta)_\delta - \int_{\Omega} (\Delta u) w_\delta r dr dz - \int_{\Omega} f w_\delta r dr dz. \quad (2.3.22)$$

En injectant (2.3.21) dans (2.3.22) on obtient

$$\begin{aligned} a_\delta (u_\delta - v_\delta, w_\delta) &= -a_\delta (v_\delta, w_\delta) + \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla u \nabla w_\delta r dr dz \\ &\quad - \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \\ &\quad + (\mathcal{I}_\delta f, w_\delta)_\delta - \int_{\Omega} f w_\delta r dr dz. \end{aligned} \quad (2.3.23)$$

Or on a

$$\sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla u \nabla w_\delta r dr dz = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} (\nabla u - \nabla v_\delta) \nabla w_\delta r dr dz + \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla v_\delta \nabla w_\delta r dr dz. \quad (2.3.24)$$

Moyennant (2.3.18) et (2.3.24), la formule (2.3.23) donne :

$$\begin{aligned} \|u_\delta - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}^2 &\leq \frac{1}{\beta} \left\{ \|u - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} + \sup_{w_\delta \in \mathcal{X}_1^1} \left[\frac{a(v_\delta, w_\delta) - a_\delta(v_\delta, w_\delta)}{\|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}} \right] \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \right. \\ &\quad + \sup_{w_\delta \in \mathcal{X}_{1\circ}^1} \left[\frac{\sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau}{\|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}} \right] \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \\ &\quad \left. + \sup_{w_\delta \in \mathcal{X}_{1\circ}^1} \left[\frac{(\mathcal{I}_\delta f, w_\delta)_\delta - \int_{\Omega} f w_\delta r dr dz}{\|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}} \right] \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \right\}, \end{aligned}$$

Enfin, on divise par $\|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}$ et on utilise l'inégalité triangulaire

$$\|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \leq \|u - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|u_\delta - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}$$

pour déduire le résultat. ■

Remarque 2.3.4 L'erreur entre la solution continue et celle discrète, est majorée par l'erreur d'approximation (c'est le premier terme dans (2.3.17) ajoutée à l'erreur de consistance (c'est le troisième terme dans (2.3.17), plus l'erreur due à l'intégration numérique (c'est le deuxième et le quatrième terme).

On va dans ce qui suit les majorer une à une.

Erreur d'approximation

Proposition 2.3.5 Soit u la solution du problème (2.3.3), on suppose que $u|_{\Omega_\ell} \in H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)$ avec $s_\ell > \frac{1}{2}$ et $s_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$. Alors on a

$$\inf_{v_\delta \in X_\delta^s} \|u - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \leq c \lambda_\delta^{\frac{3}{2}} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}$$

où

$$\lambda_\delta = \max\left\{\frac{N_\mu^+}{N_m^-}, \frac{N_m^-}{N_\mu^+}\right\} \quad (2.3.25)$$

pour tout joints γ_μ^+ , où μ est pris sur tous les $1 \leq \mu \leq M^+$ et non joints γ_m^- , avec $1 \leq m \leq M^-$ tels que $\gamma_\mu^+ \cap \gamma_m^-$ a une mesure positive.

Avant d'aborder la preuve on introduit les notations suivantes et on énonce les deux lemmes qui suivent dont la preuve peut être consultée dans [8, Chapitre II].

Notation : On note $\mathbb{P}_N^0(\Lambda)$ l'ensemble des polynômes s'annulant en ± 1 et $\mathbb{P}_N^\circ(\Lambda)$ l'ensemble des polynômes s'annulant en 1. On considère les opérateurs de projection orthogonale définis par :

$$\pi_N^{1,0} : H_0^1(\Lambda) \longrightarrow \mathbb{P}_N^0(\Lambda), \text{ et } \pi_N^{+,1,\circ} : H_{1,\circ}^1(\Lambda) \longrightarrow \mathbb{P}_N^\circ(\Lambda)$$

Lemme 2.3.1 1) Il existe un opérateur $\tilde{\pi}_N^1 : H^1(\Lambda) \longrightarrow \mathbb{P}_N(\Lambda)$, défini par :

$$\tilde{\pi}_N^1 \tilde{\varphi}(\zeta) = \pi_N^{1,0} \varphi(\zeta) - \tilde{\varphi}(-1) \frac{1-\zeta}{2} - \tilde{\varphi}(1) \frac{1+\zeta}{2},$$

avec

$$\varphi(\zeta) = \tilde{\varphi}(\zeta) - \tilde{\varphi}(-1) \frac{1-\zeta}{2} - \tilde{\varphi}(1) \frac{1+\zeta}{2},$$

qui vérifie pour $0 \leq t \leq s$:

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 (\tilde{\varphi} - \tilde{\pi}_N^1 \tilde{\varphi}) \psi d\tau &= 0, \quad \forall \psi \in \mathbb{P}_{N-2}(\Lambda), \\ \|\tilde{\varphi} - \tilde{\pi}_N^1 \tilde{\varphi}\|_{H^t(\Lambda)} &\leq CN^{t-s} \|\tilde{\varphi}\|_{H^s(\Lambda)}. \end{aligned} \quad (2.3.26)$$

2) Il existe un opérateur $\tilde{\pi}_N^{+1} : H_1^1(\Lambda) \rightarrow \mathbb{P}_N(\Lambda)$ défini par

$$\tilde{\pi}_N^{+1} \tilde{\phi}(\zeta) = \pi_N^{+,1,\diamond} \varphi^\diamond(\zeta) + \tilde{\phi}(1) \frac{1+\zeta}{2},$$

avec

$$\varphi^\diamond(\zeta) = \tilde{\phi}(\zeta) - \tilde{\phi}(1) \frac{1+\zeta}{2},$$

cet opérateur vérifie pour $0 \leq t \leq 1 \leq s$:

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 (\tilde{\phi} - \tilde{\pi}_N^{+1} \tilde{\phi}) \psi d\tau &= 0, \quad \forall \psi \in \mathbb{P}_{N-2}(\Lambda), \\ \left\| \tilde{\phi} - \tilde{\pi}_N^{+1} \tilde{\phi} \right\|_{H_1^1(\Lambda)} &\leq CN^{t-s} \left\| \tilde{\phi} \right\|_{H_1^1(\Lambda)}. \end{aligned} \quad (2.3.27)$$

En plus on a pour $s \geq 2$

$$\begin{aligned} \left\| \varphi - \tilde{\pi}_N^1 \circ \tilde{\pi}_N^1 \varphi \right\|_{H^t(\Sigma)} &\leq cN^{t-s} \|\varphi\|_{H^s(\Sigma)}, \quad \forall \varphi \in H^s(\Sigma), \\ \left\| \varphi - \tilde{\pi}_N^{+1} \circ \tilde{\pi}_N^1 \varphi \right\|_{H_1^1(\Sigma)} &\leq cN^{t-s} \|\varphi\|_{H_1^1(\Sigma)}, \quad \forall \varphi \in H_1^1(\Sigma). \end{aligned} \quad (2.3.28)$$

Soit γ un côté de Σ . On rappelle la fonction trace de $H_1^1(\Sigma)$ dans $H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma)$, et on munit $H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma)$ de la norme

$$\|v\|_{H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma)} = \inf_{\varphi \in H_1^1(\Sigma)} \|\varphi\|_{H_1^1(\Sigma)}.$$

On note (ζ, ξ) les points générique dans Σ et $(1+\zeta)$ le poids. On énonce alors le lemme suivant.

Lemme 2.3.2 Soit γ un côté de Σ alors on a :

a) Pour tout entier $N \geq 2$, il existe un opérateur $\mathcal{R}^\gamma : \mathbb{P}_N^0(\gamma) \rightarrow \mathbb{P}_N(\Sigma)$ tel que pour tout $\varphi_N \in \mathbb{P}_N^0(\gamma)$ on a :

$$\mathcal{R}^\gamma \varphi_N = \varphi_N \text{ sur } \gamma, \text{ et } \mathcal{R}^\gamma \varphi_N = 0 \text{ sur } \partial\Sigma \setminus \gamma,$$

De plus, il existe une constante c positive et indépendante de N telle que :

$$\forall \varphi_N \in \mathbb{P}_N^0(\gamma), \|\mathcal{R}^\gamma \varphi_N\|_{H^1(\Sigma)} \leq c \|\varphi_N\|_{H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma)}.$$

b) Si γ n'est pas inclus dans l'axe $\{\zeta = -1\}$, pour tout $N \geq 2$, il existe un opérateur \mathcal{R}_+^γ vérifiant :

(i) Si $\gamma \subset \{\zeta = 1\}$, \mathcal{R}_+^γ opère de $\mathbb{P}_N^0(\gamma)$ dans $\mathbb{P}_N(\Sigma)$ et pour tout $\varphi_N \in \mathbb{P}_N^0(\gamma)$, $\mathcal{R}_+^\gamma \varphi_N$ coïncide avec φ_N sur γ et s'annule sur les trois autres côtés de Σ . De plus, il existe une constante c positive et indépendante de N telle que :

$$\forall \varphi_N \in \mathbb{P}_N^0(\gamma), \|\mathcal{R}_+^\gamma \varphi_N\|_{H_1^1(\Sigma)} \leq c \|\varphi_N\|_{H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma)}.$$

(ii) Si $\gamma \subset \{\zeta = \pm 1\}$, \mathcal{R}_+^γ opère de $\mathbb{P}_N^\circ(\gamma)$ dans $\mathbb{P}_N(\Sigma)$ et pour tout $\varphi_N \in \mathbb{P}_N^\circ(\gamma)$, $\mathcal{R}_+^\gamma \varphi_N$ coïncide avec φ_N sur γ et s'annule sur le côté opposé à γ et sur le côté inclus dans $\{\zeta = 1\}$. De plus, il existe une constante c positive et indépendante de N telle que :

$$\forall \varphi_N \in \mathbb{P}_N^\circ(\gamma), \|\mathcal{R}_+^\gamma \varphi_N\|_{H^1(\Sigma)} \leq c \|\varphi_N\|_{H^{\frac{1}{2}}(\gamma)}.$$

c) Si γ n'est pas inclus dans l'axe $\{\zeta = -1\}$, pour tout $N \geq 2$, il existe un opérateur \mathcal{R}_-^γ qui opère de $\mathbb{P}_N^0(\gamma)$ dans $\mathbb{P}_N(\Sigma)$ et pour tout $\varphi_N \in \mathbb{P}_N^0(\gamma)$, $\mathcal{R}_-^\gamma \varphi_N$ coïncide avec φ_N sur γ et s'annule sur les trois autres côtés de Σ . De plus, il existe une constante c positive et indépendante de N telle que :

(i) Si $\gamma \subset \{\zeta = 1\}$,

$$\forall \varphi_N \in \mathbb{P}_N^0(\gamma), \|\mathcal{R}_+^\gamma \varphi_N\|_{V^1(\Sigma)} \leq c \|\varphi_N\|_{H^{\frac{1}{2}}(\gamma)}.$$

(ii) Si $\gamma \subset \{\zeta = \pm 1\}$

$$\forall \varphi_N \in \mathbb{P}_N^\circ(\gamma), \|\mathcal{R}_-^\gamma \varphi_N\|_{V^1(\Sigma)} \leq c \|\varphi_N\|_{H^{\frac{1}{2}}(\gamma)}.$$

La preuve de ce lemme peut être consultée dans [16].

Lemme 2.3.3 Soit $a_p, 1 \leq p \leq P$, P points distincts dans Λ . Pour tout $N \geq P + 2$, et tout $p, 1 \leq p \leq P$, il existe un polynôme η_p dans $\mathbb{P}_N(\Lambda)$ tel que η_p est égale à 1 en a_p et 0 en ± 1 et en $a_{p'} \neq p$. Ce polynôme η_p satisfait :

$$\|\eta_p\|_{L^2_1(\Lambda)} \leq cN^{-\frac{1}{2}}, \quad \|\eta'_p\|_{L^2_1(\Lambda)} \leq cN^{\frac{1}{2}}. \quad (2.3.29)$$

La constante c dépend seulement des points a_p .

Preuve La preuve consiste à considérer le polynôme de Lagrange φ_i^- pour $0 \leq i \leq N - P - 1$, associé aux nœuds ζ_i^- de Gauss-Lobatto. On utilise [17, Lemma 2.3] combiné avec l'inégalité inverse on a :

$$\|\varphi_i^-\|_{L^2_1(\Lambda)}^2 \leq cN^{-1}, \quad \|(1 - \zeta^2)\varphi_i^-\|_{L^2_1(\Lambda)} \leq cN^{-\frac{1}{2}} \quad \text{et} \quad |(1 - \zeta^2)\varphi_i^-|_{H^1_1(\Lambda)} \leq cN^{\frac{1}{2}}. \quad (2.3.30)$$

Soit alors i l'indice tel que $\zeta_i^- \leq a_p < \zeta_{i+1}^-$, et on pose

$$\eta_p(\zeta) = \frac{1 - \zeta^2}{1 - a_p^2} \frac{\varphi_i^- + \varphi_{i+1}^-}{(\varphi_i^- + \varphi_{i+1}^-)(a_p)} \prod_{p' \neq p} \frac{\zeta - a_{p'}}{a_p - a_{p'}}. \quad (2.3.31)$$

η_p vérifie les propriétés désirées. ■

Revenons à la preuve de la proposition 2.3.5

Preuve La preuve se divise en trois étapes :

Etape 1 : Construction de v_δ^1

On pose

$$v_\ell^1 = \begin{cases} \mathcal{I}_{N_\ell}^+ u & \text{sur } \Omega_\ell \text{ si } 1 \leq \ell \leq L_0 \\ \mathcal{I}_{N_\ell}^- u & \text{sur } \Omega_\ell \text{ si } L_0 + 1 \leq \ell \leq L \end{cases}$$

où $\mathcal{I}_{N_\ell}^+ u(\zeta_i^\ell, \xi_j^\ell) = u(\zeta_i^\ell, \xi_j^\ell)$, ($1 \leq i \leq N+1$ et $0 \leq j \leq N$), et $\mathcal{I}_{N_\ell} u(\xi_i^{(r)\ell}, \xi_j^\ell) = u(\xi_i^{(r)\ell}, \xi_j^\ell)$, ($0 \leq i \leq N$ et $0 \leq j \leq N$).

On a d'après [8, Chapitre VI.3], pour $s_\ell > \frac{1}{2}$ ($s_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$)

$$\|u_{|\Omega_\ell} - v_\ell^1\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \leq C N_\ell^{-s_\ell} \|u_{|\Omega_\ell}\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}. \quad (2.3.32)$$

et

$$\|u_{|\Omega_\ell} - v_\ell^1\|_{H_1^1(\Gamma)} + N_\ell \|u_{|\Omega_\ell} - v_\ell^1\|_{L_1^2(\Gamma)} \leq C' N_\ell^{\frac{1}{2}-s_\ell} \|u_{|\Omega_\ell}\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}, \quad 1 \leq \ell \leq L. \quad (2.3.33)$$

Ici C et C' dépendent du maximum de $|r_{\ell+1} - r_\ell|$ si $L_0 + 1 \leq \ell \leq L$.

Cependant v_δ^1 ne vérifie pas la condition du joint sur les interfaces, on va pour cela relever les v_δ^1 ainsi construits sur les non joints. Ces termes relevés doivent s'annuler sur les coins de la partie non jointe. Pour cette raison une étape intermédiaire sera nécessaire.

Étape 2 : Construction de v_δ^2 :

Soit γ_μ^+ , $1 \leq \mu \leq M^+$ les joints et \mathcal{C}_μ^+ l'ensemble de tout les coins qui se trouvent sur γ_μ^+ . On pose

$$v_\delta^2 = \sum_{\mu=1}^{M^+} \sum_{e \in \mathcal{C}_\mu^+} (u - v_{\delta|\Omega_\mu^+}^1)(e) \bar{\Phi}_{\mu,e}$$

où

$$\bar{\Phi}_{\mu,e} = \begin{cases} \Phi_{\mu,e} & \text{dans } \Omega_\mu^+ \\ 0 & \text{dans } \Omega \setminus \bar{\Omega}_\mu^+ \end{cases} \quad (2.3.34)$$

$\Phi_{\mu,e}$ est obtenu de Φ par homothétie et translation, où $\Phi(\zeta, \eta) = \eta_p(\zeta)(\frac{1-\eta}{2})^{N_\mu^+}$.

On a alors $v_\delta^1 + v_\delta^2$ est égal à u sur tous les nœuds de \mathcal{C}_μ^+ et

$$\sum_{\ell=1}^L \|v_\delta^2\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} = c \sum_{\mu=1}^{M^+} \sum_{e \in \mathcal{C}_\mu^+} |(u - v_{\delta|\Omega_\mu^+}^1)(e)|,$$

avec c indépendant de N . En effet en combinant (2.3.29) et le fait que $\|(\frac{1-\eta}{2})^N\|_{H_1^1(\Omega)} \leq c N^{s-\frac{1}{2}}$, on conclut que $\|\Phi_{\mu,e}\|_{H_1^1(\Omega_\mu^+)}$ est majoré indépendamment de N_μ^+ .

En appliquant l'inégalité de *Gagliardo - Nirenberg* sur chaque γ_μ^+ on a :

$$\begin{aligned} \|u - v_{\delta|\Omega_\mu^+}^1\|_{L^\infty(\gamma_\mu^+)} &\leq \|u - v_{\delta|\Omega_\mu^+}^1\|_{L_1^2(\gamma_\mu^+)}^{\frac{1}{2}} \|u - v_{\delta|\Omega_\mu^+}^1\|_{H_1^1(\gamma_\mu^+)}^{\frac{1}{2}} \\ &\leq c (N_\mu^+)^{-s_\mu^+} \|u\|_{H_1^{s_\mu^++1}(\Omega_\mu^+)} \end{aligned} \quad (2.3.35)$$

D'où on a

$$\sum_{\ell=1}^L \|v_\delta^2\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} = c \sum_{\mu=1}^{M^+} (N_\mu^+)^{-s_\mu^+} \|u\|_{H_1^{s_\mu^++1}(\Omega_\mu^+)}.$$

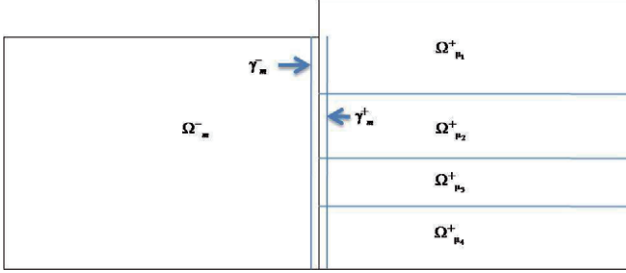


FIGURE 2.2 – Décomposition du domaine

De même on a en utilisant le lemme 2.3.3, et (2.3.35) :

$$\begin{aligned} \|v_\delta^2\|_{H^1(\gamma_\mu^+)} &\leq c(N_\mu^+)^{\frac{1}{2}-s_\mu^+} \|u\|_{H_1^{\mu^++1}(\Omega_\mu^+)} \\ \|v_\delta^2\|_{L^2(\gamma_m^-)} &\leq c(N_\mu^+)^{-\frac{1}{2}-s_\mu^+} \|u\|_{H_1^{\mu^++1}(\Omega_\mu^+)} \end{aligned}$$

Etape 3 : Construction de v_δ^3

On désigne respectivement par $\tilde{\pi}_{N_\ell}^{+,1,(r),\ell}$, $1 \leq \ell \leq L_0$, $\tilde{\pi}_{N_\ell}^{+,1,(r),\ell}$, $L_0 + 1 \leq \ell \leq L$ et $\tilde{\pi}_{N_\ell}^{+,1,(z),\ell}$, $1 \leq \ell \leq L$, les opérateurs de projection correspondants respectivement à $\tilde{\pi}_N^{+,1}$ dans la direction r , $\tilde{\pi}_N^{+,1}$ dans la direction z . L'indice ℓ est relatif au sous-domaine Ω_ℓ , $1 \leq \ell \leq L$.

On pose $v_\delta^{12} = v_\delta^1 + v_\delta^2$. D'après la première partie, on a $v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}$ s'annule sur toutes les extrémités de γ_m^- , $1 \leq m \leq M^-$. On définit maintenant l'opérateur $\tilde{\pi}^{\gamma_m^-}$ par :

$$\tilde{\pi}^{\gamma_m^-} = \begin{cases} \tilde{\pi}_m^{+,1,(r)} & \text{si } \gamma_m^- // (\text{Or}) \text{ et touche l'axe } \{r = 0\} \\ \tilde{\pi}_m^{+,1,(r)} & \text{si } \gamma_m^- // (\text{Or}) \text{ et loin de l'axe } \{r = 0\} \\ \tilde{\pi}_m^{+,1,(z)} & \text{si } \gamma_m^- // (\text{Oz}). \end{cases}$$

On définit v_δ^3 par :

$$v_\delta^3 = \sum_{m=1}^{M^-} [\tilde{\mathcal{R}}_*^{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{\gamma_m^-} (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-}] \quad (2.3.36)$$

où γ_m^+ est le côté γ_m^- vu dans l'autre direction voir figure 2.2

1) $\tilde{\mathcal{R}}_*^{\gamma_m^-}$ resp $\tilde{\mathcal{R}}^{\gamma_m^-}$ sont les relèvements déduits de $\mathcal{R}_*^{\gamma_m^-}$ resp $\mathcal{R}^{\gamma_m^-}$, par homothétie et translation. On note alors

$$\tilde{\mathcal{R}}_*^{\gamma} = \begin{cases} \tilde{\mathcal{R}}_*^{\gamma} & \text{si } \gamma // (\text{Or}) \text{ et touche l'axe } \{r = 0\} \\ \tilde{\mathcal{R}}^{\gamma} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.3.37)$$

2) On utilise pour tout s réel, la notation :

$$(H^{s,\gamma}, V^{s,\gamma}, L^{2,\gamma}) = \begin{cases} (H_1^s, V_1^s, L_1^2) \text{ si } \gamma // (\text{Or}) \text{ et touche l'axe } \{r = 0\} \\ (H^s, V^s, L^2) \text{ sinon.} \end{cases}$$

On a

$$\begin{aligned} \tilde{\mathcal{R}}_\star^{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{\gamma_m^-} (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}) &= \tilde{\mathcal{R}}_\star^{\gamma_m^-} (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}) \\ &\quad - \tilde{\mathcal{R}}_\star^{\gamma_m^-} (Id - \tilde{\pi}^{\gamma_m^-}) (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}). \end{aligned}$$

On utilise le fait que $\|\varphi - \tilde{\pi}^{\gamma_m^-} \varphi\|_{V^{r,\gamma_m^-}(\Omega_m^-)} \leq c(N_m^-)^{r-s} \|\varphi\|_{H^{s,\gamma_m^-}(\gamma_m^-)}$, pour $0 \leq r \leq 1 \leq s$. Ici on prend $r = \frac{1}{2}$ et $s = 1$, on a alors :

$$\begin{aligned} \|\tilde{\mathcal{R}}_\star^{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{\gamma_m^-} (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12})\|_{H^{1,\gamma_m^-}(\Omega_m^-)} &\leq c \|(v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12})\|_{V^{\frac{1}{2},\gamma_m^-}(\gamma_m^-)} \\ &\quad + \|(Id - \tilde{\pi}^{\gamma_m^-}) (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12})\|_{H^{\frac{1}{2},\gamma_m^-}(\gamma_m^-)}. \end{aligned}$$

On utilise (2.3.26) et (2.3.27) pour déduire que

$$\begin{aligned} \|\tilde{\mathcal{R}}_\star^{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{\gamma_m^-} (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12})\|_{H^{1,\gamma_m^-}(\Omega_m^-)} &\leq c \|(v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12})\|_{V^{\frac{1}{2},\gamma_m^-}(\gamma_m^-)} \\ &\quad + N_m^{-\frac{1}{2}} \|(v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12})\|_{H^{1,\gamma_m^-}(\gamma_m^-)}. \end{aligned}$$

Puisque les termes $u - v_{\delta|\gamma_m^+}^{12}$ et $u - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}$ s'annulent sur les extrémités de γ_m^- , alors ils appartiennent à $V^{\frac{1}{2},\gamma_m^-}(\gamma_m^-)$. On a en plus $v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}$ s'annule sur γ_m^- on a alors

$$\|(v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12})\|_{V^{\frac{1}{2},\gamma_m^-}(\gamma_m^-)} \leq \|u - v_{\delta|\gamma_m^+}^{12}\|_{V^{\frac{1}{2},\gamma_m^-}(\gamma_m^-)} + \|u - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}\|_{V^{\frac{1}{2},\gamma_m^-}(\gamma_m^-)}$$

et

$$\|v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}\|_{H^{1,\gamma_m^-}(\gamma_m^-)} \leq \|u - v_{\delta|\gamma_m^+}^{12}\|_{H^{1,\gamma_m^-}(\gamma_m^-)} + \|u - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}\|_{H^{1,\gamma_m^-}(\gamma_m^-)}.$$

D'après l'inégalité d'interpolation on a

$$\begin{aligned} \|u - v_{\delta|\gamma_m^+}^{12}\|_{V^{\frac{1}{2},\gamma_m^-}(\gamma_m^-)} &\leq \|u - v_{\delta|\gamma_m^+}^{12}\|_{L^2,\gamma_m^-}^{\frac{1}{2}} \|u - v_{\delta|\gamma_m^+}^{12}\|_{H^{1,\gamma_m^-}(\gamma_m^-)}^{\frac{1}{2}} \\ \|u - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}\|_{H^{\frac{1}{2},\gamma_m^-}(\gamma_m^-)} &\leq \|u - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}\|_{L^2,\gamma_m^-}^{\frac{1}{2}} \|u - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}\|_{H^{1,\gamma_m^-}(\gamma_m^-)}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

On note \mathcal{K}_m^- l'ensemble des indices, $1 \leq \mu \leq M^+$, tel que $\gamma_m^- \cap \gamma_\mu^+$ a une mesure non nulle. On écrit alors

$$\gamma_m^- = \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} \gamma_m^- \cap \gamma_\mu^+.$$

On a alors

$$\begin{aligned} \left\| (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}) \right\|_{V^{\frac{1}{2}, \gamma_m^-(\gamma_m^-)}} &\leq c(N_m^-)^{-s_m^-} \|u\|_{H^{s_m^-+1, \gamma_m^-}(\Omega_m^-)} \\ &+ c_{\gamma_m^-} \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{-s_\mu^+} \|u\|_{H^{s_\mu^++1, \gamma_\mu^+}(\Omega_\mu^+)} \end{aligned}$$

où

$$c_{\gamma_m^-} = \max_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}} / \min_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}}$$

et

$$\begin{aligned} (N_m^-)^{-\frac{1}{2}} \left\| (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12}) \right\|_{H^{1, \gamma_m^-(\gamma_m^-)}} &\leq c[(N_m^-)^{-s_m^-} \|u\|_{H^{s_m^-+1, \gamma_m^-}(\Omega_m^-)} \\ &+ (N_m^-)^{-\frac{1}{2}} \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}-s_\mu^+} \|u\|_{H^{s_\mu^++1, \gamma_\mu^+}(\Omega_\mu^+)}]. \end{aligned}$$

On a aussi

$$\begin{aligned} (N_m^-)^{-\frac{1}{2}} \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}-s_\mu^+} \|u\|_{H^{s_\mu^++1, \gamma_\mu^+}(\Omega_\mu^+)} &\leq (N_m^-)^{-\frac{1}{2}} \max_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}} \\ &\sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{-s_\mu^+} \|u\|_{H^{s_\mu^++1, \gamma_\mu^+}(\Omega_\mu^+)}. \end{aligned}$$

On pose

$$\lambda_\delta = \max \left\{ \frac{N_\mu^+}{N_m^-}, \frac{N_m^-}{N_\mu^+} \right\}.$$

On a les termes $(N_m^-)^{-\frac{1}{2}} \max_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}}$ et $c_{\gamma_m^-}$ sont majorés par $\lambda_\delta^{\frac{1}{2}}$. En effet on a

$$c_{\gamma_m^-} \leq \frac{\max_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}}}{2(N_m^-)^{\frac{1}{2}}} + \frac{2(N_\mu^+)^{\frac{1}{2}}}{\min_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}}}$$

D'où on obtient que

$$\sum_{\ell=1}^L \|v_\delta^3\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} = c\lambda_\delta^{\frac{1}{2}} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}.$$

On conclut finalement que $v_\delta = v_\delta^1 + v_\delta^2 + v_\delta^3$ satisfait la condition des joints et appartient bien à l'espace X_δ° . ■

Remarque 2.3.5 1) On peut remplacer le terme global λ_δ par un terme local λ_ℓ :

$$\lambda_\ell = \max_m \max_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} \left\{ \frac{N_\mu^+}{N_m^-}, \frac{N_m^-}{N_\mu^+} \right\}, \quad (2.3.38)$$

où le premier max est pris sur les m des non joints γ_m^- qui est un côté de Ω_ℓ . Et on a :

$$\inf_{v_\delta \in X_\delta^0} \sum_{\ell=1}^L \|u - v_\delta\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \leq c \sum_{\ell=1}^L (1 + \lambda_\ell)^{\frac{1}{2}} N_\ell^{-s_\ell} \|u\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}.$$

Corollaire 2.3.1 Soit u la solution du problème (2.3.3), on suppose que $u|_{\Omega_\ell} \in H_1^{s_\ell}(\Omega_\ell)$ avec $s_\ell > \frac{1}{2}$ et $s_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$. On suppose de plus que la géométrie est conforme alors on a

$$\inf_{v_\delta \in X_\delta^0} \sum_{\ell=1}^L \|u - v_\delta\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}. \quad (2.3.39)$$

Preuve Dans une géométrie conforme, on remarque qu'on peut éliminer le terme λ_δ , effet on procède comme dans l'étape 1 de la preuve de la proposition 2.3.5 en choisissant v_δ^1 . Ensuite, puisque pour tout m , $1 \leq m \leq M_m^-$, γ_m^- est un côté commun à Ω_ℓ et $\Omega_{\ell'}$, on choisit alors $\Omega_m^- = \Omega_\ell$ et $\Omega_m^+ = \Omega_{\ell'}$ si $N_\ell \geq N_{\ell'}$ et $\Omega_m^- = \Omega_{\ell'}$ et $\Omega_m^+ = \Omega_\ell$ sinon. On pose maintenant

$$v_\delta^2 = \sum_{m=1}^{M^-} \tilde{\mathcal{R}}_\star^{\gamma_m^-} (v_{\delta|\gamma_m^+}^1 - v_{\delta|\gamma_m^-}^1),$$

ceci implique que

$$\begin{aligned} \left\| \tilde{\mathcal{R}}_\star^{\gamma_m^-} (v_{\delta|\gamma_m^+}^1 - v_{\delta|\gamma_m^-}^1) \right\|_{H_1^1(\Omega_m^-)} &\leq c \left(\left\| u - v_{\delta|\Omega_m^-}^1 \right\|_{V_1^{\frac{1}{2}}(\Omega_m^-)} + \left\| u - v_{\delta|\Omega_m^+}^1 \right\|_{V_1^{\frac{1}{2}}(\Omega_m^+)} \right) \\ &\leq c (N^{-s_m^-} \|u\|_{H_1^{s_m^-+1}(\Omega_m^-)} + N^{-s_m^+} \|u\|_{H_1^{s_m^++1}(\Omega_m^+)}) . \end{aligned}$$

D'où en sommant sur m , et en posant $v_\delta = v_\delta^1 + v_\delta^2$, on obtient l'inégalité (2.3.39). ■

Erreur d'interface

Proposition 2.3.6 Soit u la solution du problème (2.3.3). On suppose que $u|_{\Omega_\ell} \in H^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)$, $s_\ell > \frac{1}{2}$ ($s_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$). Alors on a pour tout $w_\delta \in X_\delta^0$

$$\left| \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \right| \leq C \left(\sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{p_\ell} \|u\|_{H^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)} \right) \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}.$$

où p_ℓ est égal à 1 si l'un des côtés de Ω_ℓ est un γ_m^- et intercecte au moins deux sous-domaine $\Omega_{\ell'}, \ell' \neq \ell$ et 0 sinon.

Preuve On considère ici deux cas :

Le premier traite le cas où la décomposition est conforme. Ensuite le deuxième traite le cas où la décomposition est non conforme.

a) **Cas où γ_m^- est un côté entier commun à Ω_ℓ et $\Omega_{\ell'}$** voir figure 2.3

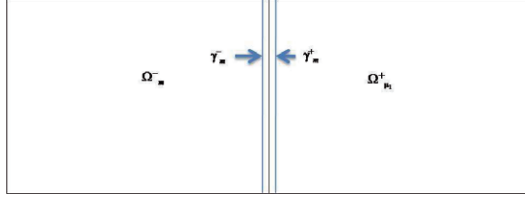


FIGURE 2.3 – Décomposition du domaine : cas conforme

On suppose que Γ^ℓ est le joint et ϕ la fonction joint correspondante (le cas où Γ^ℓ est pris pour joint se traite de la même manière), on a alors

$$\int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau = \int_{\Gamma^t} \frac{\partial u}{\partial n} (\phi - w_\delta|_{\Omega_t}) (\tau) d\tau.$$

On a par définition de X_δ°

$$\forall \psi \in \mathbb{P}_{N_t-2}(\Gamma^t), \int_{\Gamma^t} (\phi - w_\delta|_{\Omega_t}) \psi(\tau) d\tau = 0,$$

et par conséquent on a

$$\int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau = \int_{\Gamma^t} \left(\frac{\partial u}{\partial n} - \psi \right) (\phi - w_\delta|_{\Omega_t}) (\tau) d\tau. \quad (2.3.40)$$

-Pour t et $\ell > L_0$, on remarque que la fonction joint $\phi|_{\Gamma^t}$ est dans $H^{\frac{1}{2}}(\Gamma^t)$. On déduit de (2.3.40) que

$$\left| \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \right| \leq \left\| \frac{\partial u}{\partial n} - \psi \right\|_{H^{-\frac{1}{2}}(\Gamma^t)} \|\phi - w_\delta|_{\Omega_t}\|_{H^{\frac{1}{2}}(\Gamma^t)}.$$

Soit π_{N_t} la projection orthogonale de $L^2(\Gamma^t)$ sur $\mathbb{P}_{N_t}(\Gamma^t)$. On prend pour $\psi = \pi_{N_t-2}(\frac{\partial u}{\partial n})$, on a alors

$$\begin{aligned} \left| \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \right| &\leq c N_t^{-\frac{1}{2} - (s_t - \frac{1}{2})} \left\| \frac{\partial u}{\partial n} \right\|_{H^{s_t - \frac{1}{2}}(\Gamma^t)} \\ &\quad (\|w_\delta|_{\Omega_t}\|_{H^{\frac{1}{2}}(\gamma_m^-)} + \|\phi\|_{H^{\frac{1}{2}}(\gamma_m^-)}). \end{aligned}$$

Sachant que l'opérateur trace est continu de $H^1(\Omega_t)$ dans $H^{\frac{1}{2}}(\Gamma^t)$ et que l'opérateur trace normale l'est de $H^{s_t+1}(\Omega_t)$ dans $H^{s_t-\frac{1}{2}}(\Gamma^t)$, on peut déduire que :

$$\begin{aligned} \left| \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \right| &\leq c N_t^{-s_t} \|u\|_{H^{s_t+1}(\Omega_t)} \\ &\quad (\|w_\delta|_{\Omega_t}\|_{H^1(\Omega_t)} + \|w_\delta|_{\Omega_t}\|_{H^1(\Omega_t)}). \end{aligned} \quad (2.3.41)$$

- Pour t et $\ell \leq L_0$, la fonction $\phi|_{\Gamma^t}$ est dans $H^{\frac{1}{2}}(\Gamma^t)$.

Soit $\pi_{N_t}^+$ la projection orthogonale de $L^2_1(\Gamma^t)$ sur $\mathbb{P}_{N_t}(\Gamma^t)$. On prend pour $\psi^+ = \pi_{N_t}^+(\frac{\partial u}{\partial n})$, on a alors

$$\begin{aligned} \left| \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \right| &\leq \left\| \frac{\partial u}{\partial n} - \psi^+ \right\|_{H^{\frac{1}{2}}_1(\Gamma^t)} \|\phi - w_{\delta|\Omega_t}\|_{H^{\frac{1}{2}}_1(\Gamma^t)} \\ &\leq cN_t^{1-s_\varepsilon} \left\| \frac{\partial u}{\partial n} \right\|_{H^{\frac{1}{2}}_1(\Gamma^t)} \\ &\quad (\|w_{\delta|\Omega_t}\|_{H^{\frac{1}{2}}_1(\Gamma^t)} + \|\phi\|_{H^{\frac{1}{2}}_1(\Gamma^t)}) \\ &\leq cN_t^{-s_\varepsilon} \|u\|_{H^{\frac{1}{2}}_1(\Omega_t)} \\ &\quad (\|w_{\delta|\Omega_t}\|_{H^{\frac{1}{2}}_1(\Omega_t)} + \|w_{\delta|\Omega_t}\|_{H^{\frac{1}{2}}_1(\Omega_t)}). \end{aligned}$$

b) Cas où $\gamma_m^- \subset \cup_{1 \leq i \leq I} \Omega_{t_i}$, I étant un nombre entier positif voir figure 2.2.

Dans ce cas on a $w_{\delta|\Omega_{t_i}} \in H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)$ pour tout $\varepsilon > 0$ si Ω_{t_i} touche l'axe $\{r = 0\}$, sinon $w_{\delta|\Omega_{t_i}} \in H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)$. En effet $w_{\delta|\Omega_{t_i}} \in H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^- \cap \partial\Omega_{t_i})$ pour tout $\varepsilon > 0$. Or D'après [26, Rem2.10] on a pour tout $\varepsilon > 0$ le prolongement par zéro est continu de $H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma)$ dans $H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)$ où γ est une partie de γ_m^- avec

$$\|\cdot\|_{H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)} \leq c\varepsilon^{-1} \|\cdot\|_{H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma)}. \quad (2.3.42)$$

Ce résultat reste valable pour la norme de $H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma)$.

Pour unifier les deux cas $\ell > L_0$ et $\ell \leq L_0$, on va utiliser le fait que la norme $\|\cdot\|_{H^{\frac{1}{2}}(\gamma_m^-)}$ et la norme $\|\cdot\|_{H^{\frac{1}{2}}(\gamma_m^-)}$ sont équivalentes si γ_m^- est loin de l'axe $\{r = 0\}$, avec une constante qui dépend de la valeur absolue de la mesure de γ_m^- . De la même façon si Ω_{t_i} est loin de l'axe $\{r = 0\}$, on a la norme $\|\cdot\|_{H^1(\Omega_{t_i})}$ et la norme $\|\cdot\|_{H^1_1(\Omega_{t_i})}$ sont équivalentes. Dans le cas général on peut considérer que la constante dépend du diamètre de Ω . Puisque $[w_\delta] = w_{\delta|\gamma_m^-} - \Phi|_{\gamma_m^-}$ où $\Phi|_{\gamma_m^-} = \sum_{1 \leq i \leq I} \tilde{w}_{\delta|\gamma_m^-}^i$ et $\tilde{w}_{\delta|\gamma_m^-}^i$ est le prolongement de $w_{\delta|\partial\Omega_{t_i} \cap \gamma_m^-}^i$ sur γ_m^- . On a alors

$$\left| \int_{\gamma_m^-} \frac{\partial u}{\partial n} [w_\delta](\tau) d\tau \right| \leq C \left\| \frac{\partial u}{\partial n} \right\|_{H^{-\frac{1}{2}+\varepsilon}(\gamma_m^-)} (\|w_{\delta|\Omega_{\gamma_m^-}}\|_{H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)} + \|\Phi\|_{H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)}) \quad (2.3.43)$$

En utilisant l'inégalité

$$\|\Phi\|_{H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)} \leq \sum_{1 \leq i \leq I} \|w_{\delta|\Omega_{t_i}}^i\|_{H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)},$$

et (2.3.42) on a :

$$\begin{aligned}
 \left| \int_{\gamma_m^-} \frac{\partial u}{\partial n} [w_\delta] (\tau) d\tau \right| &\leq C \left\| \frac{\partial u}{\partial n} - \psi^+ \right\|_{H_1^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)} \\
 &\quad \left(\left\| w_{\delta|\Omega_{\gamma_m^-}} \right\|_{H_1^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)} + c\varepsilon^{-1} \sum_{1 \leq i \leq I} \left\| w_{\delta|\Omega_{\tau_i}} \right\|_{H_1^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_{\tau_i})} \right) \\
 &\leq C(1 + c\varepsilon^{-1}) \left\| \frac{\partial u}{\partial n} - \psi^+ \right\|_{H_1^{-\frac{1}{2}+\varepsilon}(\gamma_m^-)} \\
 &\quad \left(\left\| w_{\delta|\Omega_{\gamma_m^-}} \right\|_{H_1^1(\Omega_m)} + \sum_{1 \leq i \leq I} \left\| w_{\delta|\Omega_{\tau_i}} \right\|_{H_1^1(\Omega_{\tau_i})} \right)
 \end{aligned}$$

où $\psi^+ = \pi_{N_m-2}^+ \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)$. D'autre part on a en posant $\varepsilon = 1/\log N_m$

$$\begin{aligned}
 \left\| \frac{\partial u}{\partial n} - \psi^+ \right\|_{H_1^{-\frac{1}{2}+\varepsilon}(\gamma_m^-)} &\leq cN_m^{(\varepsilon-\frac{1}{2})-(s_m-\frac{3}{2})} \left\| \frac{\partial u}{\partial n} \right\|_{H_1^{s_m-\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} \\
 &\leq ceN_m^{1-s_m} \left\| \frac{\partial u}{\partial n} \right\|_{H_1^{s_m-\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} \\
 &\leq ceN_m^{1-s_m} \|u\|_{H_1^{s_m}(\Omega_m)}.
 \end{aligned}$$

On en déduit que

$$\left| \int_{\gamma_m^-} \frac{\partial u}{\partial n} [w_\delta] (\tau) d\tau \right| \leq C(1 + c\varepsilon^{-1}) N_m^{1-s_m} \|u\|_{H_1^{s_m}(\Omega_m)} \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}, \quad (2.3.44)$$

et

$$\frac{\left| \int_{\gamma_m^-} \frac{\partial u}{\partial n} [w_\delta] (\tau) d\tau \right|}{\|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}} \leq c' N_m^{-s_m} (\log N_m) \|u\|_{H_1^{s_m+1}(\Omega_m)}.$$

Finalement en sommant sur m on obtient le résultat. ■

Erreur d'intégration sur le second membre Nous sommes maintenant en mesure d'énoncer la proposition suivante.

Théorème 2.3.2 Soit f une fonction, telle que $f_{|\Omega_\ell} \in H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)$, $\sigma_\ell > 1$ ($\sigma_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$) . On suppose que u_δ est solution du problème (2.3.15) et u du problème (2.3.3), qui vérifie en plus $u_{|\Omega_\ell} \in H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)$, avec $s_\ell > \frac{1}{2}$ ($s_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$). Alors on a

$$\begin{aligned}
 \|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} &\leq c \sum_{\ell=1}^L [(1 + \lambda_\ell)^{\frac{1}{2}} N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\varrho_\ell} \|u\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)} \\
 &\quad + N_\ell^{-\sigma_\ell} \|f\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}].
 \end{aligned}$$

où c est une constante positive et ϱ_ℓ est égal à 1 si l'un des côtés de Ω_ℓ est γ_m^- et intersecte au moins deux sous-domaines $\Omega_{\ell'}$, $\ell' \neq \ell$ et 0 sinon.

Preuve Erreur d'intégration

a) On pose $\delta - 1 = (N_1 - 1, N_2 - 1, \dots, N_L - 1)$, on note $x_{\delta-1}$ l'élément qui vérifie $x_{\delta-1}|_{\Omega_\ell} = \Pi_{N_{\ell-1}}^{+,1} u$, $\Pi_{N_{\ell-1}}^{+,1}$ est l'opérateur de projection orthogonale de $H_1^1(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_{N_{\ell-1}}(\Omega_\ell)$. On a

$$\begin{aligned} -a_\delta(v_\delta, w_\delta) + a(v_\delta, w_\delta) &= a(v_\delta - x_{\delta-1}, w_\delta) - a_\delta(v_\delta - x_{\delta-1}, w_\delta) \\ &\leq c \left\{ \sum_{\ell=1}^L \|v_\delta - x_{\delta-1}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \\ &\leq c \left\{ \sum_{\ell=1}^L \left\| u - \Pi_{N_{\ell-1}}^{+,1} u \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right. \\ &\quad \left. + \|u - v_\delta\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}. \end{aligned}$$

Pour la dernière inégalité, on utilise [8, Proposition V.3.3] pour déduire que

$$\left\{ \sum_{\ell=1}^L \left\| u - \Pi_{N_{\ell-1}}^{+,1} u \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}$$

et que

$$\frac{a(v_\delta, w_\delta) - a_\delta(v_\delta, w_\delta)}{\|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}} \leq c \left\{ \|u - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} + \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)} \right\}. \quad (2.3.45)$$

b)

On utilise le fait que $c' \|\cdot\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)} \leq \|\cdot\|_{H^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)} \leq c \|\cdot\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}$ pour $L_0 + 1 \leq \ell \leq L$, (c et c' dépendent seulement de la géométrie de Ω) pour déduire que :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} f w_\delta r dr dz - (\mathcal{I}_\delta f, w_\delta)_\delta &= \int_{\Omega} (f - \Pi_{N_{\ell-1}}^+ f) w_\delta r dr dz \\ &\quad - (\mathcal{I}_\delta f - \Pi_{N_{\ell-1}}^+ f, w_\delta)_\delta \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L (\|f - \Pi_{N_{\ell-1}}^+ f\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \|\mathcal{I}_\delta f - \Pi_{N_{\ell-1}}^+ f\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}) \|w_\delta\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L (\|f - \Pi_{N_{\ell-1}}^+ f\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \|f - \mathcal{I}_\delta f\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}) \|w_\delta\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}. \end{aligned}$$

où $\Pi_{N_{\ell-1}}^+$ est l'opérateur de projection orthogonale de $L_1^2(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_{N_{\ell-1}}(\Omega_\ell)$. On rappelle que $\mathcal{I}_\delta|_{\Omega_\ell} = \mathcal{I}_{N_\ell}^+$, si Ω_ℓ touche l'axe (Or) et $\mathcal{I}_\delta|_{\Omega_\ell} = \mathcal{I}_{N_\ell}$ sinon, on a alors d'après [8, (VI.3.1) et Proposition V.2.1 et VI.3.1] :

$$\begin{aligned} \|f - \Pi_{N_{\ell-1}}^+ f\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} &\leq c N_\ell^{-\sigma_\ell} \|f\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}, \\ \|f - \mathcal{I}_\delta f\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} &\leq c N_\ell^{-\sigma_\ell} \|f\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}. \end{aligned} \quad (2.3.46)$$

D'où

$$\left| \int_{\Omega} f w_{\delta} r dr dz - (\mathcal{I}_{\delta} f, w_{\delta})_{\delta} \right| \leq C \sum_{\ell=1}^L N_{\ell}^{-\sigma_{\ell}} \|f\|_{H_1^{\sigma_{\ell}}(\Omega_{\ell})} \|w_{\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1}. \quad (2.3.47)$$

avec C dépend du diamètre de Ω .

La preuve est obtenue en combinant (2.3.45), (2.3.47) et les propositions 2.3.3 et 2.3.6. ■

Remarque 2.3.6 Dans l'inégalité (2.3.17), on peut considérer $v_{\delta} \in X_{\delta}^{\circ} \cap \mathbb{P}_{\delta-1}$, alors le terme $a(v_{\delta}, w_{\delta}) - a_{\delta}(v_{\delta}, w_{\delta}) = 0$ et il reste à estimer $\inf_{v_{\delta} \in X_{\delta}^{\circ} \cap \mathbb{P}_{\delta-1}} \|u - v_{\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1}$.

2.3.4 Estimations d'erreur : (cas des fonctions singulières)

Avant d'énoncer un théorème important sur les estimations d'erreur des singularités, on commence par donner un résultat qui a été démontré dans le cas conforme [16, Théorème 4.36]. On va ici étendre le résultat dans le cas non conforme.

Proposition 2.3.7 Soit $S_{e_i}^{(0)}$ appartenant à $\mathcal{L}_e^{(0)\lambda, q}$ défini dans (1.6.26) et $q > 0$ fixé. Alors pour tout $Re(\lambda) > 0$, on a

$$\inf_{z_{\delta} \in X_{\delta}^{\circ}} \|S_{e_i}^{(0)} - z_{\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \leq c N_{e_i}^{-2\lambda} (\log N_{e_i})^{q+\frac{1}{2}} \quad (2.3.48)$$

où

$$N_{e_i} = \min\{N_{\ell}, \Omega_{\ell} \cap \text{supp}(S_{e_i}^{(0)}) \neq \emptyset, 1 \leq \ell \leq L\}. \quad (2.3.49)$$

Preuve On va supposer que le support de $S_{e_i}^{(0)}$ est assez petit, de sorte que sa valeur soit nulle sur les côtés ne contenant pas e_j . On divise le problème en trois étapes :

Etape 1 : Construction de u_{δ}^1

On approche $S_{e_i}^{(0)}$, sur chaque domaine Ω_{ℓ} par un polynôme qui s'annule sur les sommets e_i de Ω_{ℓ} extérieurs à l'axe $\{r = 0\}$.

On considère pour cela la fonction u_{δ}^1 telle que $u_{\delta}^1 = u_{\delta}^1|_{\Omega_{\ell}}$ vérifie :

$$u_{\delta}^1(r, z) = \Pi_{N_{\ell}}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}(r, z) - \sum_j \Pi_{N_{\ell}}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}(e_j) \eta^j(r, z),$$

où η^j est un polynôme dans $\mathbb{P}_1(\Omega_{\ell})$, qui est égal à 1 en e_i et 0 sur les autres côtés dans

Ω_{ℓ} qui ne contiennent pas e_i . Puisque e_i n'est pas sur l'axe $\{r = 0\}$. Evidemment, $u_{\delta}^1(r, z)$ s'annule sur tout les coins e en dehors de Ω_{ℓ} .

On utilise l'inégalité de *Gagliardo – Nirenberg* :

$$\forall v \in H_1^2(\Omega_{\ell}), |v(e_i)| \leq \|v\|_{L_1^2(\Omega_{\ell})}^{\frac{1}{2}} \|v\|_{H_2^2(\Omega_{\ell})}^{\frac{1}{2}}.$$

et puisque $S_{e_i}^{(0)}$ s'annule sur les e_i on a

$$\begin{aligned} \|S_{e_i}^{(0)} - u_\ell^1\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} &\leq \|S_{e_i}^{(0)} - \Pi_{N_\ell}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \|S_{e_i}^{(0)} - \Pi_{N_\ell}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}^{\frac{1}{2}} \|S_{e_i}^{(0)} - \Pi_{N_\ell}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}\|_{H_1^2(\Omega_\ell)}^{\frac{1}{2}}, \end{aligned}$$

on utilise la remarque 1.6.1, la proposition 1.6.3 et la proposition 1.6.4, on obtient

$$\begin{aligned} \|S_{e_i}^{(0)} - \Pi_{N_\ell}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} &\leq cN_\ell^{2-s} \|S_{e_i}^{(0)}\|_{H_{\varepsilon,+}^s(\Omega)} \\ &\leq cN_\ell^{2-s} \varepsilon^{-q-\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

Puisque $s = 2\lambda + 2 - \varepsilon$ et $N_\ell^\varepsilon = e$ on a

$$\begin{aligned} \|S_{e_i}^{(0)} - \Pi_{N_\ell}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} &\leq cN_\ell^{-2\lambda+\varepsilon} \varepsilon^{-q-\frac{1}{2}} \\ &\leq N_\ell^{-2\lambda} (\log N_\ell)^{q+\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

De la même façon on a

$$\|S_{e_i}^{(0)} - \Pi_{N_\ell}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}^{\frac{1}{2}} \leq cN_\ell^{-\frac{\sigma}{2}} \|S_{e_i}^{(0)}\|_{H_{\varepsilon,+}^{\frac{\sigma}{2}}(\Omega)},$$

et

$$\|S_{e_i}^{(0)} - \Pi_{N_\ell}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}\|_{H_1^2(\Omega_\ell)}^{\frac{1}{2}} \leq cN_\ell^{2-\frac{\sigma}{2}} \|S_{e_i}^{(0)}\|_{H_{\varepsilon,+}^{\frac{\sigma}{2}}(\Omega)}.$$

D'où on déduit que

$$\begin{aligned} \|S_{e_i}^{(0)} - \Pi_{N_\ell}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}^{\frac{1}{2}} \|S_{e_i}^{(0)} - \Pi_{N_\ell}^{+\ell} S_{e_i}^{(0)}\|_{H_1^2(\Omega_\ell)}^{\frac{1}{2}} &\leq cN_\ell^{2-s} \|S_{e_i}^{(0)}\|_{H_{\varepsilon,+}^s(\Omega)} \\ &\leq N_\ell^{-2\lambda} (\log N_\ell)^{q+\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

Etape 2 : Construction de u_δ^2

La fonction u_δ^1 construite dans l'étape 1 n'appartient pas à X_δ° , on construit u_δ^2 par relèvement et projection de u_δ^1 comme suit :

$$u_\delta^2 = \sum_{m=1}^{M^-} \tilde{\mathcal{R}}_*^{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{\gamma_m^-} (u_{\delta|\gamma_m^+}^1 - u_{\delta|\gamma_m^-}^1)|_{\gamma_m^-}, \quad (2.3.50)$$

où $\{\gamma_m^- \mid 1 \leq m \leq M^-\}$ est l'ensemble des non joints. Ici on utilise les mêmes notations de $\tilde{\mathcal{R}}^\gamma$ et $\tilde{\pi}^\gamma$ que dans la proposition 2.3.5. On a

$$\|u_\delta^2\|_{H_1^1(\Omega_m^-)} \leq \sum_{m=1}^{M^-} \left\| \tilde{\mathcal{R}}_*^{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{\gamma_m^-} (u_{\delta|\gamma_m^+}^1 - u_{\delta|\gamma_m^-}^1)|_{\gamma_m^-} \right\|_{H_1^1(\Omega_m^-)}. \quad (2.3.51)$$

u_δ^1 est nul sur tous les e_i en dehors de $\{r = 0\}$, en plus u_δ^1 dépend du support de $S_{e_i}^{(0)}$ qui est pris assez petit. On note alors \mathcal{J}_m^- l'ensemble des indices i , $1 \leq \mu \leq M^+$, tel que $\gamma_m^- \cap \gamma_\mu^+ \cap \text{support}\{S_{e_i}^{(0)}\}$ a une mesure non nulle. On écrit alors

$$\gamma_m^- = \sum_{\mu \in \mathcal{J}_m^-} \gamma_m^- \cap \gamma_\mu^+ \cap \text{support}\{S_{e_i}^{(0)}\},$$

On en déduit :

$$\begin{aligned} \left\| \tilde{\mathcal{R}}_*^{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{\gamma_m^-} (u_{\delta|\gamma_m^+}^1 - u_{\delta|\gamma_m^-}^1) \Big|_{\gamma_m^-} \right\|_{H_1^1(\Omega_m^-)} &\leq \left\| (u_{\delta|\gamma_m^+}^1 - S_{\varepsilon_i}^{(0)}) \Big|_{H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma_m^-)} \right\| \\ &+ \sum_{\mu \in \mathcal{J}_m^-} \left\| (u_{N_\mu^+}^1 - S_{\varepsilon_i}^{(0)}) \Big|_{H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma_\mu^+)} \right\|. \end{aligned}$$

En effet $u_{\delta|\gamma_m^-}^1$ s'annule sur tous les coins de γ_m^- donc $u_{\delta|\gamma_m^-}^1$ est dans $H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma_m^-)$ et on peut écrire $u_{\delta|\gamma_m^-}^1 = \sum_{\mu \in \mathcal{J}_m^-} \tilde{u}_{N_\mu^+}^1$ où $\tilde{u}_{N_\mu^+}^1$ est le prolongement continu de $u_{N_\mu^+|\gamma_\mu^+}^1$ par 0 et on a la continuité de de l'opérateur $H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma_\mu^+)$ dans $H_1^{\frac{1}{2}}(\gamma_m^-)$. D'où :

$$\begin{aligned} \left\| \tilde{\mathcal{R}}_*^{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{\gamma_m^-} (u_{\delta|\gamma_m^+}^1 - u_{\delta|\gamma_m^-}^1) \Big|_{\gamma_m^-} \right\|_{H_1^1(\Omega_m^-)} &\leq c[(N_m^-)^{-2\lambda}(\log N_m^-)^{q+\frac{1}{2}} \\ &+ \sum_{\mu \in \mathcal{J}_m^-} (N_\mu^+)^{-2\lambda}(\log N_\mu^+)^{q+\frac{1}{2}}]. \end{aligned}$$

Finalement on somme sur m avec $1 \leq m \leq M^-$.

Etape 3 : Construction de z_δ

On pose

$$\tilde{z}_\delta = u_\delta^1 + u_\delta^2. \quad (2.3.52)$$

On voit que \tilde{z}_δ vérifie la condition des joints mais \tilde{z}_δ^ℓ n'est pas nul sur le bord Γ . Pour remédier à ce problème on prend

$$z_\delta = \tilde{z}_\delta - \sum_{\gamma \subset \Gamma \cap \Omega_\ell, \ell \leq L_0} \tilde{\mathcal{R}}_+^\gamma(\tilde{z}_\delta|\gamma) - \sum_{\gamma \subset \Gamma \cap \Omega_\ell, \ell > L_0} \tilde{\mathcal{R}}^\gamma(\tilde{z}_\delta|\gamma).$$

Comme $S_{\varepsilon_i}^{(0)}|_\Gamma = 0$ on a :

$$S_{\varepsilon_i}^{(0)} = S_{\varepsilon_i}^{(0)} - \sum_{\gamma \subset \Gamma \cap \Omega_\ell, \ell \leq L_0} \tilde{\mathcal{R}}_+^\gamma(S_{\varepsilon_i}^{(0)}|\gamma) - \sum_{\gamma \subset \Gamma \cap \Omega_\ell, \ell > L_0} \tilde{\mathcal{R}}^\gamma(S_{\varepsilon_i}^{(0)}|\gamma).$$

Enfin $S_{\varepsilon_i}^{(0)} - z_\delta$ vérifie l'inégalité (2.3.48). ■

Remarque 2.3.7 On a supposé dans notre preuve que la décomposition est quelconque au voisinage du point singulier. On peut aussi supposer que la décomposition est conforme au voisinage de ce coin.

Maintenant on va utiliser ce dernier résultat, pour énoncer un théorème sur l'erreur entre la solution continue et la solution discrète.

Théorème 2.3.3 On suppose que $f \in H_+^{s-1}(\Omega)$ avec $s > \frac{s}{2}$, alors il existe une constante positive c telle que, la solution $u \in H_1^1(\Omega)$ du problème (2.3.3) et la solution u_δ du problème discret vérifient :

$$\|u - u_\delta\|_{\chi_1^1} \leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, E_\delta\} \|f\|_{H_1^{s-1}(\Omega)} \quad (2.3.53)$$

où

$$N_\delta = \min \{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\} \text{ et } E_\delta = \max \{E_\ell, 1 \leq \ell \leq L\} \quad (2.3.54)$$

et

$$E_\ell = \begin{cases} 0 & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ ne contient pas des } e_i, \\ N_{e_i}^{-4} (\log N_{e_i})^{\frac{3}{2}} & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ contient } e_i \text{ avec } \omega_{e_i} = \frac{\pi}{2}, \\ N_{e_i}^{-\frac{4}{3}} (\log N_{e_i})^{\frac{3}{2}} & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ contient } e_i \text{ avec } \omega_{e_i} = \frac{3\pi}{2}. \end{cases} \quad (2.3.55)$$

N_{e_i} est défini dans la proposition 2.3.7.

Preuve On a

$$\begin{aligned} \inf_{v_\delta \in X_\delta^0} \|u - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} &\leq c \left(\inf_{w_\delta \in X_\delta^0} \|u_{reg} - w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \right. \\ &\quad + \inf_{z_\delta \in X_\delta^0} \left| \gamma_e^{(0)} \right| \|S_e^{(0)} - z_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \\ &\quad \left. + \sum_{\ell \geq 2} \inf_{z_\delta \in X_\delta^0} \left| \gamma_e^{(0)\ell} \right| \|S_e^{(0)\ell} - z_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \right). \end{aligned} \quad (2.3.56)$$

En effet on pose

$$u = u_{reg} + \gamma_e^{(0)} S_e^{(0)} + \sum_{\ell=2} \gamma_e^{(0)\ell} S_e^{(0)\ell} \text{ et } v_\delta = w_\delta + \gamma_e^{(0)} z_\delta + \sum_{\ell=2} \gamma_e^{(0)\ell} z_\delta^\ell.$$

On utilise la définition

$$S_e^{(0)} = \chi_c(r_e^\lambda) r_e^\lambda (\log r_e)^q \varphi(\theta_e) \text{ avec } \lambda = \frac{\ell\pi}{\omega_j} + p, \quad p \geq 0 \text{ et } q \geq 0.$$

et l'inégalité (2.3.7) avec $\lambda = \frac{\ell\pi}{\omega_j}$, et $\ell = 1$. Pour le cas $\omega_j = \frac{\pi}{2}$, $q = 0$, on obtient

$$\begin{aligned} \|S_e^{(0)} - z_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} &\leq N_{e_i}^{-4} (\log N_{e_i})^{\frac{3}{2}}. \text{ Et pour le deuxième cas } \omega_j = \frac{3\pi}{2}, \quad q = 0, \text{ on obtient} \\ \|S_e^{(0)} - z_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} &\leq N_{e_i}^{-\frac{4}{3}} (\log N_{e_i})^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

D'autre part d'après (1.6.22), on a $|\gamma_e^{(0)}| \leq c \|f\|_{H_1^{s-1}(\Omega)}$ pour $s > 2$, d'où le résultat. ■

Remarque 2.3.8 Sous les mêmes hypothèses de la proposition précédente, on peut écrire une estimation où apparaissent des quantités locales.

$$\begin{aligned} \|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} &\leq c \sum_{\ell=1}^L [(1 + \lambda_\ell)^{\frac{1}{2}} N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{p_\ell} \|u\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \sup(N_\ell^{-\sigma_\ell}, E_\ell) \|f|_{\Omega_\ell}\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}]. \end{aligned} \quad (2.3.57)$$

Théorème 2.3.4 On suppose que $f \in H_+^{s-1}(\Omega)$ avec $s > \frac{5}{2}$, alors il existe une constante positive c telle que, la solution $u \in H_1^1(\Omega)$ du problème (2.3.3) et la solution u_δ du problème discret vérifient :

$$\|u - u_\delta\|_{L_1^1(\Omega)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1} \log(N_\delta)^q E_\delta\} \|f\|_{H_1^{s-1}(\Omega)}, \quad (2.3.58)$$

où q est nul si la décomposition est conforme et 1 sinon et E_δ est défini dans (2.3.54).

Preuve On a $\|u - u_\delta\|_{L^2_1(\Omega)} = \left(\sum_{\ell=1}^L \|u - u_\delta\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2\right)^{\frac{1}{2}}$. La majoration de $\|u - u_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}$ s'obtient grâce à la méthode de dualité d'Aubin-Nitsche, qui consiste à remarquer que

$$\|u - u_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}^2 = \sup_{g \in L^2_1(\Omega)} \frac{\int_\Omega (u - u_\delta)(r, z) g(r, z) r dr dz}{\|g\|_{L^2_1(\Omega)}}.$$

Pour toute fonction g dans $L^2_1(\Omega)$ tel que $g_{|\Omega_\ell} = g_\ell$ pour chaque ℓ , $1 \leq \ell \leq L$ et on note χ_ℓ , la solution dans $H^1_\circ(\Omega_\ell)$ du problème

$$\begin{cases} -\Delta \chi_\ell = g_\ell & \text{dans } \Omega_\ell \\ \chi_\ell = 0 & \begin{cases} \text{sur } \partial\Omega_\ell \text{ si } \ell \geq L_0 \\ \text{sur } \Gamma_\ell \text{ si } \ell \leq L_0 \end{cases} \end{cases} \quad (2.3.59)$$

et on a

$$\int_\Omega (u - u_\delta) g r dr dz = -\sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \Delta \chi_\ell (u - u_\delta) d\tau.$$

Soit χ l'élément vérifiant $\chi_{|\Omega_\ell} = \chi_\ell$, on remarque que $\chi \in H^1_\circ(\Omega)$

$$\int_\Omega (u - u_\delta) g r dr dz = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla \chi_\ell \nabla (u - u_\delta) d\tau - \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi}{\partial n_m}\right) [u - u_\delta] d\tau.$$

1) On remarque que $\sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi}{\partial n_m}\right) [u - u_\delta] d\tau = \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi}{\partial n_m}\right) [u_\delta] d\tau$. On reprend la preuve de la proposition 2.3.6. La régularité de u nous permet de conclure comme dans (2.3.43) que

$$\begin{aligned} \left| \int_{\gamma_m^-} \frac{\partial \chi}{\partial n_m} [u - u_\delta](\tau) d\tau \right| &\leq C \left\| \frac{\partial \chi}{\partial n_m} - \psi^+ \right\|_{H^{-\frac{1}{2}+\varepsilon}(\gamma_m^-)} \left(\|u_\delta|_{\Omega_{\gamma_m^-}} - u|_{\Omega_{\gamma_m^-}} \|_{H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)} \right) \\ &\quad + \left\| \Phi - u|_{\Omega_{\gamma_m^-}} \right\|_{H^{\frac{1}{2}-\varepsilon}(\gamma_m^-)} \end{aligned} \quad (2.3.60)$$

On procède comme dans la preuve de la proposition 2.3.6 pour déduire que

$$\begin{aligned} \left| \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \frac{\partial \chi}{\partial n_m} [u - u_\delta](\tau) d\tau \right| &\leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-1} (\log N_\ell)^{\rho_\ell} \|\chi_\ell\|_{H^2_1(\Omega_\ell)} \|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}^1_1} \\ &\leq c N_\delta^{-1} (\log N_\delta) \|g\|_{L^2_1(\Omega)} \|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}^1_1} \end{aligned} \quad (2.3.61)$$

En effet puisque Ω_ℓ est convexe, alors $\chi_\ell \in H^2_1(\Omega_\ell)$ et on a $\|\chi_\ell\|_{H^2_1(\Omega_\ell)} \leq c \|g_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}$.

On remarque que si la décomposition est conforme on a

$$\left| \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \frac{\partial \chi}{\partial n_m} [u - u_\delta](\tau) d\tau \right| \leq c N_\delta^{-1} \|g\|_{L^2_1(\Omega)} \|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}^1_1}.$$

2) Pour majorer le terme $a(\chi, u - u_\delta) = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla \chi_\ell \nabla (u - u_\delta) d\tau$, on choisit $\chi_{\delta-1}$ tel que pour chaque ℓ , $1 \leq \ell \leq L$

$$\chi_{\delta-1|\Omega_\ell} = \begin{cases} \bar{\Pi}_{N_\ell-1}^{+,1,\circ} \chi_\ell & \text{si } 1 \leq \ell \leq L_0 \\ \bar{\Pi}_{N_\ell-1}^{-,1,\circ} \chi_\ell & \text{si } L_0 \leq \ell \leq L \end{cases} \quad (2.3.62)$$

où $\bar{\Pi}_{N_\ell-1}^{+,1,\circ}$ l'opérateur de projection orthogonale de $H_{1^\circ}^1(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_{N_\ell-1}^\circ(\Omega_\ell)$, et $\bar{\Pi}_{N_\ell-1}^{-,1,\circ}$ l'opérateur de projection orthogonale de $V_{1^\circ}^1(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_{N_\ell-1}^0(\Omega_\ell)$ déduits de $\Pi_{N_\ell-1}^{+,1,\circ}$ resp $\Pi_{N_\ell-1}^{-,1,\circ}$ défini dans [8, Chapitre V]

On remarque que $\chi_{\delta-1} \in H_{1^\circ}^1(\Omega)$, ceci implique que

$$a(\chi_{\delta-1}, u - u_\delta) = \int_{\Omega} f \chi_{\delta-1} d\tau - (\mathcal{I}_\delta f, \chi_{\delta-1})_\delta$$

et que

$$a(\chi, u - u_\delta) = a(\chi - \chi_{\delta-1}, u - u_\delta) + \int_{\Omega} f \chi_{\delta-1} d\tau - (\mathcal{I}_\delta f, \chi_{\delta-1})_\delta.$$

On sait d'après 2) de la preuve de la proposition (2.3.2) que si $f \in H_+^{s-1}(\Omega)$ alors on a :

$$\begin{aligned} \left| \int_{\Omega} f \chi_{\delta-1} d\tau - (\mathcal{I}_\delta f, \chi_{\delta-1})_\delta \right| &\leq c N_\delta^{1-s} \|f\|_{H_+^{s-1}(\Omega)} \|\chi_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_1^1} \\ &\leq c N_\delta^{1-s} \|f\|_{H_+^{s-1}(\Omega)} (\|\chi - \chi_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|\chi\|_{\mathcal{X}_1^1}) \\ &\leq c N_\delta^{1-s} \|f\|_{H_+^{s-1}(\Omega)} \|g\|_{L_1^2(\Omega)} \end{aligned} \quad (2.3.63)$$

puisque

$$\begin{aligned} \|\chi - \chi_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_1^1} &\leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-1} \|\chi_\ell\|_{H_1^2(\Omega_\ell)} \\ &\leq c N_\delta^{-1} \|g\|_{L_1^2(\Omega)}. \end{aligned}$$

[8, Proposition V.3.2 et V.3.6]. Ceci implique aussi que

$$\begin{aligned} a(\chi - \chi_{\delta-1}, u - u_\delta) &\leq c \|\chi - \chi_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_1^1} \|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \\ &\leq c N_\delta^{-1} \|g\|_{L_1^2(\Omega)} \|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}. \end{aligned} \quad (2.3.64)$$

Pour majorer $\|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}$, on utilise l'estimation (2.3.57). En combinant (2.3.57), (2.3.63), (2.3.61) et (2.3.64), on déduit l'estimation (2.3.58). ■

Remarque 2.3.9 Dans la preuve précédente, on est obligé de poser le problème (2.3.59), sur chaque sous-domaine avec nullité sur le bord, pour pouvoir assurer la condition de compatibilité. La difficulté vient du fait que l'espace discret n'est pas inclus dans l'espace continue et donc si on pose χ tel que

$$\begin{aligned} -\Delta \chi &= g \text{ dans } \Omega \\ \chi &= 0 \text{ sur } \Gamma \end{aligned}$$

alors pour un choix de $\chi_{\delta-1}$ le même que celui dans (2.3.62), on aura $a(\chi_{\delta-1}, u) \neq \int f \chi_{\delta-1}$, ce qui bloque la suite de la démonstration.

2.4 Le problème de Laplace : Cas général ($k \neq 0$)

2.4.1 Problème continu

On considère le problème de Laplace (1.6.9) dans un domaine tridimensionnel $\tilde{\Omega}$. On ne suppose plus dans cette section que \tilde{f} et \tilde{g} sont invariantes par rotation et on développe la solution \tilde{u} et les données initiales en séries de Fourier si bien que l'on se ramène à la résolution pour tout k d'un problème du type :

$$\begin{cases} -\partial_r^2 u^k - \frac{1}{r} \partial_r u^k - \partial_z^2 u^k + \frac{k^2}{r^2} u^k = f^k & \text{dans } \Omega, \\ u^k = 0 & \text{sur } \Gamma. \end{cases} \quad (2.4.1)$$

où Ω est décomposé en polygônes comme dans la figure (1.3).

On définit les espaces $\mathcal{X}_{1*}^1(\Omega)$, $\mathcal{X}_{1\circ}^1(\Omega)$ et $\mathcal{V}_{1\circ}^1(\Omega)$

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_{1*}^1(\Omega) &= \{v = (v_1, \dots, v_\ell) \in \prod_{\ell=1}^L H_1^1(\Omega_\ell) \cap L_{-1}^2(\Omega_\ell)\} \\ \mathcal{X}_{1\circ}^1(\Omega) &= \{v \in \mathcal{X}_{1*}^1(\Omega), v = 0 \text{ sur } \Gamma\}. \end{aligned} \quad (2.4.2)$$

et

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_{1\circ}^1(\Omega) &= \{v = (v_1, \dots, v_\ell) \in \prod_{\ell=1}^L H_1^1(\Omega_\ell) \cap L_{-1}^2(\Omega) \\ &v_\ell = 0 \text{ sur } \Gamma \text{ et } v_m = v_\ell \text{ sur } \gamma^{m\ell}, 1 \leq m < \ell \leq L\}. \end{aligned}$$

On remarque que $\mathcal{V}_{1\circ}^1(\Omega)$ est isomorphe à $V_{1\circ}^1(\Omega) = H_{1\circ}^1(\Omega) \cap L_{-1}^2(\Omega)$.
On munit $\mathcal{X}_{1*}^1(\Omega)$ de la norme $\|\cdot\|_{\mathcal{X}_{1*}^1}$ définie par :

$$\|v\|_{\mathcal{X}_{1*}^1} = \left(\sum_{\ell=1}^L \|v_\ell\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4.3)$$

où

$$\|v_\ell\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)}^2 = (\|v_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 + |k|^2 \|v_\ell\|_{L_{-1}^2(\Omega_\ell)}^2).$$

On pose

$$a_k(u^k, v) = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla(u_\ell^k)(r, z) \nabla(\tilde{v}_\ell)(r, z) r dr dz + k^2 \left(\frac{u^k}{r}, \frac{v}{r} \right) \quad (2.4.4)$$

où

$$(u^k, v) = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} (u_\ell^k \tilde{v}_\ell)(r, z) r dr dz.$$

La formulation variationnelle du problème (2.4.1) est pour $k \neq 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trouver } u^k \in \mathcal{V}_{1_0}^1(\Omega), \\ \text{vérifiant, } \forall v \in \mathcal{V}_{1_0}^1(\Omega), \\ a_k(u^k, v) = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} f^k \bar{v}_\ell r dr dz. \end{array} \right. \quad (2.4.5)$$

Proposition 2.4.1 *Le problème (2.4.5) admet une solution unique u^k . Cette solution vérifie :*

$$\|u^k\|_{\mathcal{X}_2^1} \leq c \|f^k\|_{L_1^2(\Omega)}.$$

Preuve On a

$$a_k(u, v) = \sum_{\ell=1}^L \left(\int_{\Omega_\ell} \nabla(u_\ell)(r, z) \nabla(\bar{v}_\ell)(r, z) r dr dz + k^2 \int_{\Omega_\ell} (u_\ell \bar{v}_\ell)(r, z) r^{-1} dr dz \right)$$

Par l'inégalité de Cauchy-Schwarz on a

$$\begin{aligned} a_k(u, v) &\leq \sum_{\ell=1}^L (\|u_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \|v_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} + k^2 \|u_\ell\|_{L_{-1}^2(\Omega_\ell)} \|v_\ell\|_{L_{-1}^2(\Omega_\ell)}) \\ &\leq \sum_{\ell=1}^L (\|u_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} + k \|u_\ell\|_{L_{-1}^2(\Omega_\ell)}) (\|v_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} + k \|v_\ell\|_{L_{-1}^2(\Omega_\ell)}) \\ &\leq \left[\sum_{\ell=1}^L (\|u_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} + k \|u_\ell\|_{L_{-1}^2(\Omega_\ell)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{\ell=1}^L (\|v_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} + k \|v_\ell\|_{L_{-1}^2(\Omega_\ell)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

et

$$a_k(u, v) \leq 2 \|u\|_{\mathcal{X}_2^1} \|v\|_{\mathcal{X}_2^1}.$$

On en déduit que a_k est continue sur $\mathcal{V}_{1_0}^1(\Omega)^2$. La coercivité de a_k découle du fait que l'on a :

$$a_k(u, u) = \|u\|_{\mathcal{X}_2^1}^2.$$

En plus on a :

$$\begin{aligned} \|u\|_{\mathcal{X}_2^1}^2 &= a_k(u, u) \\ &= \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \left(f_{|\Omega_\ell}^k \bar{u}_\ell \right) (r, z) r dr dz. \\ &\leq c \|u\|_{\mathcal{X}_1^2} \|f^k\|_{L_1^2(\Omega)}. \end{aligned}$$

d'où le résultat. ■

2.4.2 Problème discret

Pour définir le problème discret, on rappelle l'espace introduit dans (2.3.9)

$X_\delta^\circ = \{v_\delta \in L^2_1(\Omega) / v_\ell = v_{\delta|\Omega_\ell} \in P_{N_\ell}(\Omega_\ell), 1 \leq \ell \leq L \text{ et } v_\delta = 0 \text{ sur } \Gamma \text{ et il existe une fonction joint } \phi \text{ définie par } \phi|_{\Gamma^{\ell,j}} = u_\ell|_{\Gamma^{\ell,j}} \text{ si } (\ell, j) = (\ell(m), j(m)) \text{ et } \int_{\Gamma^{\ell,j}} (u_\ell - \phi)(\tau) \psi(\tau) d\tau = 0, \forall \psi \in \mathbb{P}_{N_\ell-2}(\Gamma^{\ell,j}) \text{ sinon}\}$.

Et on définit l'espace X_δ° par :

$$X_\delta^\circ(\Omega) = \{v_\delta \in X_\delta^\circ(\Omega) / v_\ell = v_{\delta|\Omega_\ell} \in L^2_{-1}(\Omega_\ell), 1 \leq \ell \leq L\}.$$

On remarque que

$$X_\delta^\circ(\Omega) = \{v_\delta \in X_\delta^\circ(\Omega), v_\delta = 0 \text{ sur } \Gamma_0\}.$$

La discrétisation du problème (2.4.5) par méthode de Galerkin avec intégration numérique pour $k \neq 0$ est:

$$\begin{cases} \text{Trouver } u_\delta^k \text{ dans } X_\delta^\circ(\Omega) \text{ tel que} \\ \forall v_\delta \in X_\delta^\circ(\Omega), a_{k,\delta}(u_\delta^k, v_\delta) = (\mathcal{I}_\delta f^k, v_\delta)_\delta, \end{cases} \quad (2.4.6)$$

où la forme $a_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$ est définie par :

$$a_{k,\delta}(u_\delta, v_\delta) = a_\delta(u_\delta, v_\delta) + k^2 \left(\frac{u_\delta}{r}, \frac{v_\delta}{r} \right)_\delta.$$

et \mathcal{I}_δ est l'opérateur d'interpolation introduit dans la section 2.3.2 .

Proposition 2.4.2 *Il existe des constantes c et c' indépendantes de k , de la géométrie de Ω et de sa décomposition telles que, pour tout entier fixe $k \neq 0$, la forme $a_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$ satisfait les propriétés de continuité et de coercivité suivantes :*

$$\begin{cases} \forall u_\delta \in X_\delta^\circ(\Omega), \forall v_\delta \in X_\delta^\circ(\Omega) \\ |a_{k,\delta}(u_\delta, v_\delta)| \leq c \|u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^2} \|v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^2} \\ a_{k,\delta}(u_\delta, u_\delta) \geq c' \|u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^2}^2 \end{cases} \quad (2.4.7)$$

Preuve On a d'après (2.3.13)

$$a_\delta(u_\delta, v_\delta) \leq c \sum_{\ell=1}^L |u_\ell|_{H^1_1(\Omega_\ell)} |v_\ell|_{H^1_1(\Omega_\ell)}. \quad (2.4.8)$$

En plus on a $\frac{u_\delta}{r} \in \mathbb{P}_{N_\ell-1}$ si Ω_ℓ intersecte Γ_0 , soit en utilisant l'inégalité de Cauchy-Schwarz, (2.2.5) si $\ell \leq L_0$ et (2.2.6) si $L_0 + 1 \leq \ell \leq L$ on obtient :

$$k^2 \left(\frac{u_\delta}{r}, \frac{v_\delta}{r} \right)_\delta \leq ck^2 \sum_{\ell=1}^L \|u_\ell\|_{L^2_{-1}(\Omega_\ell)} \|v_\ell\|_{L^2_{-1}(\Omega_\ell)}. \quad (2.4.9)$$

D'où on déduit que

$$a_{k,\delta}(u_\delta, v_\delta) \leq c \sum_{\ell=1}^L (|u_\ell|_{H^1_1(\Omega_\ell)} + k \|u_\ell\|_{L^2_{-1}(\Omega_\ell)}) (|v_\ell|_{H^1_1(\Omega_\ell)} + k \|v_\ell\|_{L^2_{-1}(\Omega_\ell)}).$$

En utilisant, une autre fois l'inégalité de Cauchy-Schwarz, on obtient

$$a_{k,\delta}(u_\delta, v_\delta) \leq C \|u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \|v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1},$$

où C est une constante indépendante de k . On a d'autre part

$$a_{k,\delta}(u_\delta, u_\delta) = a_\delta(u_\delta, v_\delta) + k^2 \left(\frac{u_\delta}{r}, \frac{u_\delta}{r} \right)_\delta.$$

En utilisant (2.3.14), (2.3.12), (2.2.5) et (2.2.6), on obtient

$$a_{k,\delta}(u_\delta, u_\delta) \geq c(\|u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}^2 + k^2 \sum_{\ell=1}^L \|u_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2),$$

d'où

$$a_{k,\delta}(u_\delta, u_\delta) \geq c \|u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}^2$$

où c est une constante indépendante de k . ■

Théorème 2.4.1 *Le problème (2.4.6), admet une solution unique u_δ^k dans $X_\delta^0(\Omega)$ qui vérifie :*

$$\|u_\delta^k\|_{\mathcal{X}_1^1} \leq c \|f^k\|_{L^2_1(\Omega)} \quad (2.4.10)$$

Preuve La proposition précédente implique l'existence et l'unicité de la solution. On a ensuite

$$(\mathcal{I}_\delta f^k, u_\delta^k)_\delta \leq \|u_\delta^k\|_{\mathcal{X}_1^1} \|f^k\|_{L^2_1(\Omega)}$$

d'où

$$C \|u_\delta^k\|_{\mathcal{X}_1^1}^2 \leq a_{k,\delta}(u_\delta^k, u_\delta^k) \leq \|u_\delta^k\|_{\mathcal{X}_1^1} \|f^k\|_{L^2_1(\Omega)}.$$

L'inégalité (2.4.10) en découle. ■

2.4.3 Estimations d'erreur

On va maintenant estimer l'erreur entre la solution continue et la solution discrète et montrer que comme dans le cas invariant par rotation, cette erreur est majorée par l'erreur d'approximation, l'erreur de consistance, l'erreur de quadrature et une erreur due à la non conformité sur les interfaces. Et traiter ensuite ces erreurs une à une.

Proposition 2.4.3 *Soit u^k la solution du problème continu (2.4.5) et u_δ^k la solution du problème discret (2.4.6), il existe une constante C telle que l'on ait :*

$$\begin{aligned} \|u^k - u_\delta^k\|_{\mathcal{X}_1^1} &\leq C \left(\inf_{v_\delta \in X_\delta^0} \|u^k - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \right. \\ &\quad \left. + \sup_{w_\delta \in X_\delta^0} \frac{a_k(v_\delta, w_\delta) - a_{k,\delta}(v_\delta, w_\delta)}{\|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}} \right) \\ &\quad + \sup_{w_\delta \in X_\delta^0} \frac{\int_\Omega f^k w_\delta r dr dz - (\mathcal{I}_\delta f^k, w_\delta)_\delta}{\|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}} \\ &\quad + \sup_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \frac{\int_{\gamma_m} \left(\frac{\partial u^k}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau}{\|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}} \end{aligned}$$

Preuve Par ellipticité de $a_{k,\delta}$, il existe $\beta > 0$ tel que pour tout $v_\delta \in \mathcal{X}_{1^0}^1(\Omega)$ on a

$$\beta \|u_\delta^k - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}^2 \leq a_{k,\delta} (u_\delta^k - v_\delta, u_\delta^k - v_\delta)$$

On pose $u_\delta^k - v_\delta = w_\delta$. On a

$$a_{k,\delta} (u_\delta^k - v_\delta, w_\delta) = -a_{k,\delta} (v_\delta, w_\delta) + (\mathcal{I}_\delta f^k, w_\delta)_\delta.$$

Comme on a $-\int_\Omega (\Delta u^k) w_\delta r dr dz - \int_\Omega f^k w_\delta r dr dz = 0$, avec $-\Delta u^k = -\partial_r^2 u^k - \frac{1}{r} \partial_r u^k - \partial_z^2 u^k + \frac{k^2}{r^2} u^k$ on obtient

$$\begin{aligned} -\int_\Omega (\Delta u^k) w_\delta r dr dz &= -\sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \\ &+ \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla u^k \nabla w_\delta r dr dz \\ &+ k^2 \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} u^k w_\delta r^{-1} dr dz, \end{aligned} \quad (2.4.11)$$

en déduit alors que

$$\begin{aligned} -\int_\Omega (\Delta u^k) w_\delta r dr dz &= -\sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \\ &+ a_k (u_\delta^k, w_\delta). \end{aligned} \quad (2.4.12)$$

où $[w_\delta]$ est le saut de w_δ à travers $\gamma^{\ell m}$. On déduit que

$$\begin{aligned} a_{k,\delta} (u_\delta^k - v_\delta, w_\delta) &= -a_{k,\delta} (v_\delta, w_\delta) + (\mathcal{I}_\delta f^k, w_\delta)_\delta \\ &- \int_\Omega (\Delta u^k) w_\delta r dr dz - \int_\Omega f^k w_\delta r dr dz. \end{aligned}$$

On remplace $-\int_\Omega (\Delta u^k) w_\delta r dr dz$ par sa valeur donnée dans (2.4.12) on obtient

$$\begin{aligned} a_{k,\delta} (u_\delta^k - v_\delta, w_\delta) &= -a_{k,\delta} (v_\delta, w_\delta) + a_k (v_\delta, w_\delta) \\ &- \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u^k}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \\ &+ (\mathcal{I}_\delta f^k, w_\delta)_\delta - \int_\Omega f^k w_\delta r dr dz. \end{aligned}$$

Enfin en utilisant

$$\|u^k - u_\delta^k\|_{\mathcal{X}_1^1} \leq \|u^k - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|u_\delta^k - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1},$$

on obtient le résultat. ■

Proposition 2.4.4 : Erreur d'approximation

Soit u^k la solution du problème (2.4.5). On suppose que $u^k|_{\Omega_\ell} \in H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)$ et $s_\ell > \frac{1}{2}$ ($s_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$). Alors on a

$$\inf_{v_\delta \in X_\delta^0} \|u^k - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \leq c\lambda_\delta^{\frac{1}{2}} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}. \quad (2.4.13)$$

où λ_δ est définie dans (2.3.25), pour tout joint γ_μ^+ , $1 \leq \mu \leq M^+$ et non joint γ_m^- , $1 \leq m \leq M^-$ tels que $\gamma_\mu^+ \cap \gamma_m^-$ a une mesure positive.

Pour la preuve, on a besoin du lemme suivant dont la preuve figure dans [8, Chapitre IV.4 et Chapitre V.4].

Lemme 2.4.1 Il existe un opérateur de projection,

$$\tilde{\pi}_N^{(k),1} : V_1^1(\Lambda) \longrightarrow \mathbb{P}_N^1(\Lambda)$$

qui vérifie :

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 (\tilde{\varphi} - \tilde{\pi}_N^{(k),1} \tilde{\varphi}) \psi d\tau &= 0, \quad \forall \psi \in \mathbb{P}_{N-2}(\Lambda). \\ \|\tilde{\varphi} - \tilde{\pi}_N^{(k),1} \tilde{\varphi}\|_{H_{(k)}^1(\Lambda)} &\leq CN^{1-s} \|\tilde{\varphi}\|_{H_{(k)}^s(\Lambda)}. \end{aligned} \quad (2.4.14)$$

En plus on a pour $s \geq 1$:

$$\left\| \varphi - \tilde{\pi}_N^{(k),1,(r)} \circ \tilde{\pi}_N^{1,(z)} \varphi \right\|_{H_{(k)}^1(\Sigma)} \leq cN^{1-s} \|\varphi\|_{H_{(k)}^s(\Sigma)}, \quad \forall \varphi \in H_{(k)}^s(\Sigma) \quad (2.4.15)$$

et si Σ n'intersecte pas l'axe $\{\zeta = -1\}$ on a :

$$\left\| \varphi - \tilde{\pi}_N^{1,(r)} \circ \tilde{\pi}_N^{1,(z)} \varphi \right\|_{H_{(k)}^1(\Sigma)} \leq cN^{1-s} \|\varphi\|_{H_{(k)}^s(\Sigma)}, \quad \forall \varphi \in H_{(k)}^s(\Sigma). \quad (2.4.16)$$

Preuve de la proposition 2.4.4 La preuve se déduit de la preuve de la proposition 2.3.5 et suit les mêmes étapes. On va donner ici les changements à faire pour chaque étape.

Etape 1 : On pose

$$v_\ell^1 = \mathcal{I}_{N_\ell}^{(k)} u^k \text{ sur } \Omega_\ell$$

On a d'après [8, Chapitre VI.3], pour $s_\ell > \frac{1}{2}$

$$\left\| u^k|_{\Omega_\ell} - v_\ell^1 \right\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)} \leq CN_\ell^{-s_\ell} \left\| u^k|_{\Omega_\ell} \right\|_{H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}. \quad (2.4.17)$$

et

$$\left\| u^k|_{\Omega_\ell} - v_\ell^1 \right\|_{H_{(k)}^1(\Gamma)} + N_\ell \left\| u^k|_{\Omega_\ell} - v_\ell^1 \right\|_{L_1^2(\Gamma)} \leq C' N_\ell^{\frac{1}{2}-s_\ell} \left\| u^k|_{\Omega_\ell} \right\|_{H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}, \quad 1 \leq \ell \leq L. \quad (2.4.18)$$

où Γ est un côté de Ω_ℓ .

Etape 2 : On pose

$$v_\delta^2 = \sum_{\mu=1}^{M^+} \sum_{e \in \mathcal{C}_\mu} (u^k - v_{\delta|\Omega_\mu^+}^1)(e) \tilde{\Phi}_{\mu,e}$$

où $\tilde{\Phi}_{\mu,e}$ est défini dans la preuve de la proposition 2.3.5. En utilisant (2.3.29) on a

$$\|\varphi_i^-\|_{L_1^2(\Lambda)}^2 \leq cN^{-1} \text{ et } \|\eta_p\|_{L_1^2(\Lambda)} \leq cN^{-\frac{1}{2}}. \quad (2.4.19)$$

d'où

$$\|(1 - \zeta^2)\varphi_i^-\|_{L^2_1(\Lambda)} \leq c\|\varphi_i^-\|_{L_1^2(\Lambda)} \leq cN^{-\frac{1}{2}}$$

en déduit que

$$\|\eta_p\|_{L^2_1(\Lambda)} \leq cN^{-\frac{1}{2}}. \quad (2.4.20)$$

D'autre part on a $\chi_N = (\frac{1-\eta}{2})^N$ qui vérifie

$$\left\| \left(\frac{1-\eta}{2} \right)^N \right\|_{H_1^1(\Omega)} \leq cN^{s-\frac{1}{2}}. \quad (2.4.21)$$

En combinant (2.4.19), (2.4.20) et (2.4.21), on obtient que

$$|k| \left\| \tilde{\Phi}_{\mu,e} \right\|_{L^2_1(\Omega)} \leq c|k|N^{-1}.$$

En utilisant le fait que $|k|N_\delta^{-1} \leq 1$ et $\left\| \tilde{\Phi}_{\mu,e} \right\|_{H_1^1(\Omega)} \leq c'$, on déduit que

$$\sum_{\ell=1}^L \|v_\delta^2\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \leq c \sum_{\mu=1}^{M^+} (N_\mu^+)^{-s_\mu^+} \|u^k\|_{H_1^{s_\mu^+ + 1}(\Omega_\mu^+)}.$$

De même on a :

$$\|v_\delta^2\|_{H_1^1(\gamma_\mu^+)} \leq c(N_\mu^+)^{\frac{1}{2}-s_\mu^+} \|u^k\|_{H_1^{s_\mu^+ + 1}(\Omega_\mu^+)}, \quad (2.4.22)$$

et

$$\|v_\delta^2\|_{L_1^2(\gamma_m^-)} \leq c(N_\mu^+)^{-\frac{1}{2}-s_\mu^+} \|u^k\|_{H_1^{s_\mu^+ + 1}(\Omega_\mu^+)}.$$

Etape 3 : On note :

$$\tilde{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} = \begin{cases} \tilde{\pi}_{\delta,m}^{(k), 1, (r)} & \text{si } \gamma_m^- \text{ parallèle à (Or)} \\ \tilde{\pi}_{\delta,m}^{(k), 1, (z)} & \text{si } \gamma_m^- \text{ parallèle à (Oz)}. \end{cases}$$

et on pose

$$v_\delta^{12} = v_\delta^1 + v_\delta^2$$

et

$$v_\delta^{3*} = \begin{cases} \bar{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} (v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12})(\tau) \bar{\chi}_{N_m^-}(\sigma) & \text{dans } \bar{\Omega}_m^- \\ 0 & \text{dans } \Omega \setminus \bar{\Omega}_m^-. \end{cases} \quad (2.4.23)$$

On a enfin

$$v_\delta^3 = \sum_{m=1}^{M^-} v_\delta^{3*}.$$

où τ resp σ sont les variables tangentielle resp normale à γ_m^- et $\bar{\chi}_{N_m^-}$ est obtenu de $\chi_{N_m^-}$ par homothétie et translation ($\chi_{N_m^-}(\sigma) = (\frac{1-\sigma}{2})^{N_m^-}$). Pour simplifier on notera $\chi_{N_m^-}$ au lieu de $\bar{\chi}_{N_m^-}$. L'idée de cette construction est inspiré de [8, (V.6.6)], avec quelques changements. On considère seulement le cas où γ_m^- est parallèle à (Or). On pose $v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12} = z^{12}$

$$\begin{aligned} \left\| \bar{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} (z^{12})(\tau) \chi_{N_m^-}(\sigma) \right\|_{H_{(k)}^{1, \gamma_m^-}(\Omega_m)} &\leq c \left(\left\| \bar{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} (z^{12}) \right\|_{H_1^1(\gamma_m^-)} \left\| \chi_{N_m^-} \right\|_{L_1^2(\Lambda_m^-)} \right. \\ &\quad + \left\| \bar{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} (z^{12}) \right\|_{L_2^2(\gamma_m^-)} \left\| \chi_{N_m^-} \right\|_{H_1^1(\Lambda_m^-)} \\ &\quad \left. + |k| \left\| \bar{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} (z^{12}) \right\|_{L_{2-1}^2(\gamma_m^-)} \left\| \chi_{N_m^-} \right\|_{L_1^2(\Lambda_m^-)} \right). \end{aligned} \quad (2.4.24)$$

d'où en déduit que

$$\begin{aligned} \left\| \bar{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} (z^{12})(\tau) \chi_{N_m^-}(\sigma) \right\|_{H_{(k)}^{1, \gamma_m^-}(\Omega_m^-)} &\leq c \left(\left\| \bar{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} (z^{12}) \right\|_{L_2^2(\gamma_m^-)} \left\| \chi_{N_m^-} \right\|_{H_1^1(\Lambda_m^-)} \right. \\ &\quad \left. + \left\| \bar{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} (z^{12}) \right\|_{H_{(k)}^{1, \gamma_m^-}(\gamma_m^-)} \left\| \chi_{N_m^-} \right\|_{L_1^2(\Lambda_m^-)} \right). \end{aligned}$$

(*) D'autre part, on a

$$\begin{aligned} \left\| \bar{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-} (z^{12}) \right\|_{L_2^2(\gamma_m^-)} &\leq \left\| v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12} \right\|_{L_2^2(\gamma_m^-)} \\ &\leq c \left[(N_m^-)^{-\frac{1}{2} - s_m^-} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_m^-+1}(\Omega_m^-)} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{-\frac{1}{2} - s_\mu^+} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_\mu^++1}(\Omega_\mu^+)} \right]. \end{aligned} \quad (2.4.25)$$

En déduit que

$$\begin{aligned} \left\| v_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - v_{\delta|\gamma_m^-}^{12} \right\|_{L_2^2(\gamma_m^-)} \left\| \chi_{N_m^-} \right\|_{H_1^1(\Lambda_m^-)} &\leq c (N_m^-)^{-s_m^-} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_m^-+1}(\Omega_m^-)} \\ &\quad + c_{1\gamma_m^-} \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{-s_\mu^+} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_\mu^++1}(\Omega_\mu^+)} \end{aligned}$$

avec

$$c_{1\gamma_m^-} = (N_m^-)^{\frac{1}{2}} / \min_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}},$$

et $c_{1\gamma_m^-} \leq \lambda_\delta^{\frac{1}{2}}$.
 (2.4.18) D'après (2.4.18) et (2.4.22) on a

$$\begin{aligned} \left\| \tilde{\pi}_\delta^{(k), \gamma_m^-}(z^{12}) \right\|_{H_{(k)}^1(\gamma_m^-)} \left\| \chi_{N_m^-} \right\|_{L^2_1(\Lambda_m^-)} &\leq c \left\| v_\delta^{12}|_{\gamma_m^+} - v_\delta^{12}|_{\gamma_m^-} \right\|_{H_{(k)}^1(\gamma_m^-)} \left\| \chi_{N_m^-} \right\|_{L^2_1(\Lambda_m^-)} \\ &\leq c(N_m^-)^{-s_m^-} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_m^-+1}(\Omega_m^-)} \\ &\quad + c_{2\gamma_m^-} \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{-s_\mu^+} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_\mu^++1}(\Omega_\mu^+)}. \end{aligned}$$

avec

$$c_{2\gamma_m^-} = \max_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}} / (N_m^-)^{\frac{1}{2}}$$

et $c_{2\gamma_m^-} \leq \lambda_\delta^{\frac{1}{2}}$. Et on termine la preuve en sommant sur m .

Le cas où γ_m^- est parallèle à (Oz) se traite de la même façon.

Ainsi la fonction $v_\delta = v_\delta^1 + v_\delta^2 + v_\delta^3$, appartient à l'espace discret X_δ° et vérifie l'inégalité (2.4.13). ■

Remarque 2.4.1 On remarque que l'étape 3 de la preuve a été changé par rapport à la preuve de la proposition 2.3.5, en effet si on avait utilisé le relèvement $\tilde{\mathcal{R}}_\downarrow^\gamma$ défini dans 2.3.37, on aurait alors une estimation du type

$$\inf_{v_\delta \in X_\delta^\circ} \|u^k - v_\delta\|_{\mathcal{X}_\delta^1} \leq c\lambda_\delta^{\frac{1}{2}} |k| \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}.$$

Corollaire 2.4.1 Dans le cas d'une décomposition conforme avec k et N_δ choisis de façon quelconque, on a :

$$\inf_{v_\delta \in X_\delta^\circ} \|u^k - v_\delta\|_{\mathcal{X}_\delta^1} \leq c\lambda_\delta^{\frac{1}{2}} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}. \quad (2.4.26)$$

Preuve Dans la preuve on a pas besoin de l'étape 2, donc la condition $k \leq N_\delta$, ne sera plus nécessaire. En plus on a $c_{1\gamma_m^-} = (N_m^-)^{\frac{1}{2}} / (N_m^+)^{\frac{1}{2}}$ et $c_{2\gamma_m^-} = (N_m^+)^{\frac{1}{2}} / (N_m^-)^{\frac{1}{2}}$. ■

Proposition 2.4.5 :erreur d'interfaces

Soit u^k la solution du problème (2.4.5) et w_δ dans $X_\delta^\circ(\Omega)$, alors on a

$$\left| \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u^k}{\partial n_m} \right) [w_\delta] d\tau \right| \leq c \left[\sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\varrho_\ell} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)} \right] \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_\delta^1}.$$

et ϱ_ℓ est égal à 1 si l'un des côtés de Ω_ℓ est γ_m^- et intersecte au moins deux sous-domaines $\bar{\Omega}_{\ell'}$, $\ell' \neq \ell$ et 0 sinon.

Preuve On utilise la même démarche que dans le cas axisymétrique, on conclut comme dans (2.3.44) que

$$\left| \int_{\gamma_m^-} \frac{\partial u^k}{\partial n} [w_\delta] (\tau) d\tau \right| \leq C(1 + c\varepsilon^{-1}) N_m^{-s_m} \|u^k\|_{H_{(k)}^{\sigma_m+1}(\Omega_m)} \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}, \quad (2.4.27)$$

avec $\varepsilon = 1/\log N_m$, d'où le résultat. ■

Nous sommes maintenant en mesure de donner une estimation de l'erreur locale :

Proposition 2.4.6 *On suppose que avec $s_\ell > \frac{1}{2}$ ($s_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$), et f^k une fonction tel que $f_{|\Omega_\ell}^k \in H_{(k)}^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)$ avec $\sigma_\ell > 2$. Alors il existe une constante positive c indépendante de k telle que :*

$$\begin{aligned} \|u^k - u_\delta^k\|_{\mathcal{X}_1^1} &\leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} \|u^k\|_{H_{(k)}^{\sigma_\ell+1}(\Omega_\ell)} \\ &\quad + c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-\sigma_\ell} \|f^k\|_{H_{(k)}^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}. \end{aligned}$$

où u^k est la solution du problème continu (2.4.5) et u_δ^k la solution du problème discret (2.4.6) et ϱ_ℓ est défini dans la proposition 2.4.5.

Preuve On a

$$a_{k,\delta}(v_\delta, w_\delta) - a_k(v_\delta, w_\delta) \leq c \left\{ \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u^k\|_{H_{(k)}^{\sigma_\ell+1}(\Omega_\ell)} + \|u^k - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \right\}.$$

En effet on utilise l'opérateur de projection orthogonale $\Pi_{N_{\ell-1}}^{(k)}$ de $H_{(k)}^1(\Omega)$ dans $H_{(k)}^1(\Omega) \cap \mathbb{P}_{N_{\ell-1}}(\Omega)$ et [8, Proposition V.4.2]. Suivant la démarche de la preuve de la proposition (2.3.2) on obtient :

$$\begin{aligned} |a_{k,\delta}(v_\delta - x_{\delta-1}, w_\delta) - a_k(v_\delta - x_{\delta-1}, w_\delta)| &\leq c \left\{ \sum_{\ell=1}^L \|v_\delta - x_{\delta-1}\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \\ &\leq c \left\{ \sum_{\ell=1}^L \left\| u^k - \Pi_{N_{\ell-1}}^{(k)} u^k \right\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)}^2 \right. \\ &\quad \left. + \|u^k - v_\delta\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

donc

$$\begin{aligned} |a_{k,\delta}(v_\delta - x_{\delta-1}, w_\delta) - a_k(v_\delta - x_{\delta-1}, w_\delta)| &\leq c \left\{ \|u^k - v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u_\ell^k\|_{H_{(k)}^{\sigma_\ell+1}(\Omega_\ell)} \right\} \|w_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}. \end{aligned} \quad (2.4.28)$$

D'autre part on a

$$\left| \frac{\int_{\Omega} f^k w_{\delta} r d r d z - (\mathcal{I}_{\delta} f^k, w_{\delta})_{\delta}}{\|w_{\delta}\|_{\mathcal{X}_{\delta}^1}} \right| \leq C \sum_{\ell=1}^L N^{-\sigma_{\ell}} \|f^k\|_{H^{\sigma_{\ell}}(\Omega_{\ell})}, \quad (2.4.29)$$

en effet on utilise les mêmes operateurs que dans 2) du théorème 2.3.2.

En combinant (2.4.28), (2.4.29), les propositions 2.4.4 et 2.4.5 on obtient l'estimation d'erreur requise. ■

2.4.4 Estimations d'erreur (Cas avec singularités)

Avant d'énoncer un théorème important sur les estimations d'erreurs des singularités, on commence par donner quelques résultats.

Proposition 2.4.7 Soit $S_{e_i}^{(k)}$ appartenant à $\mathcal{L}_e^{(k)\lambda, q}$ défini dans (1.6.26) et $q > 0$ fixé. Alors pour tout $Re(\lambda) > 0$, on a

$$\inf_{z_{\delta} \in \mathcal{X}_{\delta}^{\circ}} \|\bar{S}_{e_i}^{(k)} - z_{\delta}\|_{\mathcal{X}_{\delta}^1} \leq c |k| N_{e_i}^{-2\lambda} (\log N_{e_i})^{q+1} \quad (2.4.30)$$

avec

$$N_{e_i} = \min\{N_{\ell}, \Omega_{\ell} \cap \text{supp}(S_{e_i}^{(0)}) \neq \emptyset, 1 \leq \ell \leq L\}.$$

Preuve Etape 1 : Construction de $u_{\delta}^{1,k}$

On considère le support de $S_{e_i}^{(k)}$ assez petit, pour que sa valeur soit nulle sur les côtés ne contenant pas e_i . Sur chaque domaine Ω_{ℓ} , on considère $\Pi_{N_{\ell}}^{-\ell} S_{e_i}^{(k)}$. Ensuite on considère la fonction $u_{\delta}^{1,k}$ telle que

$$u_{\delta}^{1,k}|_{\Omega_{\ell}} = u_{\ell}^{1,k}.$$

avec

$$u_{\ell}^{1,k}(r, z) = \Pi_{N_{\ell}}^{-\ell} S_{e_i}^{(k)}(r, z) - \sum_j \Pi_{N_{\ell}}^{-\ell} S_{e_i}^{(k)}(e_j) \eta^j(r, z)$$

où η^j est un polynôme dans $\mathbb{P}_1(\Omega_{\ell})$, qui est égal à 1 en e_j et 0 sur les deux autres côtés

dans Ω_{ℓ} qui ne contiennent pas e_j . Alors $u_{\ell}^{1,k}(r, z)$ est nul sur les e_j de Ω_{ℓ} qui ne sont pas sur l'axe $r = 0$, (evidemment il est nul sur les e en dehors de Ω_{ℓ}). On a d'après [8, Chapitre V.7]

$$\|S_{e_i}^{(k)} - u_{\ell}^{1,k}\|_{H_{(k)}^1(\Omega_{\ell})} \leq c N_{\ell}^{-2\lambda} (\log N_{\ell})^{q+\frac{1}{2}}$$

Etape 2 : Construction de $u_{\delta}^{2,k}$

On utilise les mêmes notations de $\tilde{\mathcal{R}}_{\pm}^{\gamma}$ et $\tilde{\pi}_{N_{\ell}}^{(k), \gamma}$ que dans la proposition 2.4.4, et on répète la même démarche que dans la proposition 2.3.7. On pose comme dans (2.3.50)

$$u_{\delta}^{2,k} = \sum_{m=1}^M \tilde{\mathcal{R}}_{\pm}^{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}_{N_{\ell}}^{(k), \gamma_m^-} (u_{\delta}^{1,k}|_{\gamma_m^+} - u_{\delta}^{1,k}|_{\gamma_m^-})|_{\gamma_m^-},$$

et

$$\|u_\delta^{2,k}\|_{H^1_{(k)}(\Omega_m^-)} \leq \sum_{m=1}^{M^-} \|\tilde{\mathcal{R}}_{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{(k),\gamma_m^-}(u_{\delta|\gamma_m^+}^{1,k} - u_{\delta|\gamma_m^-}^{1,k})|_{\gamma_m^-}\|_{H^1_{(k)}(\Omega_m^-)}. \quad (2.4.31)$$

On a

$$\begin{aligned} \|\tilde{\mathcal{R}}_{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{(k),\gamma_m^-}(u_{\delta|\gamma_m^+}^{1,k} - u_{\delta|\gamma_m^-}^{1,k})|_{\gamma_m^-}\|_{H^1_{(k)}(\Omega_m^-)} &\leq c|k| \left(\|u_{\delta|\gamma_m^+}^{1,k} - S_{e_i}^{(k)}\|_{H^{\frac{1}{2}}(\gamma_m^-)} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\mu \in \mathcal{J}_m^-} \|u_{N_\mu^+}^{1,k} - S_{e_i}^{(k)}\|_{H^{\frac{1}{2}}(\gamma_\mu^+)} \right). \end{aligned} \quad (2.4.32)$$

et

$$\begin{aligned} \|\tilde{\mathcal{R}}_{\gamma_m^-} \circ \tilde{\pi}^{(k),\gamma_m^-}(u_{\delta|\gamma_m^+}^{1,k} - u_{\delta|\gamma_m^-}^{1,k})|_{\gamma_m^-}\|_{H^1_{(k)}(\Omega_m^-)} &\leq c|k| [(N_m^-)^{-2\lambda} (\log N_m^-)^{q+\frac{1}{2}} \\ &\quad + \sum_{\mu \in \mathcal{J}_m^-} (N_\mu^+)^{-2\lambda} (\log N_\mu^+)^{q+\frac{1}{2}}]. \end{aligned}$$

Etape 3 : Construction de z_δ

On pose

$$\tilde{z}_\delta = u_\delta^{1,k} + u_\delta^{2,k}. \quad (2.4.33)$$

et

$$z_\delta = \tilde{z}_\delta - \sum_{\gamma \subset \Gamma \cap \partial\Omega_\ell} \tilde{\mathcal{R}}_\gamma^\perp(\tilde{z}_\delta|_\gamma),$$

et on termine la preuve comme dans la preuve de la proposition 2.3.7. ■

Estimations d'erreur globale

Remarque 2.4.2 1) On suppose dorénavant que

$$K \leq N_\ell \text{ pour } 1 \leq \ell \leq L. \quad (2.4.34)$$

Grâce à la condition (2.4.34), comme le prouve le théorème suivant, on a les mêmes estimations que dans le cas du problème où la solution discrète est prise dans un espace continue $X_\delta \subset V_{1_0}^1(\Omega)$ voir [8, Chapitre VIII].

Théorème 2.4.2 On suppose que $f^k \in H^{s-1}(\Omega)$, avec $s > \frac{5}{2}$, alors il existe une constante positive c telle que, pour toutes fonctions u^k dans $V_{1_0}^1(\Omega)$ solution du problème (2.4.5), et u_δ^k solution du problème discret on a :

$$\|u^k - u_\delta^k\|_{\mathcal{X}_2^1} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, E_\delta\} \|f^k\|_{H^{s-1}(\Omega)}$$

où

$$N_\delta = \min\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\} \text{ et } E_\delta = \max\{E_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$$

et E_ℓ est défini dans (2.3.55).

Preuve La preuve se déduit des preuves des propositions 2.4.3 et (2.3.2) et de la proposition 2.4.7 en utilisant la définition

$$S_e^{(k)} = \chi_e(|k|r_e^\lambda) r_e^\lambda (\log(|k|r_e))^q \varphi(\theta_e) \text{ avec } \lambda = \frac{\ell\pi}{\omega_j} + p \text{ où } p \text{ et } q \geq 0.$$

et l'inégalité (2.4.7) avec $\lambda = \frac{\ell\pi}{\omega_j}$, et $\ell = 1$. Pour le cas $\omega_j = \frac{\pi}{2}$, $q = 0$, on obtient

$$\left\| S_e^{(k)} - z_\delta \right\|_{\chi_\lambda^1} \leq |k| N_{e_i}^{-4} (\log N_{e_i})^{\frac{3}{2}}. \text{ Et pour le deuxième cas } \omega_j = \frac{3\pi}{2}, q = 0, \text{ on obtient}$$

$$\left\| S_e^{(k)} - z_\delta \right\|_{\chi_\lambda^1} \leq |k| N_{e_i}^{-\frac{4}{3}} (\log N_{e_i})^{\frac{1}{2}}.$$

D'autre part d'après (1.6.22), on a $|k| \left| \gamma_e^{(k)} \right| \leq c \|f^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega)}$, pour $s > 2$, d'où le résultat. ■

Remarque 2.4.3 Sous les mêmes hypothèses que pour le théorème précédent, on peut utiliser une estimation en fonction de quantités locales :

$$\begin{aligned} \|u^k - u_\delta^k\|_{\chi_\lambda^1} &\leq c \sum_{\ell=1}^L [(1 + \lambda_\ell)^{\frac{1}{2}} N_\ell^{-s_\ell} \log(N_\ell)^{e_\ell} \|u^k\|_{H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \sup\{N_\ell^{1-s}, E_\ell\} \|f^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega_\ell)}]. \end{aligned} \quad (2.4.35)$$

où ϱ_ℓ est défini dans la proposition 2.4.5.

Théorème 2.4.3 On suppose que $f \in H^{s-1}(\Omega)$ avec $s > \frac{5}{2}$, alors il existe une constante positive c telle que, la solution $u^k \in V_{1\circ}^1(\Omega)$ du problème (2.3.3) et la solution u_δ du problème discret vérifient :

$$\|u^k - u_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1} \log(N_\delta)^{e_\delta} E_\delta\} \|f^k\|_{H_1^{s-1}(\Omega)}, \quad (2.4.36)$$

où ϱ est nul si la décomposition est conforme et vaut 1 sinon et E_δ est défini dans (2.3.54).

Preuve On procède de la même façon que dans la preuve du théorème (2.3.4). On a

$$\|u^k - u_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)} = \sup_{g \in L_1^2(\Omega)} \frac{\int_\Omega (u^k - u_\delta^k) g \, rdrdz}{\|g\|_{L_1^2(\Omega)}}.$$

Pour toute fonction g dans $L_1^2(\Omega)$, on note χ_ℓ^k l'unique solution dans $V_{1\circ}^1(\Omega_\ell)$ du problème

$$\begin{cases} -\Delta \chi_\ell^k = g_\ell & \text{dans } \Omega_\ell, \\ \chi_\ell^k = 0 & \text{sur } \partial\Omega_\ell. \end{cases}$$

Soit χ^k tel que $\chi_{[\varrho_\ell]}^k = \chi_\ell^k$, on a $\chi^k \in V_{1\circ}^1(\Omega)$ et

$$\int_\Omega (u^k - u_\delta^k) g \, rdrdz = a_k(\chi^k, u^k - u_\delta^k) - \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} \left(\frac{\partial \chi^k}{\partial n_m} \right) [u^k - u_\delta^k] d\tau.$$

1) On utilise 1) de la preuve de la proposition 2.3.4 et (2.4.5), pour déduire que

$$\left| \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} \frac{\partial \chi^k}{\partial n_m} [u^k - u_\delta^k](\tau) d\tau \right| \leq N_\delta^{-1} (\log N_\delta) \|g\|_{L^2_1(\Omega)} \|u^k - u_\delta^k\|_{\mathcal{X}^1_2}.$$

Si la décomposition est conforme on a

$$\left| \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} \frac{\partial \chi^k}{\partial n} [u^k - u_\delta^k](\tau) d\tau \right| \leq N_\delta^{-1} \|g\|_{L^2_1(\Omega)} \|u^k - u_\delta^k\|_{\mathcal{X}^1_2}. \quad (2.4.37)$$

2) Pour majorer le terme $a_k(\chi^k, u^k - u_\delta^k)$, on choisit $\chi_{\delta-1}^k$ tel que pour chaque ℓ , $1 \leq \ell \leq L$, on a

$$\chi_{\delta-1}^k|_{\Omega_\ell} = \tilde{\Pi}_{N_\ell-1}^{1,\circ} \chi_\ell$$

et $\tilde{\Pi}_{N_\ell-1}^{1,\circ}$ l'opérateur de projection orthogonale de $V_{1\circ}^1(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_{N_\ell-1}^0(\Omega_\ell)$ décrit dans la preuve du théorème (2.3.4). On remarque que $\chi_{\delta-1}^k \in H_{1\circ}^1(\Omega)$, ceci implique que

$$\begin{aligned} |a_k(\chi_{\delta-1}^k, u^k - u_\delta^k)| &= \left| \int_{\Omega} f^k \chi_{\delta-1}^k d\tau - (\mathcal{I}_\delta f^k, \chi_{\delta-1}^k)_\delta \right| \\ &\leq cN_\delta^{1-s} \|f^k\|_{H_{1\circ}^{1-s}(\Omega)} (\|\chi^k - \chi_{\delta-1}^k\|_{\mathcal{X}^1_2} + \|\chi^k\|_{\mathcal{X}^1_2}). \end{aligned} \quad (2.4.38)$$

Puisqu'on a

$$\|\chi^k - \chi_{\delta-1}^k\|_{\mathcal{X}^1_2} \leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-1} \|\chi_\ell^k\|_{H_{1\circ}^1(\Omega_\ell)}.$$

[8, Proposition V.3.2 et V.3.6], on déduit que

$$a_k(\chi^k - \chi_{\delta-1}^k, u^k - u_\delta^k) \leq cN_\delta^{-1} \|g\|_{L^2_1(\Omega)} \|u^k - u_\delta^k\|_{\mathcal{X}^1_2}. \quad (2.4.39)$$

Pour majorer le terme $\|u^k - u_\delta^k\|_{\mathcal{X}^1_2}$, on utilise l'estimation (2.4.35). En combinant (2.4.37), (2.4.38) et (2.4.39), on déduit (2.4.36). ■

2.5 Retour au problème tridimensionnel

Pour le retour au problème tridimensionnel, On définit pour K un entier fixé \check{u}_K et $\check{u}_{K,\delta}$ par :

$$\check{u}_K(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{|k| \leq K} u^k(r, z) e^{ik\theta}, \quad (2.5.1)$$

et

$$\check{u}_{K,\delta}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{|k| \leq K} u_\delta^k(r, z) e^{ik\theta}. \quad (2.5.2)$$

où $u_\delta^0(r, z)$ est solution du problème (2.3.11) pour des données f^0 et g^0 ,

et $u_\delta^k(r, z)$, ($k \neq 0$) est solution du problème (2.4.6) pour des données f^k et g^k .
Et on définit $\check{u}_{K,\delta}^*$ par

$$\check{u}_{K,\delta}^*(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{|k| \leq K} u_{K,\delta}^k(r, z) e^{ik\theta}, \quad (2.5.3)$$

où $u_{K,\delta}^0(r, z)$ est solution du problème (2.3.11) pour des données f_K^0 et g_K^0 ,
et $u_{K,\delta}^k(r, z)$, ($k \neq 0$) est solution du problème (2.4.6) pour des données f_K^k et g_K^k .
L'erreur de troncature entre \check{u} et \check{u}_K est estimée comme suit voir [8, (VII.1.3) et (II.1.8)] :

$$\|\check{u} - \check{u}_K\|_{H^s(\hat{\Omega})} \leq cK^{t-s} \|\check{u}\|_{H^s(\hat{\Omega})}. \quad (2.5.4)$$

Et d'après les définitions de \check{u}_K et $\check{u}_{K,\delta}$, on remarque que $\check{u}_{K,\delta}$ n'appartient pas l'espace $H^1(\hat{\Omega})$, et on a :

$$\sum_{\ell=1}^L \|\check{u}_K - \check{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\hat{\Omega}_\ell)} \leq c \sum_{|k| \leq K} \|u^k - u_\delta^k\|_{H^1_{(k)}(\Omega)}. \quad (2.5.5)$$

On va donner, dans le théorème suivant, une estimation d'erreur globale entre la solution exacte \check{u} et la solution tronquée à l'ordre K discrétisée par la méthode spectrale.

Théorème 2.5.1 *On suppose que $\check{f} \in H^{s-1}(\hat{\Omega})$ avec $s > \frac{5}{2}$. Soit \check{u} la solution du problème (1.6.9) $\check{u}_{K,\delta}$ et $\check{u}_{K,\delta}^*$ les sommes finies induites dans (2.5.2) et (2.5.3). On a*

$$\sum_{\ell=1}^L \|\check{u} - \check{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\hat{\Omega}_\ell)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \{\sup(N_\delta^{1-s}, E_\delta) + K^{-s}\} \|\check{f}\|_{H^{s-1}(\hat{\Omega})} \quad (2.5.6)$$

et

$$\sum_{\ell=1}^L \|\check{u} - \check{u}_{K,\delta}^*\|_{H^1(\hat{\Omega}_\ell)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \{\sup(N_\delta^{1-s}, E_\delta) + K^{1-s}\} \|\check{f}\|_{H^{s-1}(\hat{\Omega})}. \quad (2.5.7)$$

Où

$$N_\delta = \min \{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\} \text{ et } E_\delta = \max \{E_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$$

et E_ℓ est défini dans (2.3.55).

Preuve 1) Preuve de (2.5.6)

En utilisant (2.5.4) et (2.5.5), on a

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^L \|\check{u} - \check{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\hat{\Omega}_\ell)} &\leq \sum_{\ell=1}^L (\|\check{u} - \check{u}_K\|_{H^1(\hat{\Omega}_\ell)} + \|\check{u}_K - \check{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\hat{\Omega}_\ell)}) \\ &\leq c\{K^{-s} \|\check{u}\|_{H^{s+1}(\hat{\Omega})} + \sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \|u^k - u_\delta^k\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}\} \\ &\leq c\{K^{-s} \|\check{f}\|_{H^{s-1}(\hat{\Omega})} + \sum_{|k| \leq K} \sum_{\ell=1}^L \|u^k - u_\delta^k\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}\}. \end{aligned}$$

D'après les théorèmes 2.3.3 et 2.4.2 on a

$$\|u - u_\delta\|_{\mathcal{X}^1} \leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \{N_\delta^{1-s}, E_\delta\} \|f\|_{H_1^{s-1}(\Omega)} \text{ si } k = 0 \quad (2.5.8)$$

et

$$\|u^k - u_\delta^k\|_{\mathcal{X}^1} \leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, E_\delta\} \|f^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega)} \text{ si } k \neq 0 \quad (2.5.9)$$

on utilise le fait que

$$\sum_{k \in \mathbb{Z}} \|f^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega)} \simeq \|\tilde{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})} \quad (2.5.10)$$

et que $\|\cdot\|_{H_1^s(\Omega)} = \|\cdot\|_{H_{(0)}^s(\Omega)}$ pour déduire (2.5.6) à partir de (2.5.8-2.5.9).

2) Preuve de (2.5.7)

Utilisant l'inégalité triangulaire, on a

$$\sum_{\ell=1}^L \|\tilde{u} - \tilde{u}_{K,\delta}^*\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \leq \sum_{\ell=1}^L (\|\tilde{u} - \tilde{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} + \|\tilde{u}_{K,\delta} - \tilde{u}_{K,\delta}^*\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)}).$$

Le terme $\sum_{\ell=1}^L \|\tilde{u} - \tilde{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)}$ est majoré par (2.5.6). On remarque que pour majorer le terme $\sum_{\ell=1}^L \|\tilde{u}_{K,\delta} - \tilde{u}_{K,\delta}^*\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)}$ il suffit de majorer $\sum_{\ell=1}^L \|u_\delta^k - u_{K,\delta}^k\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)}$. D'après l'ellipticité et la continuité de $a_\delta(\cdot, \cdot)$ et $a_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$ on a pour tout $k \in \mathbb{Z}$

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^L \|u_\delta^k - u_{K,\delta}^k\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)} &\leq c \sum_{\ell=1}^L \|\mathcal{I}_\delta(f^k - f_K^k)\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L \{ \|f^k - \mathcal{I}_\delta f^k\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \|f_K^k - \mathcal{I}_\delta f_K^k\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \|f^k - f_K^k\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \}. \end{aligned} \quad (2.5.11)$$

Comme on a pour tout $k \in \mathbb{Z}$ voir (2.3.46)

$$\|f^k - \mathcal{I}_\delta f^k\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \leq c N_\ell^{1-s} \|f^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega_\ell)},$$

on en déduit, moyennant (2.5.10) que

$$\sum_{\ell=1}^L \sum_{k \in \mathbb{Z}} \|f^k - \mathcal{I}_\delta f^k\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \leq c N_\delta^{1-s} \|\tilde{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})} \quad (2.5.12)$$

Pour le deuxième terme de droite de l'inégalité (2.5.11) on a :

$$\begin{aligned} \|f_K^k - \mathcal{I}_\delta f_K^k\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} &\leq c N_\ell^{1-s} \|f_K^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega_\ell)} \\ &\leq c N_\ell^{1-s} (\|f^k - f_K^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \|f^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega_\ell)}). \end{aligned}$$

On somme sur ℓ et k et on utilise (2.5.4), (1.6.5) et (2.5.4) pour déduire que :

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^L \sum_{k \in \mathbb{Z}} \|f^k - f_K^k\|_{H^{s-1}(\Omega_\ell)} &\leq c \|\tilde{f} - \tilde{f}_K\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})} \\ &\leq c \|\tilde{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})} \end{aligned}$$

et que par conséquent

$$\sum_{\ell=1}^L \sum_{k \in \mathbb{Z}} \|f^k - \mathcal{I}_\delta f_K^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \leq c N_\delta^{1-s} \|\tilde{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})}. \quad (2.5.13)$$

Enfin pour le troisième terme de droite de l'inégalité (2.5.11) on a

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^L \sum_{k \in \mathbb{Z}} \|f^k - f_K^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} &\leq c \|\tilde{f} - \tilde{f}_K\|_{L^2(\tilde{\Omega})} \\ &\leq c K^{1-s} \|\tilde{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})}. \end{aligned}$$

On a alors

$$\sum_{\ell=1}^L \sum_{k \in \mathbb{Z}} \|f^k - f_K^k\|_{H^{s-1}(\Omega_\ell)} \leq c K^{1-s} \|\tilde{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})}. \quad (2.5.14)$$

Combinant (2.5.11)-(2.5.14), on obtient :

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^L \|\tilde{u}_{K,\delta} - \tilde{u}_{K,\delta}^*\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} &\leq c \sum_{k \in \mathbb{Z}} \sum_{\ell=1}^L \|u_\delta^k - u_{K,\delta}^k\|_{H^1_k(\Omega_\ell)} \\ &\leq c(K^{1-s} + N_\delta^{1-s}) \|\tilde{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})} \end{aligned} \quad (2.5.15)$$

qui est l'estimation requise. ■

Théorème 2.5.2 On suppose que $\tilde{f} \in H^{s-1}(\tilde{\Omega})$ avec $s > \frac{5}{2}$. Soit \tilde{u} la solution du problème (1.6.9) $\tilde{u}_{K,\delta}$ et $\tilde{u}_{K,\delta}^*$ les sommes finies induites (2.5.2) et (2.5.3). On a

$$\begin{aligned} \|\tilde{u} - \tilde{u}_{K,\delta}\|_{L^2(\tilde{\Omega})} &\leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \left\{ \sup(N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1} \log(N_\delta)^\theta E_\delta) \right. \\ &\quad \left. + K^{-1-s} \right\} \|\tilde{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})}. \end{aligned} \quad (2.5.16)$$

et

$$\begin{aligned} \|\tilde{u} - \tilde{u}_{K,\delta}^*\|_{L^2(\tilde{\Omega})} &\leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \left\{ \sup(N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1} \log(N_\delta)^\theta E_\delta) \right. \\ &\quad \left. + K^{1-s} \right\} \|\tilde{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})}. \end{aligned} \quad (2.5.17)$$

où

$$N_\delta = \min \{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\} \text{ et } E_\delta = \max \{E_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}.$$

ρ est nul si la décomposition est conforme et vaut 1 sinon et E_δ est défini dans (2.3.54).

Preuve 1) Preuve de (2.5.16)

En utilisant (2.5.4) et (2.5.5), on a

$$\begin{aligned}
 \|\tilde{u} - \check{u}_{K,\delta}\|_{L^2(\tilde{\Omega})} &\leq \|\tilde{u} - \check{u}_K\|_{L^2(\tilde{\Omega})} + \|\check{u}_K - \check{u}_{K,\delta}\|_{L^2(\tilde{\Omega})} & (2.5.18) \\
 &\leq c\{K^{-1-s}\|\tilde{u}\|_{H^{s+1}(\tilde{\Omega})} + \sum_{\ell=1}^L \sum_{|k|\leq K} \|u^k - u_\delta^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}\} \\
 &\leq c\{K^{-1-s}\|\check{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})} + \sum_{|k|\leq K} \sum_{\ell=1}^L \|u^k - u_\delta^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}\}. \\
 &\leq c\{K^{-1-s}\|\check{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})} + \sum_{|k|\leq K} \|u^k - u_\delta^k\|_{L^2_1(\Omega)}\} \\
 &\leq c\{K^{-1-s} + \sup(N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1}(\log N_\delta)E_\delta)\}\|\check{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})}
 \end{aligned}$$

2) Preuve de (2.5.17) :

Graçe à (2.5.15), on conclut que

$$\|\check{u}_{K,\delta} - \check{u}_{K,\delta}^*\|_{L^2(\tilde{\Omega})} \leq c(K^{1-s} + N_\delta^{1-s})\|\check{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})}. \quad (2.5.19)$$

En combinant 1) et (2.5.19), on déduit (2.5.17). ■

2.5.1 Algorithme de Strang et Fix : cas axisymétrique

On note S_1 la première fonction singulière qui apparaît dans la solution du problème (2.3.3).

On considère ensuite l'espace

$$\check{X}_\delta = X_\delta^\diamond + \mathbb{R}S_1.$$

Remarque 2.5.1 On va dans ce qui suit étudier le cas d'une singularité due à un coin convexe et celui de la singularité due à un coin non convexe. On note

$$\begin{aligned}
 \check{u}_\delta &= u_\delta + \lambda S_1, \\
 \check{v}_\delta &= v_\delta + \mu S_1.
 \end{aligned}$$

On munit l'espace \check{X}_δ des normes $\|\cdot\|_0$ et $\|\cdot\|_{\circ 1}$ définies par

$$\begin{aligned}
 \|\check{v}_\delta\|_0 &= \sum_{\ell=1}^L (\|v_\ell\|_{H^1_1(\Omega_\ell)}^2 + |\lambda|^2 \|S_1|_{\Omega_\ell}\|_{H^1_1(\Omega_\ell)}^2)^{\frac{1}{2}} \\
 \text{et} & \\
 \|\check{v}_\delta\|_{\circ 1} &= \left(\sum_{\ell=1}^L \|\check{v}_\delta|_{\Omega_\ell}\|_{H^1_1(\Omega_\ell)}^2\right)^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \quad (2.5.20)$$

On définit la forme bilinéaire discrète sur $\tilde{X}_\delta(\Omega)$ comme suit :

$$\begin{aligned} \tilde{a}_\delta(\tilde{u}_\delta, \tilde{v}_\delta) &= a_\delta(u_\delta, v_\delta) + \sum_{\ell=1}^L (\lambda \int_{\Omega_\ell} \nabla S_1 \nabla v_\ell r dr dz \\ &\quad + \mu \int_{\Omega_\ell} \nabla u_\ell \nabla S_1 r dr dz + \lambda \mu \int_{\Omega_\ell} (\nabla S_1)^2 r dr dz). \end{aligned} \quad (2.5.21)$$

Tenant compte des singularités, le problème (2.3.11) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trouver } \tilde{u}_\delta \in \tilde{X}_\delta(\Omega) \text{ vérifiant} \\ \forall \tilde{u}_\delta \in \tilde{X}_\delta(\Omega) \\ \tilde{a}_\delta(\tilde{u}_\delta, \tilde{v}_\delta) = (\mathcal{I}_\delta f, \tilde{v}_\delta)_\delta. \end{array} \right. \quad (2.5.22)$$

Remarque 2.5.2 On remarque que

$$\|\cdot\|_{\circ 1} \leq c \|\cdot\|_\circ \quad (2.5.23)$$

avec une c constante indépendante de N et que $(\tilde{X}_\delta, \|\cdot\|_\circ)$ est un espace de Hilbert.

Proposition 2.5.1 Il existe une constante α positive et indépendante de δ qui vérifie :

$$|\tilde{a}_\delta(\tilde{u}_\delta, \tilde{v}_\delta)| \leq \alpha \|\tilde{u}_\delta\|_\circ \|\tilde{v}_\delta\|_\circ \quad \forall (\tilde{u}_\delta, \tilde{v}_\delta) \in \tilde{X}_\delta(\Omega) \times \tilde{X}_\delta(\Omega). \quad (2.5.24)$$

Preuve On a pour $(\tilde{u}_\delta, \tilde{v}_\delta) \in \tilde{X}_\delta(\Omega) \times \tilde{X}_\delta(\Omega)$

$$\begin{aligned} \tilde{a}_\delta(\tilde{u}_\delta, \tilde{v}_\delta) &= \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{i=1}^{N_{\ell+1}} \sum_{j=0}^{N_\ell} (\nabla u_{\delta i|\Omega_\ell} \nabla v_{\delta j|\Omega_\ell}) (\zeta_j^\ell, \xi_i^\ell) \omega_i^\ell \rho_j^\ell \\ &\quad + \sum_{\ell=L_0+1}^L \sum_{i,j=0}^{N_\ell} (\nabla u_{\delta i|\Omega_\ell} \nabla v_{\delta j|\Omega_\ell}) (\xi_i^{(r)\ell}, \xi_j^\ell) \xi_i^{(r)\ell} \rho_j^\ell \\ &\quad + \sum_{\ell=1}^L (\lambda \int_{\Omega_\ell} \nabla S_1 \nabla v_\ell r dr dz + \mu \int_{\Omega_\ell} \nabla u_\ell \nabla S_1 r dr dz \\ &\quad + \lambda \mu \int_{\Omega_\ell} (\nabla S_1)^2 r dr dz). \end{aligned}$$

Les deux premiers termes correspondent à $a_\delta(u_\delta, v_\delta)$, et on a d'après (2.3.13)

$$\begin{aligned} |a_\delta(u_\delta, v_\delta)| &\leq 4 \sum_{\ell=1}^L (\|\partial_r u_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \|\partial_r v_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \|\partial_z u_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \|\partial_z v_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}) \\ &\leq 4 \sum_{\ell=1}^L |u_\ell|_{H^1_1(\Omega_\ell)} |v_\ell|_{H^1_1(\Omega_\ell)}. \end{aligned} \quad (2.5.25)$$

Le terme restant peut être majoré par :

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{\ell=1}^L (\lambda \int_{\Omega_\ell} \nabla S_1 \nabla v_\ell r dr dz + \mu \int_{\Omega_\ell} \nabla u_\ell \nabla S_1 r dr dz \right. \\ & \quad \left. + \lambda \mu \int_{\Omega_\ell} (\nabla S_1)^2 r dr dz \right| \\ & \leq \sum_{\ell=1}^L \{ |\lambda| |S_1|_{H_1^1(\Omega_\ell)} |v_\ell|_{H_1^1(\Omega_\ell)} + |\mu| |S_1|_{H_1^1(\Omega_\ell)} |u_\ell|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \\ & \quad + |\lambda| |\mu| |S_1|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \}. \end{aligned} \quad (2.5.26)$$

En combinant les deux termes 2.5.25 et 2.5.26 on obtient :

$$\begin{aligned} |\tilde{a}_\delta(\tilde{u}_\delta, \tilde{v}_\delta)| & \leq C \sum_{\ell=1}^L \left(|u_\ell|_{H_1^1(\Omega_\ell)} + |\lambda| |S_1|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \right) \\ & \quad \left(|v_\ell|_{H_1^1(\Omega_\ell)} + |\mu| |S_1|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \right). \end{aligned}$$

On utilise maintenant l'inégalité $(a + b) \leq c(a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}$ pour conclure que

$$\begin{aligned} |\tilde{a}_\delta(\tilde{u}_\delta, \tilde{v}_\delta)| & \leq C \sum_{\ell=1}^L \left(|u_\ell|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 + |\lambda|^2 |S_1|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ & \quad \left(|v_\ell|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 + |\mu|^2 |S_1|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

et donc (2.5.24) est vérifiée. ■

Proposition 2.5.2 *Il existe une constante α positive telle que :*

$$\forall \tilde{u}_\delta \in \dot{X}_\delta(\Omega) \quad \tilde{a}_\delta(\tilde{u}_\delta, \tilde{u}_\delta) \geq \alpha \|\tilde{u}_\delta\|_0^2. \quad (2.5.27)$$

Pour la preuve de cette proposition, on a besoin du lemme suivant.

Lemme 2.5.1 *Soit S appartenant à $L_1^2(\Omega) \setminus \mathbb{P}_N(\Omega)$. Il existe $\rho_N < 1$ qui ne dépend que de N et S , tel que :*

$$\forall u_N \in \mathbb{P}_N(\Omega), \quad \int_{\Omega} S u_N r dr dz \leq \rho_N \|S\|_{L_1^2(\Omega)} \|u_N\|_{L_1^2(\Omega)}. \quad (2.5.28)$$

Preuve 1) Si l'un des termes $\|S\|_{L_1^2(\Omega)}$ ou $\|u_N\|_{L_1^2(\Omega)}$ est nul, alors u_N ou S est nul presque partout et l'inégalité (2.5.28) est vérifiée.

2) On suppose S non nul et on note $\Pi_N S$ la projection orthogonale de S sur $\mathbb{P}_N(\Omega)$. On a

$$\int_{\Omega} (S - \Pi_N S) u_N r dr dz = 0$$

et

$$\|S - \Pi_N S\|_{L_1^2(\Omega)}^2 + \|\Pi_N S\|_{L_1^2(\Omega)}^2 = \|S\|_{L_1^2(\Omega)}^2.$$

On en déduit que :

$$\begin{aligned}
 \frac{|\int_{\Omega} S u_N r dr dz|}{\|S\|_{L^2_1(\Omega)} \|u_N\|_{L^2_1(\Omega)}} &= \frac{|\int_{\Omega} (\Pi_N S) u_N r dr dz|}{\|S\|_{L^2_1(\Omega)} \|u_N\|_{L^2_1(\Omega)}} \\
 &\leq \frac{\|\Pi_N S\|_{L^2_1(\Omega)}}{\|S\|_{L^2_1(\Omega)}} \\
 &\leq \sqrt{1 - \frac{\|S - \Pi_N S\|_{L^2_1(\Omega)}^2}{\|S\|_{L^2_1(\Omega)}^2}} \\
 &= \rho_N < 1.
 \end{aligned}$$

en effet le terme $S - \Pi_N S$ n'est jamais nul. ■

Remarque 2.5.3 On remarque que $\rho_N \rightarrow 1$ si $N \rightarrow +\infty$. De point de vue numérique on peut supposer que N est fini.

Preuve de la proposition 2.5.2. On a

$$\begin{aligned}
 \hat{a}_{\delta}(\hat{u}_{\delta}, \hat{u}_{\delta}) &= a_{\delta}(u_{\delta}, v_{\delta}) + \sum_{\ell=1}^L (2\lambda \int_{\Omega_{\ell}} \nabla S_1 \nabla v_{\ell} r dr dz \\
 &\quad + \lambda^2 \int_{\Omega_{\ell}} (\nabla S_1)^2 r dr dz).
 \end{aligned}$$

On utilise (2.2.5) pour déduire que :

$$\begin{aligned}
 \hat{a}_{\delta}(\hat{u}_{\delta}, \hat{u}_{\delta}) &\geq \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_{\ell}} (\nabla u_{\ell})^2 r dr dz \\
 &\quad - \sum_{\ell=1}^L 2\lambda \rho_{N_{\ell}} \|\nabla S_1\|_{L^2_1(\Omega_{\ell})} \|\nabla u_{\ell}\|_{L^2_1(\Omega_{\ell})} \\
 &\quad + \lambda^2 \int_{\Omega_{\ell}} (\nabla S_1)^2 r dr dz \\
 &\geq (1 - \rho) \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_{\ell}} [(\nabla u_{\ell})^2 + \lambda^2 (\nabla S_1)^2] r dr dz, \\
 (\rho &= \sup\{\rho_{N_{\ell}}, 1 \leq \ell \leq L\}).
 \end{aligned}$$

D'où (2.5.27) est prouvé. ■

Remarque 2.5.4 On peut prouver plus facilement que

$$\hat{a}_{\delta}(\hat{u}_{\delta}, \hat{u}_{\delta}) \geq \alpha \|\hat{u}_{\delta}\|_{\sigma_1}^2 \forall \hat{u}_{\delta} \in \hat{X}_{\delta}.$$

En effet on a

$$\begin{aligned}
 & a_\delta(u_\delta, u_\delta) + \sum_{\ell=1}^L (2\lambda \int_{\Omega_\ell} \nabla S_1 \nabla u_\ell r dr dz \\
 & + \lambda^2 \int_{\Omega_\ell} (\nabla S_1)^2 r dr dz) \\
 & \geq c \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} (\nabla \hat{u}_\ell)^2 r dr dz = c \sum_{\ell=1}^L |\hat{u}_\ell|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2.
 \end{aligned}$$

Utilisant la continuité et la coercivité de \hat{a}_δ sur \tilde{X}_δ on a le théorème suivant.

Théorème 2.5.3 Pour toute fonction f appartenant à $L_1^2(\Omega)$, le problème (2.5.22) admet une solution unique \hat{u}_δ dans \tilde{X}_δ vérifiant :

$$\|\hat{u}_\delta\|_0 \leq C \|f\|_{L_1^2(\Omega)}$$

2.5.2 Estimation d'erreurs

On va maintenant, étudier l'erreur entre la solution continue du problème (2.3.3) et la solution discrète qui tient compte des singularités.

Proposition 2.5.3 Soit u la solution du problème continue (2.3.3) et \hat{u}_δ la solution du problème discret (2.5.22). On a :

$$\begin{aligned}
 \|u - \hat{u}_\delta\|_0 & \leq C \left(\inf_{\hat{v}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \{\|u - \hat{v}_\delta\|_0 \right. & (2.5.29) \\
 & + \sup_{\hat{w}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \frac{\hat{a}(\hat{v}_\delta, \hat{w}_\delta) - \hat{a}_\delta(\hat{v}_\delta, \hat{w}_\delta)}{\|\hat{w}_\delta\|_0} \} \\
 & + \sup_{\hat{w}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \frac{\int_{\Omega} f \hat{w}_\delta r dr dz - (\mathcal{I}_\delta f, \hat{w}_\delta)_\delta}{\|\hat{w}_\delta\|_0} \\
 & + \sup_{\hat{w}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \frac{\sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [\hat{w}_\delta] d\tau}{\|\hat{w}_\delta\|_0} \Big).
 \end{aligned}$$

Preuve La preuve est exactement identique à la preuve de la proposition 2.3.4. ■

Proposition 2.5.4 Soit $\sigma_\ell > 1$, on suppose que $f_{|\Omega_\ell} \in H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)$ et que $u_{|\Omega_\ell} \in H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)$, avec $s_\ell > \frac{1}{2}$ ($s_\ell > \frac{3}{2}$ si $1 \leq \ell \leq L_0$), alors on a :

$$\begin{aligned}
 & 1) \\
 & \sup_{\hat{w}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \frac{\hat{a}(\hat{v}_\delta, \hat{w}_\delta) - \hat{a}_\delta(\hat{v}_\delta, \hat{w}_\delta)}{\|\hat{w}_\delta\|_0} \leq C \left[\sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u\|_{H^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)} \right], & (2.5.30)
 \end{aligned}$$

$$2) \quad \sup_{\hat{w}_\delta \in \hat{X}_\delta} \frac{\int_{\Omega_\ell} f \hat{w}_\delta dx dy - (\mathcal{I}_\delta f, \hat{w}_\delta)_\delta}{\|\hat{w}_\delta\|_0} \leq C \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-\sigma_\ell} \|f\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}, \quad (2.5.31)$$

$$3) \quad \sup_{\hat{w}_\delta \in \hat{X}_\delta} \frac{\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u}{\partial n_m} \right) [\hat{w}_\delta] d\tau}{\|\hat{w}_\delta\|_0} \leq C \left[\sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{p_\ell} \|u\|_{H^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)} \right] \quad (2.5.32)$$

où p_ℓ est donné dans la proposition 2.3.6.

Preuve 1) On remarque que d'après la définition $\hat{a}_\delta(\cdot, \cdot)$ on a

$$\hat{a}(\hat{v}_\delta, \hat{w}_\delta) - \hat{a}_\delta(\hat{v}_\delta, \hat{w}_\delta) = a(v_\delta, w_\delta) - a_\delta(v_\delta, w_\delta)$$

en plus $\frac{1}{\|\hat{w}_\delta\|_0}$ est majoré par $\frac{1}{\|w_\delta\|_{X_1^1}}$, on en déduit alors l'inégalité (2.5.30).

2) La preuve de (2.5.31) est identique à la preuve du 2) de la proposition (2.4.3).

3) Pour prouver (2.5.32), on remarque qu'au voisinage de e , le terme $(\hat{w}_\delta|_{\Omega_k} - \hat{w}_\delta|_{\Omega_\ell})$ est égal à $(w_\delta|_{\Omega_k} - w_\delta|_{\Omega_\ell})$ puisque S_1 est continue et qu'à l'extérieur de ce voisinage, on a l'égalité encore car S_1 est nul. ■

Théorème 2.5.4 Soit $s > \frac{5}{2}$. On suppose que $f \in H_+^{s-1}(\Omega)$. Il existe une constante positive c telle que, pour toute fonction u dans $H_1^1(\Omega)$ solution du problème (2.3.3), et tout \hat{u}_δ solution du problème discret (2.5.22) on a :

$$\|u - \hat{u}_\delta\|_0 \leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \hat{E}_\delta\} \|f\|_{H_1^{-1}(\Omega)}$$

où

$$N_\delta = \min\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\} \text{ et } \hat{E}_\delta = \max\{\hat{E}_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$$

et

$$\hat{E}_\ell = \begin{cases} 0 & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ ne contient pas des } e_i, \\ N_{e_i}^{-s} (\log N_{e_i})^{\frac{3}{2}} & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ contient } e_i \text{ avec } \omega_j = \frac{\pi}{2}, \\ N_{e_i}^{-\frac{s}{3}} (\log N_{e_i})^{\frac{1}{2}} & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ contient } e_i \text{ avec } \omega_j = \frac{3\pi}{2}. \end{cases} \quad (2.5.33)$$

N_{e_i} est défini dans la proposition 2.3.7.

Preuve Il reste uniquement à estimer l'erreur d'approximation dans la proposition 2.5.3.

On a $u = u_{reg} + \lambda S_1 + \mu S_2$ et $\hat{v}_\delta = z_\delta + \lambda S_1 + \mu w_\delta$. On en déduit que

$$\begin{aligned} \inf_{\hat{w}_\delta \in \hat{X}_\delta} \|u - \hat{v}_\delta\|_0 &\leq \inf_{z_\delta \in X_\delta^0} \|u_{reg} - z_\delta\|_0 \\ &+ \inf_{w_\delta \in X_\delta^0} |\lambda| \|S_2 - w_\delta\|_0 + \dots \end{aligned}$$

D'après la proposition 2.3.5, on a

$$\inf_{z_\delta \in \tilde{X}_\delta^0} \|u_{reg} - z_\delta\|_0 \leq c\lambda_\delta^{\frac{1}{2}} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u_{\delta|\Omega_\ell}\|_{H_1^{q_\ell+1}(\Omega_\ell)}. \quad (2.5.34)$$

Pour le deuxième terme, on utilise la définition de $S_e^{(0)} = \chi_e(r_e^\lambda) r_e^\lambda (\log r_e)^q \varphi(\theta_e)$ et l'inégalité (2.3.48) avec $\lambda = \frac{\ell\pi}{\omega_j}$, et $\ell = 2$. Pour le cas $\omega_j = \frac{\pi}{2}$, $q = 0$, on obtient

$$\inf_{w_\delta \in X_\delta^0} \|S_2 - w_\delta\|_0 \leq N_\ell^{-8} (\log N_\ell)^{\frac{3}{2}}. \quad (2.5.35)$$

Pour le cas $\omega_j = \frac{3\pi}{2}$, $q = 0$, on obtient

$$\inf_{w_\delta \in \tilde{X}_\delta^0} \|S_2 - w_\delta\|_0 \leq N_\ell^{-\frac{8}{3}} (\log N_\ell)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.5.36)$$

On a aussi d'après (1.6.22) $\sup(|\lambda|, |\mu|) \leq c \|f\|_{H_1^{s-1}(\Omega)}$ pour $s > 2$.

Enfin le résultat est déduit en combinant les propositions 2.5.3 et les inégalités (2.5.34), (2.5.35) et (2.5.36). ■

2.5.3 Algorithme de Strang et Fix : cas général

Comme pour le cas axisymétrique, on considère l'espace $\tilde{X}_\delta = X_\delta^\circ + \mathbb{R}S_1$, on écrit alors pour u_δ^k et $v_\delta^k \in \tilde{X}_\delta$:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_\delta^k &= u_\delta^k + \lambda S_1. \\ \tilde{v}_\delta &= v_\delta + \mu S_1. \end{aligned}$$

Remarque 2.5.5 La première singularité est indépendante de k , et la singularité S_1 est la même que celle du cas axisymétrique.

On définit la forme bilinéaire discrète sur \tilde{X}_δ comme suit :

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{k,\delta}(\tilde{u}_\delta^k, \tilde{v}_\delta) &= a_{k,\delta}(u_\delta^k, v_\delta) \\ &+ \sum_{\ell=1}^L (\lambda \int_{\Omega_\ell} \nabla S_1 \nabla v_\ell r dr dz + \mu \int_{\Omega_\ell} \nabla u_\ell^k \nabla S_1 r dr dz \\ &+ \lambda \mu \int_{\Omega_\ell} (\nabla S_1^2) r dr dz + \lambda k^2 \int_{\Omega_\ell} (S_1 v_\ell) r^{-1} dr dz \\ &+ \mu k^2 \int_{\Omega_\ell} (S_1 u_\ell^k) r^{-1} dr dz + \lambda \mu k^2 \int_{\Omega_\ell} (S_1^2) r^{-1} dr dz). \end{aligned} \quad (2.5.37)$$

Le problème devient :

$$\begin{cases} \text{Trouver } \tilde{u}_\delta \in \tilde{X}_\delta \text{ vérifiant :} \\ \forall \tilde{v}_\delta \in \tilde{X}_\delta, \tilde{a}_{k,\delta}(\tilde{u}_\delta^k, \tilde{v}_\delta) = (f^k, \tilde{v}_\delta)_\delta \end{cases} \quad (2.5.38)$$

On définit les normes

$$\begin{aligned} \|\tilde{v}_\delta\|_{\circ k} &= \sum_{\ell=1}^L (\|v_{\delta|\Omega_\ell}\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}^2 + |\lambda|^2 \|S_1\|_{\Omega_\ell} \|H^1_{(k)}(\Omega_\ell)\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2)^{\frac{1}{2}} \\ \text{et} \\ \|\tilde{v}_\delta\|_{\circ k1} &= (\sum_{\ell=1}^L \|\tilde{v}_{\delta|\Omega_\ell}\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.5.39)$$

Remarque 2.5.6 On remarque que

$$\|\cdot\|_{\circ k1} \leq c \|\cdot\|_{\circ k} \quad (2.5.40)$$

où la constante c est indépendante de k .

Proposition 2.5.5 Il existe une constante γ positive et indépendante de δ telle que :

$$\forall \tilde{u}_\delta^k \in \check{X}_\delta, \forall \tilde{v}_\delta \in \check{X}_\delta \quad (2.5.41)$$

$$\tilde{a}_{k,\delta}(\tilde{u}_\delta^k, \tilde{v}_\delta) \leq \gamma \|\tilde{u}_\delta^k\|_{\circ k} \|\tilde{v}_\delta\|_{\circ k} \quad (2.5.42)$$

Preuve On remarque que

$$\begin{aligned} \lambda \int_{\Omega_\ell} \nabla S_1 \nabla v_\ell r dr dz + \lambda k^2 \int_{\Omega_\ell} (S_1 v_\ell) r^{-1} dr dz &\leq |\lambda| (|S_1|_{H^1_1(\Omega_\ell)} \|v_\ell\|_{H^1_1(\Omega_\ell)} \\ &\quad + k^2 \|S_1\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \|v_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}) \\ &\leq |\lambda| (|S_1|_{H^1_1(\Omega_\ell)} + k \|S_1\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}) \\ &\quad (\|v_\ell\|_{H^1_1(\Omega_\ell)} + k \|v_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}). \end{aligned}$$

On utilise l'inégalité $(a + b) \leq \sqrt{2}(a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}$ pour conclure que

$$\lambda \int_{\Omega_\ell} \nabla S_1 \nabla v_\ell r dr dz + \lambda k^2 \int_{\Omega_\ell} (S_1 v_\ell) r^{-1} dr dz \leq |\lambda| \|S_1\|_{H^1_1(\Omega_\ell)} \|v_\ell\|_{H^1_1(\Omega_\ell)}.$$

On a en plus

$$\lambda \mu \int_{\Omega_\ell} (\nabla S_1^2) r dr dz + \lambda \mu k^2 \int_{\Omega_\ell} (S_1^2) r^{-1} dr dz \leq |\lambda \mu| \|S_1\|_{H^1_1(\Omega_\ell)}^2.$$

Or on a

$$\begin{aligned} a_{k,\delta}(u_\delta^k, v_\delta) &\leq c \sum_{\ell=1}^L (\|u_\ell^k\|_{H^1_1(\Omega_\ell)} + k \|u_\ell^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}) \\ &\quad (\|v_\ell\|_{H^1_1(\Omega_\ell)} + k \|v_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}) \\ &\leq c' \sum_{\ell=1}^L (\|u_\ell^k\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)} \|v_\ell\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}). \end{aligned}$$

On en déduit alors que :

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{k,\delta}(\tilde{u}_\delta^k, \tilde{v}_\delta) &\leq C \sum_{\ell=1}^L (\|u_\ell^k\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)} + |\lambda| \|S_1\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}) \\ &\quad (\|v_\ell\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)} + |\mu| \|S_1\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}) \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L (\|u_\ell^k\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)} + |\lambda| \|S_1\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}) \\ &\quad \sum_{\ell=1}^L (\|v_\ell\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)} + |\mu| \|S_1\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}). \end{aligned}$$

Enfin on obtient

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{k,\delta}(\tilde{u}_\delta^k, \tilde{v}_\delta) &\leq C(L) \left\{ \sum_{\ell=1}^L \left(\|u_\ell^k\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}^2 + |\lambda|^2 \|S_1\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \\ &\quad \left\{ \left(\|v_\ell\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}^2 + |\mu|^2 \|S_1\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \end{aligned}$$

et (2.5.41) est vérifiée. ■

Proposition 2.5.6 *Il existe une constante β positive telle que :*

$$\forall \tilde{u}_\delta \in \tilde{X}_\delta(\Omega), \quad \tilde{a}_{k,\delta}(\tilde{u}_\delta, \tilde{u}_\delta) \geq \beta \|\tilde{u}_\delta\|_{\circ k}^2. \quad (2.5.43)$$

Preuve On a

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{k,\delta}(u_\delta^k + \lambda S_1, u_\delta^k + \lambda S_1) &= \tilde{a}_\delta(u_\delta^k + \lambda S_1, u_\delta^k + \lambda S_1) \\ &\quad + k^2 \left[\left(\frac{u_\delta^k}{r}, \frac{u_\delta^k}{r} \right)_\delta \right. \\ &\quad + 2\lambda \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} (S_1 u_\delta^k) r^{-1} dr dz \\ &\quad \left. + \lambda^2 \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} (S_1^2) r^{-1} dr dz \right]. \end{aligned}$$

On utilise le lemme 2.5.1 pour déduire que

$$\tilde{a}_\delta(u_\delta^k + \lambda S_1, u_\delta^k + \lambda S_1) \geq (1 - \rho) \sum_{\ell=1}^L \|\nabla u_\ell^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2 + \lambda^2 \|\nabla S_1\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2$$

et on applique ce même lemme 2.5.1 pour l'espace L^2_{-1} et le produit scalaire $(S, u_N)_{-1} = \int_\Omega (S u_N) r^{-1} dr dz$ pour déduire que

$$k^2 \left[\left(\frac{u_\delta^k}{r}, \frac{u_\delta^k}{r} \right)_\delta + 2\lambda \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} (S_1 u_\delta^k) r^{-1} dr dz + \lambda^2 \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} (S_1^2) r^{-1} dr dz \right]$$

est minorée par

$$(1 - \rho') \sum_{\ell=1}^L [\|u_\ell^k\|_{L^2_{-1}(\Omega_\ell)}^2 + \lambda^2 \|S_1\|_{L^2_{-1}(\Omega_\ell)}^2] \text{ (puisque } |k| \geq 1)$$

Comme $\|\cdot\|_{H^1_1(\Omega_\ell)}$ et $|\cdot|_{H^1_1(\Omega_\ell)}$ sont équivalentes on conclut en écrivant :

$$\begin{aligned} \hat{a}_{k,\delta} (u_\delta^k + \lambda S_1, u_\delta^k + \alpha \lambda S_1) &\geq c \sum_{\ell=1}^L [\|u_\ell^k\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}^2 \\ &\quad + \lambda^2 \|S_1\|_{H^1_{(k)}(\Omega_\ell)}^2]. \end{aligned}$$

où la constante c ne dépend pas de k . ■

La continuité et coercivité de $\hat{a}_{k,\delta}$ sur $\tilde{X}_\delta \times \tilde{X}_\delta$ vont nous permettre d'obtenir le théorème suivant.

Théorème 2.5.5 *Pour toute fonction f^k appartenant à $L^2_1(\Omega)$, le problème (2.5.38) admet une solution unique \hat{u}_δ^k dans \tilde{X}_δ vérifiant :*

$$\|\hat{u}_\delta^k\|_{\circ k} \leq C \|f^k\|_{L^2_1(\Omega)}.$$

2.5.4 Estimation d'erreurs

Proposition 2.5.7 *Soit u^k la solution du problème continu (2.4.5) et \hat{u}_δ^k la solution du problème discret (2.5.38), on a alors :*

$$\begin{aligned} \|u^k - \hat{u}_\delta^k\|_{\circ k} &\leq C \left(\inf_{\tilde{v}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \{ \|u^k - \tilde{v}_\delta\|_{\circ k} + \right. \\ &\quad \left. \sup_{\tilde{w}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \frac{\hat{a}_{k,\delta}(\tilde{v}_\delta, \tilde{w}_\delta) - \hat{a}_k(\tilde{v}_\delta, \tilde{w}_\delta)}{\|\tilde{w}_\delta\|_{\circ k}} \right\} \\ &\quad + \sup_{\tilde{w}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \frac{\int_{\Omega_k} f^k \hat{w}_\delta dx dy - (\mathcal{I}_\delta f^k, \hat{w}_\delta)_\delta}{\|\tilde{w}_\delta\|_{\circ k}} \\ &\quad + \sup_{\tilde{w}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \frac{\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial u^k}{\partial n_m} \right) [\hat{w}_\delta] d\tau}{\|\tilde{w}_\delta\|_{\circ k}} \Big). \end{aligned}$$

Preuve C'est la même démarche que dans la preuve de la proposition 2.4.3. ■

Théorème 2.5.6 *Soit u^k la solution du problème continu (2.4.5) et \hat{u}_δ^k la solution du problème discret (2.5.38). On suppose que $f^k \in H^{s-1}(\Omega)$ avec $s > \frac{7}{2}$ alors on a*

$$\|u^k - \hat{u}_\delta^k\|_{\circ k} \leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \hat{E}_\delta\} \|f^k\|_{H^{s-1}(\Omega)},$$

où

$$N_\delta = \min \{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\} \text{ et } \tilde{E}_\delta = \max \{E_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$$

et \tilde{E}_ℓ est défini dans (2.5.33).

Preuve La démarche est similaire à celle de la proposition 2.5.4. Il suffit de remarquer d'abord que le terme $\hat{a}_{k,\delta}(\tilde{v}_\delta, \tilde{w}_\delta) - \hat{a}_k(\tilde{v}_\delta, \tilde{w}_\delta) = a_{k,\delta}(v_\delta, w_\delta) - a_k(v_\delta, w_\delta)$ qui est déjà majoré dans la preuve de la proposition (2.4.3). Ensuite on a :

$$\inf_{\tilde{w}_\delta \in \tilde{X}_\delta} \|u^k - \tilde{v}_\delta\|_{ok} \leq c \left(\inf_{z_\delta \in \tilde{X}_\delta} \|u_{reg}^k - z_\delta\|_{X_1^1} + \inf_{w_\delta \in \tilde{X}_\delta} |\lambda| \|S_2 - w_\delta\|_{X_1^1} + \inf_{w_\delta \in \tilde{X}_\delta} |\mu| \|S_3 - w_\delta\|_{X_1^1} + \dots \right)$$

où on a posé $u^k = u_{reg}^k + \lambda S_1 + \mu S_2$ et $\tilde{v}_\delta = z_\delta + \lambda S_1 + \mu w_\delta$. Le premier terme est inférieur à

$$C \lambda_\delta^{\frac{1}{2}} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|u_{\delta|\Omega_\ell}^k\|_{H^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}.$$

Pour le deuxième on utilise la remarque 2.5.5 et l'inégalité (2.4.7), on obtient alors le résultat. ■

2.5.5 Retour au problème tridimensionnel : Algorithme de Strang et Fix

On pose

$$\hat{u}_{K,\delta}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{|k| \leq K} \hat{u}_\delta^k(r, z) e^{ik\theta}$$

où

- 1) $\hat{u}_\delta^0(r, z)$ est solution du problème (2.5.22) pour des données f^0 et g^0 ,
 - 2) $\hat{u}_\delta^k(r, z)$, ($k \neq 0$) est solution du problème (2.5.38) pour des données f^k et g^k .
- Et on pose

$$\hat{u}_{K,\delta}^*(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{|k| \leq K} \hat{u}_{K,\delta}^k(r, z) e^{ik\theta}$$

avec

- 1) $\hat{u}_{K,\delta}^0(r, z)$ est solution du problème (2.5.22) pour des données f_K^0 et g_K^0 .
- 2) $\hat{u}_{K,\delta}^k(r, z)$, ($k \neq 0$) est solution du problème (2.5.38) pour des données f_K^k et g_K^k . On définit $\hat{u}_{K,\delta}^*$ par

$$\hat{u}_{K,\delta}^*(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{|k| \leq K} \hat{u}_{K,\delta}^k(r, z) e^{ik\theta}, \quad (2.5.44)$$

Théorème 2.5.7 Soit \check{f} dans $H^{s-1}(\check{\Omega})$, $s > \frac{5}{2}$ et \check{u} la solution du problème (1.6.9) on a :

$$\sum_{\ell=1}^L \|\check{u} - \hat{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\check{\Omega}_\ell)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \left\{ \sup(N_\delta^{1-s}, \tilde{E}_\delta) + K^{-s} \right\} \|\check{f}\|_{H^{s-1}(\check{\Omega})} \quad (2.5.45)$$

et

$$\sum_{\ell=1}^L \|\ddot{u} - \dot{u}_{K,\delta}^*\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \{\sup(N_\delta^{1-s}, \dot{E}_\delta) + K^{1-s}\} \|\dot{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})} \quad (2.5.46)$$

où

$$N_\delta = \min \{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\} \text{ et } \dot{E}_\delta = \max \{\dot{E}_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$$

et \dot{E}_ℓ est défini dans (2.5.33).

Preuve 1) On a

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^L \|\ddot{u} - \dot{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} &\leq (\|\ddot{u} - \ddot{u}_K\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} + \|\ddot{u}_K - \dot{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)}) \\ &\leq c\{K^{-s}\|\ddot{u}\|_{H^{s+1}(\tilde{\Omega})} + \sum_{|k| \leq K} \|u^k - \dot{u}_\delta^k\|_{H^1(k)}^2\}. \end{aligned}$$

Grâce à l'inégalité (2.5.5) on obtient

$$\sum_{\ell=1}^L \|\ddot{u} - \dot{u}_{K,\delta}\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \leq c\{K^{-s}\|\dot{f}\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})} + \sum_{|k| \leq K} \|u^k - \dot{u}_\delta^k\|_{H^1(k)}^2\}.$$

a) Pour $k \neq 0$ et d'après le théorème 2.5.6, on a

$$\|u^k - \dot{u}_\delta^k\|_{\circ k} \leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \dot{E}_\delta\} \|f^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega)}.$$

On a en plus d'après (2.5.40)

$$\begin{aligned} \sum_{k \neq 0} \|\dot{u}_\delta^k - \dot{u}_{K,\delta}^k\|_{\circ k1} &\leq \sum_{k \neq 0} \|u^k - \dot{u}_\delta^k\|_{\circ k} \\ &\leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \dot{E}_\delta\} \sum_{k \neq 0} \|f^k\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega)} \end{aligned}$$

où $\|\dot{u}_\delta^k - \dot{u}_{K,\delta}^k\|_{\circ k1} = (\sum_{\ell=1}^L \|\dot{u}_\delta^k - \dot{u}_{K,\delta}^k\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)})^{\frac{1}{2}}$.

b) Pour $k = 0$ et d'après le théorème 2.5.6, on a

$$\|u^0 - \dot{u}_\delta^0\|_{\circ} \leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \dot{E}_\delta\} \|f^0\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega)}.$$

On a en plus d'après (2.5.23)

$$\begin{aligned} \|\dot{u}_\delta^0 - \dot{u}_{K,\delta}^0\|_{\circ 1} &\leq \|u^0 - \dot{u}_\delta^0\|_{\circ} \\ &\leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \dot{E}_\delta\} \|f^0\|_{H_{(k)}^{s-1}(\Omega)} \end{aligned}$$

où $\left\| \hat{u}_\delta^0 - \hat{u}_{K,\delta}^0 \right\|_{o1} = \left(\sum_{\ell=1}^L \left\| \hat{u}_\delta^0 - \hat{u}_{K,\delta}^0 \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \right)^{\frac{1}{2}}$. En combinant a) et b) et en utilisant l'équivalence des normes

$$\sum_{k \in \mathbb{Z}} \left(\sum_{\ell=1}^L \left\| \cdot \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \right)^{\frac{1}{2}} \simeq \left\| \cdot \right\|_{H^1(\tilde{\Omega})}$$

et le fait que $\left\| \cdot \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} = \left\| \cdot \right\|_{H_1^1(\tilde{\Omega}_\ell)}$ on obtient (2.5.45)

2) On a

$$\sum_{\ell=1}^L \left\| \hat{u} - \hat{u}_{K,\delta}^* \right\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \leq \sum_{\ell=1}^L \left(\left\| \hat{u} - \hat{u}_{K,\delta} \right\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} + \left\| \hat{u}_{K,\delta}^* - \hat{u}_{K,\delta} \right\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \right) \quad (2.5.47)$$

Le premier terme $\sum_{\ell=1}^L \left\| \hat{u} - \hat{u}_{K,\delta} \right\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)}$ est déjà majoré.

Pour le second terme $\sum_{\ell=1}^L \left\| \hat{u}_{K,\delta}^* - \hat{u}_{K,\delta} \right\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)}$ on procède comme suit.

a) Pour $k \neq 0$, on utilise l'ellipticité et la continuité de $\hat{a}_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$ pour la norme $\left\| \cdot \right\|_{o,k}$. Et on obtient

$$\left\| \hat{u}_\delta^k - \hat{u}_{K,\delta}^k \right\|_{o,k} \leq c \sum_{\ell=1}^L \left\| \mathcal{I}_\delta(f^k - f_K^k) \right\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}$$

On a en plus d'après (2.5.40)

$$\left\| \hat{u}_\delta^k - \hat{u}_{K,\delta}^k \right\|_{o,k1} \leq c \sum_{\ell=1}^L \left\| \mathcal{I}_\delta(f^k - f_K^k) \right\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}$$

où

$$\left\| \hat{u}_\delta^k - \hat{u}_{K,\delta}^k \right\|_{o,k1} = \left(\sum_{\ell=1}^L \left\| \hat{u}_\delta^k - \hat{u}_{K,\delta}^k \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \right)^{\frac{1}{2}},$$

ceci entraîne que

$$\sum_{k \neq 0} \left\| \hat{u}_\delta^k - \hat{u}_{K,\delta}^k \right\|_{o,k1} \leq c \sum_{k \neq 0} \sum_{\ell=1}^L \left\| \mathcal{I}_\delta(f^k - f_K^k) \right\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \quad (2.5.48)$$

b) Pour $k = 0$ on utilise l'ellipticité et la continuité de $\hat{a}_\delta(\cdot, \cdot)$ pour la norme $\left\| \cdot \right\|_o$. On obtient :

$$\sum_{k \neq 0} \left\| \hat{u}_\delta^0 - \hat{u}_{K,\delta}^0 \right\|_o \leq c \sum_{k \neq 0} \sum_{\ell=1}^L \left\| \mathcal{I}_\delta(f^0 - f_K^0) \right\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}$$

On a en plus d'après (2.5.23)

$$\sum_{k \neq 0} \left\| \hat{u}_\delta^0 - \hat{u}_{K,\delta}^0 \right\|_{o1} \leq c \sum_{k \neq 0} \sum_{\ell=1}^L \left\| \mathcal{I}_\delta(f^0 - f_K^0) \right\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}$$

où $\left\| \hat{u}_\delta^0 - \hat{u}_{K,\delta}^0 \right\|_{\mathfrak{o}1} = \left(\sum_{\ell=1}^L \left\| \hat{u}_\delta^k - \hat{u}_{K,\delta}^k \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$. En combinant a) et b) et en utilisant l'équivalence des normes

$$\sum_{k \in \mathbb{Z}} \left(\sum_{\ell=1}^L \left\| \cdot \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \simeq \left\| \cdot \right\|_{H^1(\tilde{\Omega})}$$

et le fait que $\left\| \cdot \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} = \left\| \cdot \right\|_{H_1^1(\tilde{\Omega}_\ell)}$ on obtient :

$$\sum_{\ell=1}^L \left\| \hat{u}_{K,\delta}^* - \hat{u}_{K,\delta} \right\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \leq \sum_{k \neq 0} \sum_{\ell=1}^L \left\| \mathcal{I}_\delta(f^k - f_K^k) \right\|_{L_1^2(\Omega_\ell)}.$$

Enfin on utilise la même démarche que dans 2) de la preuve du théorème 2.5.1, on obtient :

$$\sum_{\ell=1}^L \left\| \hat{u}_{K,\delta}^* - \hat{u}_{K,\delta} \right\|_{H^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \leq c(K^{1-s} + N_\delta^{1-s}) \left\| \hat{f} \right\|_{H^{s-1}(\tilde{\Omega})}. \quad (2.5.49)$$

Finalement en combinant (2.5.45), (2.5.47) et (2.5.49) on obtient (2.5.46). ■

2.6 Mise en œuvre de l'Algorithme de résolution

2.6.1 Description du système linéaire

Cas de $\Omega = [a, b] \times [c, d]$

On rappelle les nœuds Gauss-Lobatto mentionnés dans le début de ce chapitre. $r_i^{(2)} = \frac{1+\zeta_i^{(2)}}{2}$ où $1 \leq i \leq N+1$ et $\xi_j, 0 \leq j \leq N$.

On va décrire la matrice du système linéaire dans le cas d'un cylindre c'est à dire où Ω est un rectangle $[a, b] \times [c, d]$. Le maillage est fait sur un carré de référence Σ . On note Σ l'ensemble des nœuds du maillage sur Σ . I l'ensemble des indices des nœuds $(r_i^{(2)}, \xi_j)$ de Σ tels que $(r_i^{(2)}, \xi_j) \in \Sigma \cap (\Omega \cup \Gamma_0)$. I^* l'ensemble des indices des nœuds de Σ tels que $(r_i^{(2)}, \xi_j) \in \Sigma \cap \Omega$ et \mathcal{B} l'ensemble des indices des nœuds $(r_i^{(2)}, \xi_j)$ de Σ tels que $(r_i^{(2)}, \xi_j) \in \Sigma \cap \Gamma$.

Pour $k = 0$, le vecteur inconnu est $U_\delta^0 = (u_{\delta,ij}^0), (i, j) \in I$ et pour $k \neq 0$, le vecteur inconnu est $U_\delta^k = (u_{\delta,ij}^k), (i, j) \in I^*$ puisque u^k est nul sur Γ_0 .

Pour retrouver le maillage (ζ'_i, ξ'_j) , ainsi que les poids d'intégration ρ'_j et ω'_i sur chaque $\Omega = [a, b] \times [c, d]$, à partir des nœuds et poids donnés sur le carré de référence Σ , on utilise les formules de changement de variables classiques :

$$\zeta'_i = \frac{b-a}{2} \zeta_i + \frac{b+a}{2} \text{ et } \xi'_j = \frac{d-c}{2} \xi_j + \frac{d+c}{2},$$

et

$$\rho'_j = \frac{d-c}{2} \rho_j \text{ et } \omega'_i = \left(\frac{b-a}{2} \right)^2 \omega_i.$$

On introduit ensuite les polynômes de Lagrange, associés respectivement aux nœuds $(\zeta_i)_{i=1,\dots,N+1}$ et $(\xi_j)_{j=1,\dots,N}$ définis par

$$l_i^{(2)}(\zeta_k) = \delta_{ik} \text{ et } l_j(\xi_k) = \delta_{jk},$$

où δ désigne le symbole de Kronecker. Les polynômes $\{l_i^{(2)} \otimes l_j, 1 \leq i \leq N+1 \text{ et } 0 \leq j \leq N\}$ forment une base de $\mathbb{P}_N(\Sigma)$. Donc, tout polynôme $u_N \in \mathbb{P}_N(\Sigma)$ peut s'écrire dans cette base sous la forme

$$u_N(\zeta, z) = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=0}^N u_{ij} l_i^{(2)}(\zeta) l_j(z), \text{ où } u_{ij} = u_{ij}(\zeta_i, \xi_j).$$

Les problèmes (2.3.11) et (2.4.6) s'écrivent alors sous la forme d'une famille de systèmes linéaires :

$$A_0 U_0 = F_0 \text{ et } A_k U_k = F_k \text{ pour } k \neq 0, |k| \leq K,$$

où l'inconnu $U_0 = (u_{ij}^0)_{(i,j) \in I}$ est le vecteur associé à la vitesse pour $k = 0$, et $U^k = (u_{ij}^k)_{(i,j) \in I^*}$ est celui pour $k \neq 0$.

Les matrices A_0 et A_k sont données par :

$$A_0 = (a_N(l_i^{(2)} l_j, l_p^{(2)} l_q)), (i, j) \in I \text{ et } (p, q) \in I,$$

et

$$A_k = (a_{k,N}(l_i^{(2)} l_j, l_p^{(2)} l_q)), (i, j) \in I^* \text{ et } (p, q) \in I^*.$$

où

$$\begin{aligned} a_{k,N}(l_i^{(2)} l_j, l_p^{(2)} l_q) &= \frac{d-c}{2} \delta_{qq'} \rho_q \beta_{pp'} + \frac{2}{d-c} \left(\frac{d-a}{2}\right)^2 \delta_{pp'} \omega_q \alpha_{qq'} \\ &+ k^2 \frac{d-c}{2} \frac{\delta_{qq'} \cdot \delta_{pp'}}{(1+\zeta_p)^2} \omega_p \rho_q, \end{aligned}$$

(Voir Annexe 1), pour les détails.

Les vecteurs $F_k^* = (F_{k,p,q}^*)$, $(p, q) \in I^*$ (resp $(p, q) \in I$ si $k = 0$), sont donnés par

$$\begin{aligned} F_{k,p,q}^* &= \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \left(\frac{d-c}{2}\right) f_{K,p,q}^k \omega_p \rho_q - \sum_{(i,j) \in B} g_{K,i,j}^k a_{k,N}(l_i^{(2)} l_j, l_p^{(2)} l_q), \\ f_K^k(\zeta_p, \xi_q) &= f_{K,p,q}^k = \frac{\sqrt{2\pi}}{2K+1} \sum_{|l| \leq K} \check{f}(\zeta_p, \theta_l, \xi_q) e^{-ik\theta_l}, \\ g_K^k(\zeta_p, \xi_q) &= g_{K,p,q}^k = \frac{\sqrt{2\pi}}{2K+1} \sum_{|l| \leq K} \check{g}(\zeta_p, \theta_l, \xi_q) e^{-ik\theta_l} \text{ où } \theta_l = \frac{2l\pi}{2K+1}. \end{aligned}$$

Cas d'un domaine décomposé $\Omega = \bigcup_{\ell=1}^L \Omega_\ell$

Le système globale est de la forme

$$A_k U_k = F_k \quad (2.6.1)$$

où U^k est constitué par les valeurs de u^k sur la grille des nœuds, privées de ceux existant sur la surface Γ . En pratique, on numérote les degrés de liberté de façon à disposer, dans l'ordre, les nœuds internes ($1 \leq \ell \leq L$, $(N_\ell - 1)^2$ points sur chaque Ω_ℓ), et puis les nœuds frontières (moins de $4(N_1 + N_2 + \dots + N_L)$ points). On a

$$A_k = \begin{pmatrix} A_{k,1} & 0 & \dots & 0 & B_{k,1} \\ 0 & A_{k,2} & \dots & 0 & B_{k,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & A_{k,L} & B_{k,L} \\ C_{k,1} & C_{k,2} & \dots & C_{k,L} & D_k \end{pmatrix} \quad (2.6.2)$$

Où $A_{k,\ell}$ représente la matrice qui agit sur les nœuds internes pour chaque Ω_ℓ . $B_{k,\ell}$ et $C_{k,\ell}$ et D_k représentent les matrices qui agissent sur la squelette \mathcal{S} .

2.6.2 La matrice des joints

On note Q la matrice qui traduit la condition de transmission aux interfaces des sous-domaines. Elle permet de purger le vecteur des inconnues des faux degrés de liberté (les nœuds esclaves). Le calcul de cette matrice est purement local pour chaque paire de côtés. Le calcul des valeurs de v_δ aux nœuds spectraux d'une arête Γ^ℓ , $1 \leq k \leq K$, $1 \leq \ell \leq 4$, ne dépend que de la connaissance de ϕ/γ^m (voir annexe 2). Pour pouvoir exprimer le système approché total sous forme matricielle (bien qu'elle ne soit jamais explicitement construite), on introduit une matrice de couplage global. Celle ci appliquée au vecteur des degrés d

e liberté nous donne le vecteur des inconnues admissibles.

Notons que le système linéaire (2.6.1) est à matrice A^k symétrique définie positive. On le résout par un algorithme de gradient conjugué. Mais on ne résout pas le système (2.6.1) parce qu'il comporte de faux degrés de liberté qui sont les valeurs de la solution aux nœuds dits esclaves. Ces nœuds sont éliminés par l'action de la matrice Q^T . Le système global qu'on résout est alors :

$$(Q^T A_k Q) \bar{u}^k = Q^T F_k. \quad (2.6.3)$$

2.6.3 Mise en œuvre de l'Algorithme de Strang et Fix

Le problème $\hat{a}_\delta(\hat{u}_\delta, \hat{v}_\delta) = (\mathcal{I}_\delta f, \hat{v}_\delta)_\delta$ s'écrit sous forme matricielle

$$\hat{A} \hat{U}_\delta = F \quad (2.6.4)$$

La matrice \hat{A} a la forme suivante :

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} A & K \\ M & J \end{pmatrix}$$

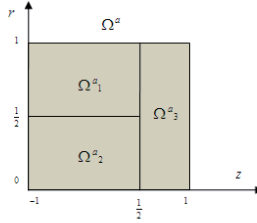


FIGURE 2.4 – Domaine Ω^a

où la matrice A est décrite dans (2.6.2 pour $k = 0$),

La matrice K est formée d'éléments $\chi_\ell \int_{\Omega_\ell} \nabla S_1 \nabla l_i^{(2)} l_j d\tau$, où $\chi_\ell = 1$ si la singularité est contenu dans Ω_ℓ et 0 sinon. La matrice M est formé d'éléments $\chi_\ell \int_{\Omega_\ell} \nabla S_1 \nabla l_i^{(2)} l_j d\tau$ et enfin la matrice J est l'élément $\int_{\Omega_\ell} (\nabla S_1)^2 d\tau$, voir [31, Chapitre III].

2.7 Résultats numériques

Dans cette section, on va présenter des testes numériques qui confirmeraient nos prédictions théoriques dans les cas axisymétrique et général. Ces tests seront faits sur trois types de domaines convexes ou non $\Omega^a, \Omega^b, \Omega^c$. chacun des domaines est décomposé en sous domaines convexes ce qui nous permettra de mettre en évidence la convergence de la méthode des joints.

2.7.1 Cas axisymétrique

Domaine convexe Ω^a :

On considère le carré de la figure (2.4), décomposé en trois sous domaines $\Omega_1^a, \Omega_2^a, \Omega_3^a$.

Pour une première série de tests, on suppose que :

$$g = \begin{cases} f = 0 & \text{dans } \Omega^a \\ r^{5/2} & \text{si } z = \pm 1 \\ r & \text{si } r = 1. \end{cases}$$

On présente dans la figure 2.5 d'une part le tracé de u dans les parties Ω_1^a avec $N = 24$, resp Ω_2^a avec $N = 28$ et Ω_3^a avec $N = 24$ ensemble. Et d'autre part le tracé de la solution u obtenue de manière globale sans décomposition de domaines.

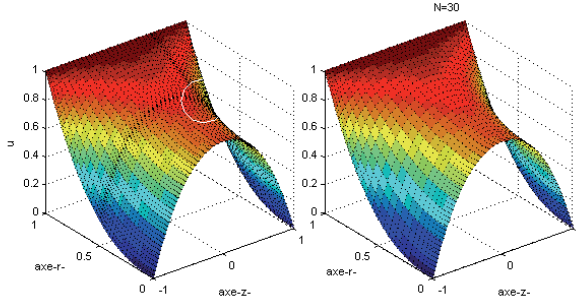


FIGURE 2.5 – Tracé de la fonction u avec et sans décomposition de domaine.

La figure 2.6 représente les isovaleurs de la solution u avec $N = 24$ dans les trois sous domaines.

La figure 2.7 représente un agrandissement de la partie encadrée de la figure 2.5.

Commentaire : pour ce premier cas on remarque que pour N assez grand les trois parties dans la figure 2.7 collent parfaitement et que les lignes des isovaleurs dans la figure 2.6 sont continues à travers les interfaces.

Domaine non convexe Ω^b :

On considère maintenant le domaine de la figure 2.8 décomposé en 5 sous domaines : Dans un premier test, on considère les fonctions f et g données par :

$$\begin{cases} f = r^{1/2}(z^2 + \frac{8}{25}r^2 - 1) & \text{dans } \Omega^b \\ g = \begin{cases} 0 & \text{si } z = \pm 1 \\ \frac{4}{25}r^{5/2}(1 - z^2) & \text{sinon} \end{cases} \end{cases}$$

On présente dans la figure 2.9 le tracé de u dans les parties Ω_1^b avec $N = 24$, Ω_2^b avec $N = 28$, Ω_3^b avec $N = 24$, Ω_4^b avec $N = 24$, et Ω_5^b avec $N = 24$ ensemble.

Ensuite on représente dans la figure 2.10, les isovaleurs de u avec $N = 24$.

Enfin l'agrandissement de la partie encadrée de la figure 2.9 est présenté sur la figure 2.11.

On fait un second test, avec :

$$\begin{cases} f = r^{1/2}z & \text{dans } \Omega^b \\ g = 0 & \text{sur le bord } \partial\Omega^b \end{cases}$$

On présente dans la figure 2.12 le tracé de u dans les parties Ω_1^b avec $N = 28$, Ω_2^b avec $N = 30$, Ω_3^b avec $N = 30$, Ω_4^b avec $N = 30$, et Ω_5^b avec $N = 24$ ensemble.

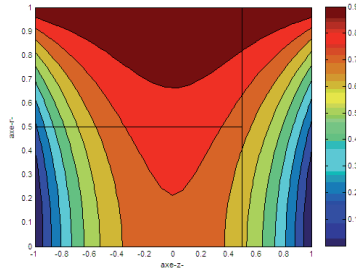


FIGURE 2.6 – Domaine Ω^a : isovaleurs de u pour $N = 24$.

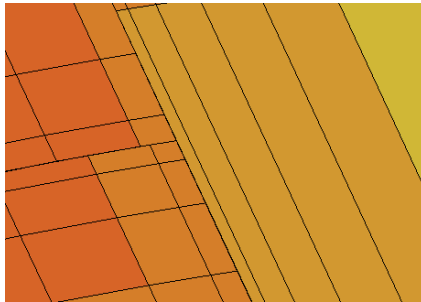


FIGURE 2.7 – Domaine Ω^a : agrandissement de la partie de raccord

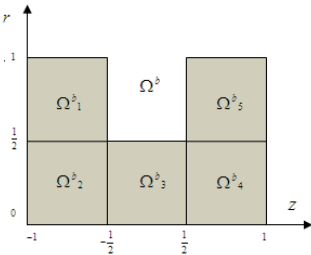


FIGURE 2.8 – Domaine Ω^b

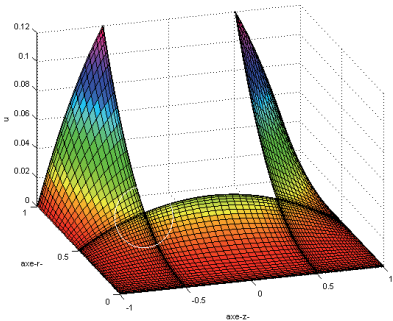


FIGURE 2.9 – Domaine Ω^b : tracé de la fonction u

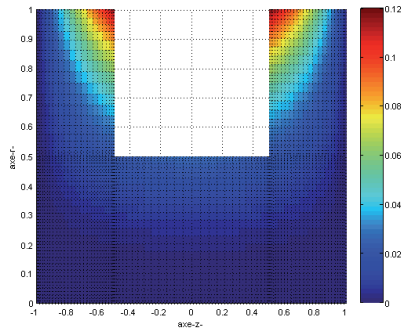


FIGURE 2.10 – Isovaleurs de la courbe u

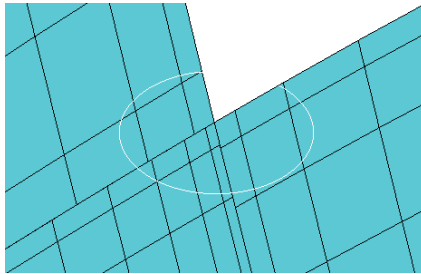


FIGURE 2.11 – Domaine Ω^b : agrandissement de la partie de raccord

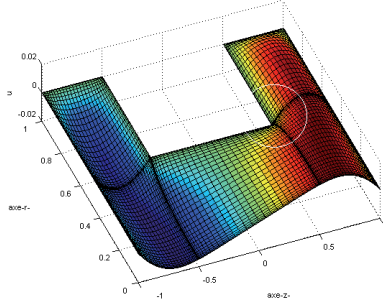


FIGURE 2.12 – Domaine Ω^b : tracé de la fonction u

Ensuite on représente dans la figure 2.13, les isovalues de u avec $N = 28$ sur les 5 sous domaines, et l'agrandissement de la partie encadrée de la figure 2.12 sur la figure 2.14.

Commentaire des deux cas : on remarque que tant qu'on choisit les N_i dans chaque domaine de telle sorte, que λ_δ défini dans (2.3.25) ne soit pas grand alors les tracés dans les différentes parties du domaine collent parfaitement et les figures 2.12 et 2.13 montrent la continuité dans la répartition des couleurs à travers les interfaces.

Domaine non convexe Ω^c

On considère le domaine non convexe de la figure 2.15 décomposé en cinq sous domaines $\Omega_1^c - \Omega_5^c$. On considère les fonctions f et g suivantes :

$$\begin{cases} f = r^{1/3}(r - 0.245)z & \text{dans } \Omega^c \\ g = \begin{cases} 0.045z & \text{si } r = 1. \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \end{cases}$$

On représente dans la figure 2.16 le tracé de u dans les parties $\Omega_1^c - \Omega_5^c$ avec $N = 24$ sur Ω_1^c, Ω_3^c et Ω_5^c et $N = 20$ sur Ω_2^c, Ω_4^c .

Dans la figure 2.17 on illustre les isovalues de u , avec $N = 24$ sur Ω_1^c, Ω_3^c et Ω_5^c et $N = 20$ sur Ω_2^c, Ω_4^c .

Commentaire : on remarque qu'on a choisi la fonction de bord g discontinue, et on obtient un bon résultat.

Mesures de l'erreur

1) Soit la fonction singulière $u = r^{10/3}(z - 1)$. Dans le tableau suivant, on mesure les erreurs $\|u - u_\delta\|_{L^2(\hat{\Omega})}$, $\|u - u_\delta\|_{H^1(\cup \hat{\Omega}_i)}$ sur le domaine de référence $\hat{\Omega}$ sans

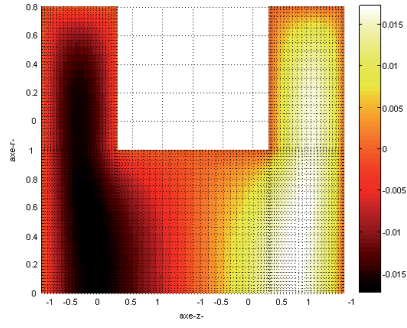


FIGURE 2.13 – Isovaleurs de u avec ($N = 28$).

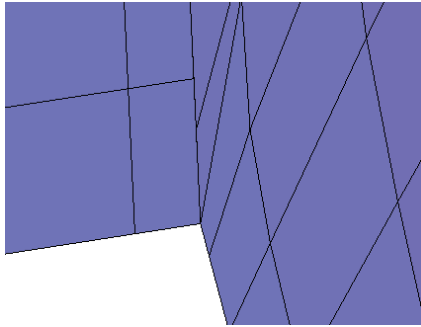


FIGURE 2.14 – Domaine Ω^b : agrandissement de la partie de raccord

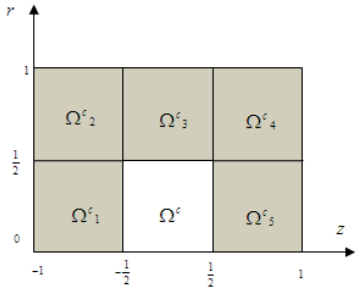


FIGURE 2.15 – Domaine Ω^c

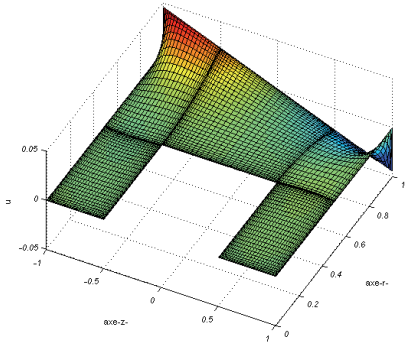


FIGURE 2.16 – Tracé de la fonction u

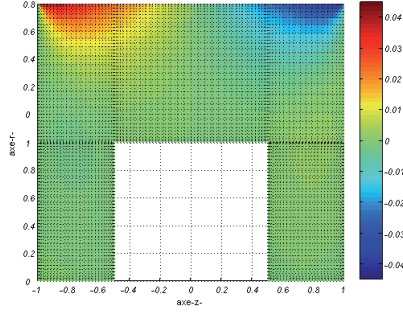


FIGURE 2.17 – Isovaleurs de u

décomposition.

N	Norme $L^2(\tilde{\Omega})$	Norme $H^1(\cup\tilde{\Omega}_\ell)$
8	1.478×10^{-6}	2.0354×10^{-5}
16	2.077×10^{-8}	4.0009×10^{-7}
24	1.568×10^{-9}	3.6931×10^{-8}
36	1.012×10^{-10}	2.8021×10^{-9}
48	1.568×10^{-11}	4.5421×10^{-10}

Dans la figure 2.18, on donne les courbes $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega})})$ et $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{H^1(\cup\tilde{\Omega}_\ell)})$.

Commentaire : on remarque que dès que N atteint 48 on a une erreur de u de l'ordre 10^{-11} en norme L^2 et de l'ordre de $4 \cdot 10^{-10}$, en effet la méthode spectrale est connue par sa précision.

Dans la figure 2.18, on remarque des droites, ceci est en accord avec les estimations (2.3.53) et (2.3.58).

2) Deuxième test : $u = r^{7/2}z$. On mesure dans le tableau suivant les erreurs $\|u - u_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega})}$ et $\|u - u_\delta\|_{H^1(\cup\tilde{\Omega}_\ell)}$ sur le domaine de référence $\tilde{\Omega}$.

N	Norme $L^2(\tilde{\Omega})$	Norme $H^1(\cup\tilde{\Omega}_\ell)$
8	$2,7348 \times 10^{-7}$	$5,667 \times 10^{-6}$
16	$3,1957 \times 10^{-9}$	$8,9067 \times 10^{-8}$
24	$2,1294 \times 10^{-10}$	$7,2774 \times 10^{-9}$
36	$1,3589 \times 10^{-11}$	$5,6555 \times 10^{-10}$
48	$1,9073 \times 10^{-12}$	$9,0036 \times 10^{-11}$

Ce tableau montre que le taux de convergence se comporte comme cN^{-7} , ce qui nous

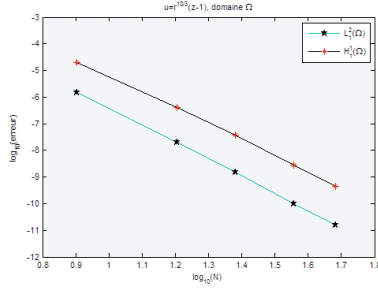


FIGURE 2.18 – Courbes d’erreur

donne un doublement de l’ordre de convergence. Ce résultat est conforme aux prédictions théoriques (voir les estimations d’erreur : cas des fonctions singulières section 3.2.4). On calcule les erreurs $\|u - u_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega}_i^a)}$ et $\|u - u_\delta\|_{H^1(\tilde{\Omega}_i^a)}$ ($i = 1, \dots, 3$), sur le domaine $\tilde{\Omega}^a$:

N	sur $\tilde{\Omega}_1^a$		sur $\tilde{\Omega}_2^a$	
	$L^2(\tilde{\Omega}_1^a)$	$H^1(\tilde{\Omega}_1^a)$	$L^2(\tilde{\Omega}_2^a)$	$H^1(\tilde{\Omega}_2^a)$
8	$9,0121 \times 10^{-8}$	$1,0331 \times 10^{-7}$	$1,2588 \times 10^{-7}$	$2,2035 \times 10^{-6}$
16	$5,3549 \times 10^{-10}$	$2,0154 \times 10^{-9}$	$1,1877 \times 10^{-9}$	$3,3670 \times 10^{-8}$
24	$7,0543 \times 10^{-12}$	$4,2049 \times 10^{-10}$	$7,7155 \times 10^{-11}$	$3,0130 \times 10^{-9}$
36	$5,1530 \times 10^{-13}$	$3,3548 \times 10^{-12}$	$7,5280 \times 10^{-13}$	$4,3511 \times 10^{-11}$
48	$2,0130 \times 10^{-14}$	$4,2030 \times 10^{-13}$	$1,0570 \times 10^{-13}$	$6,8820 \times 10^{-12}$
sur $\tilde{\Omega}_3^a$				
N	$L^2(\tilde{\Omega}_3^a)$		$H^1(\tilde{\Omega}_3^a)$	
8	$2,0140 \times 10^{-7}$		$5,2191 \times 10^{-6}$	
16	$2,3675 \times 10^{-9}$		$2,0346 \times 10^{-7}$	
24	$7,0327 \times 10^{-11}$		$3,1247 \times 10^{-9}$	
36	$4,1342 \times 10^{-12}$		$4,3644 \times 10^{-10}$	
48	$2,8920 \times 10^{-13}$		$2,4516 \times 10^{-11}$	

Commentaire : on donne les estimations sur chaque sous domaine, les estimations d’erreur dépendent aussi des dimensions de chaque domaine en plus de N .

2.7.2 Algorithme de Strang et Fix

On considère la fonction exacte $u = r^{2.1}z$ et on utilise l’algorithme de Strang et Fix sur le domaine $\tilde{\Omega}^b$. On remarque alors une nette amélioration des erreurs sur les courbes $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_{\text{exp}}\|_{L^2(\tilde{\Omega}^b)})$ et $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_{\text{exp}}\|_{H^1(\tilde{\Omega}^b)})$, comme

le montre les figures 2.19 et 2.20.

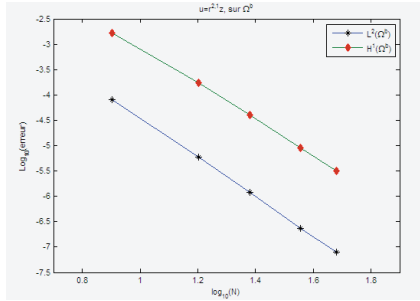


FIGURE 2.19 – Courbes d'erreur de u sans l'algorithme de Strang et Fix

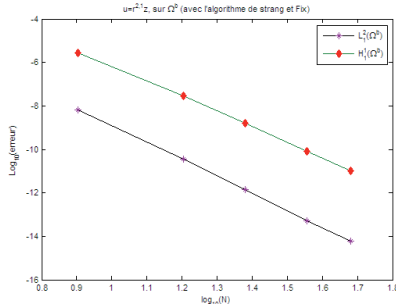


FIGURE 2.20 – Courbes d'erreur de u avec l'algorithme de Strang et Fix

Cette nette amélioration, coïncide bien avec les résultats théoriques prouvés dans le chapitre II

2.7.3 Cas général

Cas du domaine $\Omega = [0, 1] \times [-1, 1]$

Dans le domaine de référence Ω , on considère le cas où

$$\begin{cases} f = r^3 z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & \text{dans } \Omega \\ g = 0 & \text{sur } \Gamma. \end{cases}$$

On représente alors pour $(N = 30, K = 4)$, le tracé de u^0 resp $Re(u^{12})$ et $Re(u^2)$ sur les figures 2.21 resp 2.22 et 2.23.

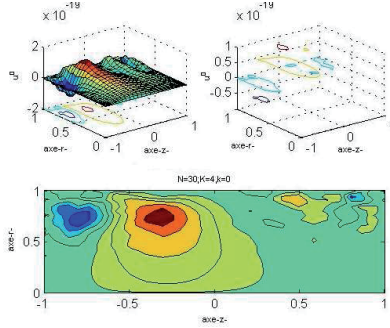


FIGURE 2.21 – Tracé de la fonction u^0

Domaine Ω^a

On considère le domaine Ω^a de la figure 2.4. On prend

$$\begin{cases} f = r^{7/2} z \sin(x + y) & \text{dans } \Omega^a \\ g = 0 & \text{sur } \Gamma \end{cases}$$

On présente dans la figure 2.24 le tracé de u^0 dans les parties Ω_1^a avec $N = 24$ et $K = 6$, Ω_2^a avec $N = 24$ et $K = 6$, Ω_3^a avec $N = 24$ et $K = 6$ ensemble d'une part et d'autre part le tracé de u^0 sans décomposition de domaine.

On représente ensuite dans la figure 2.25 les isovaleurs de u^0 avec $N = 24$ et $K = 6$.

On présente dans la figure 2.26 le tracé de $Re(u^1)$ dans les parties Ω_1^a avec $N = 24$ et $K = 6$, Ω_2^a avec $N = 28$ et $K = 6$, Ω_3^a avec $N = 28$ et $K = 6$ ensemble d'une part et d'autre part le tracé de $Re(u^1)$ sans décomposition de domaine.

On représente ensuite les isovaleurs de $Re(u^1)$ sur la figure 2.27 avec $N = 24$ et $K = 6$.

Pour $K = 6$, on présente dans la figure 2.28 le tracé de u^2 dans les parties Ω_1^a avec $N = 24$, Ω_2^a avec $N = 28$, Ω_3^a avec $N = 28$ ensemble d'une part et d'autre part le tracé de u^2 sans décomposition de domaine.

Remarque 2.7.1 La solution u^k , $k \neq 0$ est complexe c'est pourquoi on précise dans les figures $Re(u^k)$ ou bien $Im(u^k)$.

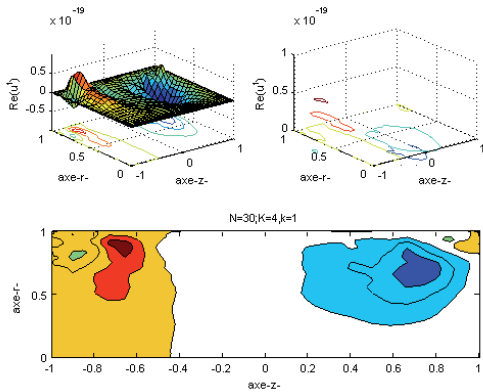


FIGURE 2.22 – Tracé de la fonction $Re(u^1)$

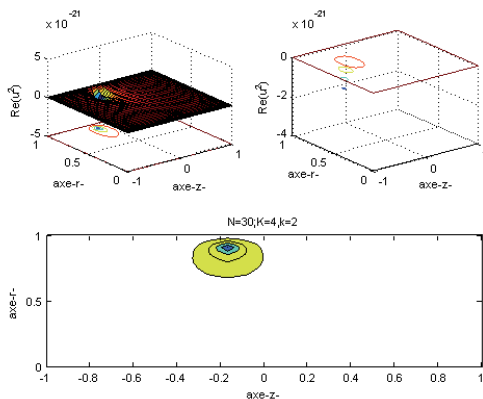


FIGURE 2.23 – Tracé de la fonction $Re(u^2)$

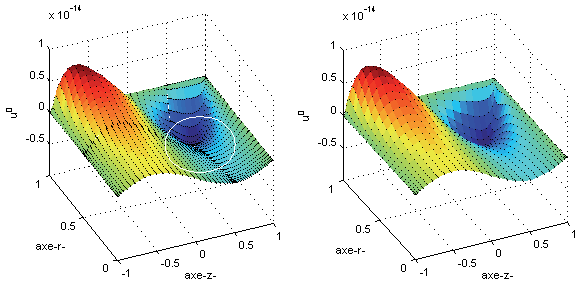


FIGURE 2.24 – Tracé de la fonction u^0 avec et sans décomposition de domaine.

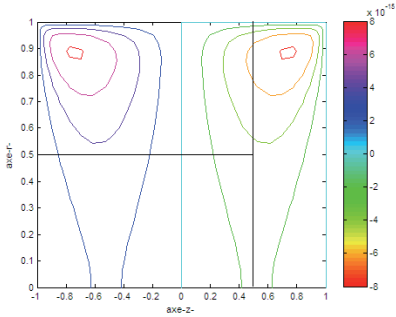


FIGURE 2.25 – Isovaleurs de u^0

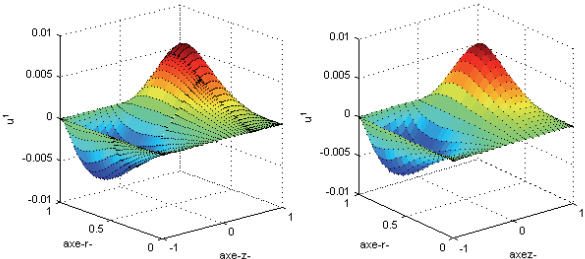


FIGURE 2.26 – Tracé de la fonction $Re(u^1)$

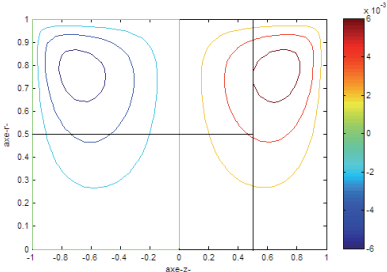


FIGURE 2.27 – Isovaleurs de $Re(u^1)$

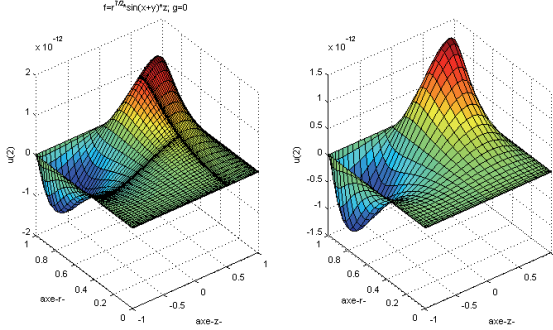


FIGURE 2.28 – Tracé de la fonction u^2

Domaine Ω^b :

On considère les fonctions :

$$\begin{cases} f = \cos(x + y + z) & \text{dans } \Omega^b \\ g = 0 & \text{sur } \Gamma \end{cases}$$

Pour $K = 4$, on représente dans la figure 2.29 le tracé de u^0 dans les parties Ω_1^b avec $N = 20$, Ω_2^b avec $N = 30$, Ω_3^b avec $N = 30$, Ω_4^b avec $N = 30$ et Ω_5^b avec $N = 20$.

On représente dans la figure 2.30, les isovaleurs de u^0 avec $N = 24$.

Pour $K = 4$, on représente dans la figure 2.31 le tracé de $Re(u^1)$ dans les parties Ω_1^b avec $N = 24$, Ω_2^b avec $N = 20$ et Ω_3^b, Ω_4^b avec $N = 30$.

On représente dans la figure 2.32, les isovaleurs de $Re(u^1)$ avec $N = 24$.

Mesures de l'erreur

Cas du domaine $\Omega = [0, 1] \times [-1, 1]$. 1) On considère la fonction régulière $u = xz$. On remarque une convergence en 10^{-15} , pour $K = 2$ dès que $N = 5$.

2) On considère ensuite la fonction singulière :

$$u = (x^2 + 1)^{7/3} z^2 \sin y$$

On choisit K le plus proche de $\log(N)$, on calcule les erreurs $\|u - u_\delta\|_{L^2(\Omega)}$ et $\|u - u_\delta\|_{H^1(\cup\Omega_\delta)}$

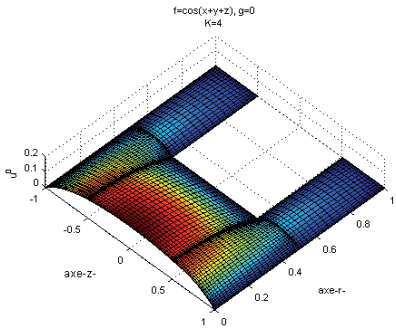


FIGURE 2.29 – Tracé de la fonction u^0

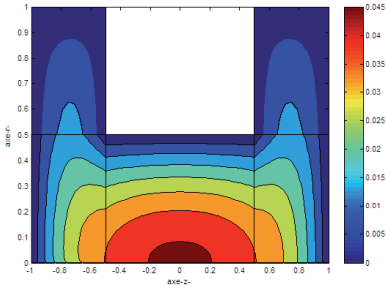


FIGURE 2.30 – Isovaleurs de u^0

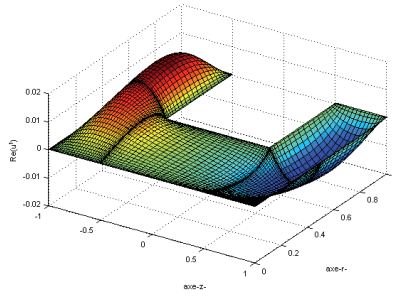


FIGURE 2.31 – Tracé de la fonction $Re(u^1)$

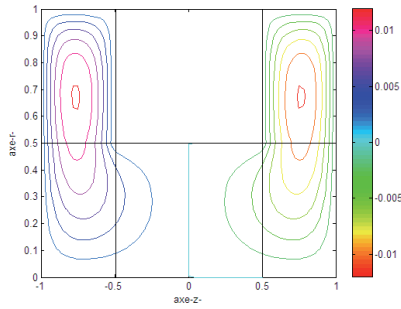


FIGURE 2.32 – Isovaleurs de $Re(u^1)$

N	K	Norme $L^2(\tilde{\Omega})$	Norme $H^1(\cup \tilde{\Omega}_\ell)$
8	2	1.296×10^{-3}	8.106×10^{-2}
16	3	5.054×10^{-4}	3.550×10^{-3}
24	3	5.054×10^{-4}	3.550×10^{-3}
36	4	7.046×10^{-6}	6.410×10^{-5}
48	4	7.046×10^{-6}	6.410×10^{-5}

Domaine $\tilde{\Omega}^a$ Soit la fonction singulière $u = r^{7/3}(\cos^2 \theta + \sin \theta)$, on fixe $K = 3$. Les calculs des normes $\|u - u_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega}_i^a)}$, $\|u - u_\delta\|_{H^1(\tilde{\Omega}_i^a)}$ ($i = 1, \dots, 3$), sur le domaine $\tilde{\Omega}^a$ donne :

N	sur $\tilde{\Omega}_1^a$		sur $\tilde{\Omega}_2^a$	
	$L^2(\tilde{\Omega}_1^a)$	$H^1(\tilde{\Omega}_1^a)$	$L^2(\tilde{\Omega}_2^a)$	$H^1(\tilde{\Omega}_2^a)$
8	$2,0141 \times 10^{-7}$	$2,8068 \times 10^{-5}$	$1,7973 \times 10^{-6}$	$2,8068 \times 10^{-5}$
16	$3,1212 \times 10^{-8}$	$1,2380 \times 10^{-6}$	$8,1056 \times 10^{-8}$	$1,9875 \times 10^{-6}$
24	$1,2093 \times 10^{-9}$	$4,0938 \times 10^{-7}$	$1,2093 \times 10^{-8}$	$4,0938 \times 10^{-7}$
36	$1,4203 \times 10^{-10}$	$5,1421 \times 10^{-8}$	$1,7504 \times 10^{-9}$	$8,3975 \times 10^{-8}$
48	$1,0012 \times 10^{-11}$	$2,4571 \times 10^{-9}$	$1,2001 \times 10^{-10}$	$3,2140 \times 10^{-9}$
sur $\tilde{\Omega}_3^a$				
N	$L^2(\tilde{\Omega}_3^a)$		$H^1(\tilde{\Omega}_3^a)$	
8	$1,0986 \times 10^{-6}$		$2,1212 \times 10^{-5}$	
16	$3,2674 \times 10^{-8}$		$1,5887 \times 10^{-6}$	
24	$4,3161 \times 10^{-9}$		$2,9994 \times 10^{-7}$	
36	$5,8363 \times 10^{-10}$		$5,3171 \times 10^{-8}$	
48	$2,1047 \times 10^{-11}$		$2,1540 \times 10^{-9}$	

Commentaire : on remarque que pour un choix K qui n'est pas très élevé on trouve une très bonne précision pour $N = 48$. En effet le s dans l'estimation (2.5.7), ne dépend que de la régularité de u . Ce qui montre que notre choix de prendre $K \leq N_\delta$ dans les estimations ne gêne absolument pas les résultats numériques.

Domaine $\tilde{\Omega}^b$ Pour la fonction singulière $u = (x - y)(x^2 + y^2)^{5/4}$, on fixe $K = 4$ et on donne les courbes $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega}^b)})$ et $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{H^1(\tilde{\Omega}^b)})$ sur la figure 2.33.

Commentaire : dans ces estimations d'erreur, on a aussi des droites, et ceci est en parfait accord avec les estimations théoriques (2.5.7) et (2.5.17).

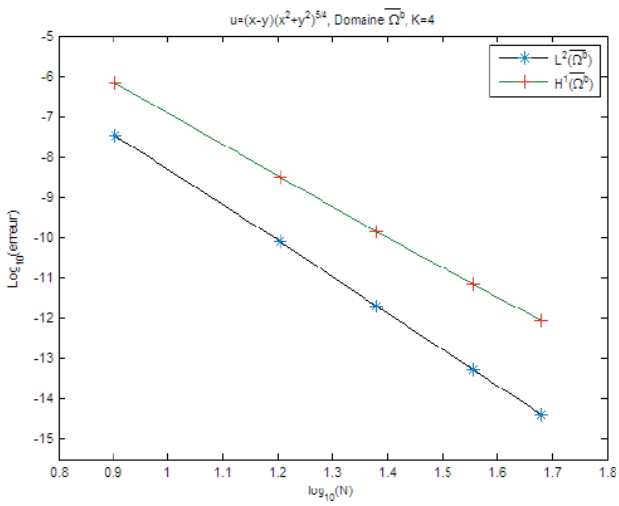


FIGURE 2.33 – Courbe d'erreur

Discrétisation du problème de Stokes par la méthode des joints

Sommaire

3.1	Introduction	115
3.2	Cas axisymétrique	115
3.2.1	Problème continu	115
3.2.2	Problème discret	116
3.2.3	Estimation de l'erreur	120
3.2.4	Estimations d'erreur : cas avec singularités	134
3.3	Cas général	137
3.3.1	Problème continu	137
3.3.2	Problème discret	138
3.3.3	Estimation d'erreurs	141
3.4	Retour au problème tridimensionnel	147
3.4.1	Algorithme de Strang et Fix	152
3.4.2	Estimation de l'erreur	154
3.5	Ecriture matricielle du problème de Stokes	156
3.5.1	Dans un cylindre de référence	156
3.5.2	Dans un domaine décomposé	158

3.5.3	La matrice des joints	159
3.5.4	L'algorithme d'Uzawa	159
3.6	Résultats numériques	159
3.6.1	Cas axisymétrique	159
3.6.2	Cas général	171

3.1 Introduction

Le problème de Stokes régit l'écoulement lent d'un fluide visqueux incompressible dans un domaine donné. Pour un domaine tridimensionnel $\tilde{\Omega}$, il s'écrit

$$\begin{cases} -\Delta \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{grad} \tilde{p} = \tilde{\mathbf{f}} & \text{dans } \tilde{\Omega}, \\ \operatorname{div} \tilde{\mathbf{u}} = 0 & \text{dans } \tilde{\Omega}, \\ \tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{g}} & \text{sur } \partial\tilde{\Omega}. \end{cases} \quad (3.1.1)$$

où $\tilde{\mathbf{u}}(x)$ est la vitesse du fluide et $\tilde{p}(x)$ est la pression hydrostatique au point $x = (x, y, z)$.

On suppose que $\tilde{\Omega}$ est axisymétrique comme décrit au chapitre I et on utilise les coordonnées cylindriques pour les vecteurs $\tilde{\mathbf{u}}$, $\tilde{\mathbf{f}}$ et $\tilde{\mathbf{g}}$.

Dans le cas de données axisymétriques, où $\tilde{\mathbf{f}} = (f_r, f_\theta, f_z)$ et $\tilde{\mathbf{g}} = (g_r, g_\theta, g_z)$ sont indépendantes de θ , ce problème tridimensionnel se réduit à deux problèmes bidimensionnels non couplés. Un premier problème où l'inconnue est la composante u_θ de la vitesse $\tilde{\mathbf{u}}$ et un second problème où les inconnues sont les composantes u_r et u_z de $\tilde{\mathbf{u}}$ et la pression p .

Dans le cas de données non axisymétriques, le problème de Stokes est équivalent à une famille de problèmes bidimensionnels en coefficients de Fourier $(u_r^k, u_\theta^k, u_z^k, p^k)$ de la solution $(\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{p})$.

3.2 Cas axisymétrique

3.2.1 Problème continu

Pour des données $\tilde{\mathbf{f}} = (f_r, f_\theta, f_z)$ et $\tilde{\mathbf{g}} = (g_r, g_\theta, g_z)$ le problème (3.1.1) se décompose sous forme de deux problèmes découplés :

$$\begin{cases} -\partial_r^2 u_\theta - \frac{1}{r} \partial_r u_\theta - \partial_z^2 u_\theta + \frac{1}{r^2} u_\theta = f_\theta & \text{dans } \Omega \\ u_\theta = g_\theta & \text{sur } \Gamma \end{cases} \quad (3.2.1)$$

et

$$\begin{cases} -\partial_r^2 u_r - \frac{1}{r} \partial_r u_r - \partial_z^2 u_r + \partial_r p = f_r & \text{dans } \Omega \\ -\partial_r^2 u_z - \frac{1}{r} \partial_r u_z - \partial_z^2 u_z + \partial_z p = f_z & \text{dans } \Omega \\ \partial_r u_r + \frac{1}{r} u_r + \partial_z u_z = 0 & \text{dans } \Omega \\ (u_r, u_z) = (g_r, g_z) & \text{sur } \Gamma \end{cases} \quad (3.2.2)$$

où (u_r, u_z, u_θ) sont les coordonnées cylindriques de \check{u} . Le problème (3.2.1) est du type Laplace et est traité dans le chapitre précédent.

La formulation variationnelle du problème (3.2.2), s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trouver } (u_r, u_z, p) \text{ dans } V_1^1(\Omega) \times H_1^1(\Omega) \times L_1^2(\Omega), \\ \text{avec } u_r - g_r \text{ dans } V_{1\circ}^1(\Omega) \text{ et } u_z - g_z \text{ dans } H_{1\circ}^1(\Omega), \text{ tel que} \\ \forall (v_r, v_z) \in V_{1\circ}^1(\Omega) \times H_{1\circ}^1(\Omega), \\ a_1(u_r, v_r) + a(u_z, v_z) + b(v_r, v_z; p) = \langle f_r, v_r \rangle + \langle f_z, v_z \rangle \\ \forall q \in L_1^2(\Omega), b(u_r, u_z; q) = 0, \end{array} \right. \quad (3.2.3)$$

Les espaces $V_{1\circ}^1(\Omega)$ et $H_{1\circ}^1(\Omega)$ sont définis dans (1.6.13) et (1.6.16). Les formes $a(\cdot, \cdot)$ et $a_1(\cdot, \cdot)$ sont définies dans (2.3.1) et (2.4.4) avec $k = 1$. La forme $b(v_r, v_z; p)$ est définie par :

$$b(v_r, v_z; p) = - \int_{\Omega} q(\partial_r v_r + \frac{1}{r}v_r + \partial_z v_z) r dr dz.$$

On rappelle l'espace

$$\mathbb{V}(\Omega) = \{ (v_r, v_z) \in V_{1\circ}^1(\Omega) \times H_{1\circ}^1(\Omega); \forall q \in L_1^2(\Omega), b(v_r, v_z; q) = 0 \}, \quad (3.2.4)$$

qui est en fait l'ensemble de (v_r, v_z) qui vérifient $\partial_r v_r + \frac{1}{r}v_r + \partial_z v_z = 0$ dans Ω . On note

$$\mathcal{A}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = a_1(u_r, v_r) + a(u_z, v_z).$$

avec $\mathbf{u} = (u_r, u_z)$ et $\mathbf{v} = (v_r, v_z)$.

Le problème (3.2.3) admet alors une solution unique [8, Chapitre IX].

3.2.2 Problème discret

On suppose que Ω est décomposé en L sous-domaines $\Omega_\ell : \Omega = \bigcup_{\ell=1}^L \Omega_\ell$ et on utilise, comme dans le chapitre précédent, des polynômes de degrés différents dans chaque sous-domaine Ω_ℓ pour définir nos espaces discrets. On note δ le L-uplets $(N_\ell)_{1 \leq \ell \leq L}$, $N_\ell \geq 2$. On rappelle l'espace discret $X_\delta(\Omega)$ introduit dans (2.3.8) donné par :

$$\begin{aligned} X_\delta(\Omega) &= \{ v_\delta \in L_1^2(\Omega) \text{ tels que } v_{\delta|\Omega_\ell} = v_\ell \in \mathbb{P}_{N_\ell}(\Omega_\ell), \\ &\quad v_{\ell|\Gamma^{\ell,j}} = \phi_{|\gamma_\mu^+} \text{ si } (\ell, j) = (\ell(\mu), j(\mu)), \\ &\quad \int_{\Gamma^{\ell,j}} (v_\ell - \phi)(\tau) \psi(\tau) d\tau = 0, \forall \psi \in \mathbb{P}_{N_\ell-2}(\Gamma^{\ell,j}), 1 \leq j \leq 4 \text{ et } 1 \leq \ell \leq L \text{ si} \\ &\quad (\ell, j) \neq (\ell(\mu), j(\mu)) \}. \end{aligned}$$

On rappelle ensuite

$$\begin{aligned} X_\delta^\circ(\Omega) &= \{ v_\delta \in X_\delta(\Omega) \text{ tels que } v_\delta = 0 \text{ sur } \Gamma \}, \\ X_\delta^*(\Omega) &= \{ v_\delta \in X_\delta(\Omega), v_\ell = v_{\delta|\Omega_\ell} \in L_{-1}^2(\Omega_\ell), 1 \leq \ell \leq L \}, \\ X_\delta^\circ(\Omega) &= X_\delta^\circ(\Omega) \cap X_\delta^*(\Omega). \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

On remarque que l'espace $X_\delta^*(\Omega)$ est constitué des fonctions de $X_\delta(\Omega)$ qui s'annulent sur Γ_0 . Pour la pression discrète, on considère l'espace

$$M_\delta = \{p_\delta \in L_1^2(\Omega) \mid p_\ell = p|_{\Omega_\ell} \in \mathbb{P}_{N_\ell-2}(\Omega_\ell) \text{ et } \int_\Omega p_\delta(r, z) r dr dz = 0\}. \quad (3.2.6)$$

Cet espace ne contient pas de modes parasites puisqu'on a réduit le degré des pressions [8]. L'espace $X_\delta^*(\Omega)$ est muni de la norme induite

$$\|v_\delta\|_{X_1^*} = \left(\sum_{\ell=1}^L \|v_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Sur $X_\delta^*(\Omega)$, on définit la norme induite :

$$\|v_\delta\|_{X_*} = \left(\sum_{\ell=1}^L \|v_\ell\|_{V_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Remarque 3.2.1 d'après (2.4.3), on a $\|\cdot\|_{X_*} = \|\cdot\|_{X_1^*}$ pour $k = 1$.

On définit aussi sur chaque Ω_ℓ une formule de quadrature et un produit scalaire discret et on en déduit un produit scalaire sur Ω dont on rappelle l'expression. Pour φ et ψ dans $\bigcup_{\ell=1}^L C^0(\bar{\Omega}_\ell)$,

$$\begin{aligned} (\phi, \psi)_\delta &= \sum_{\ell=1}^{L_0} \sum_{i=0}^{N_\ell+1} \sum_{j=0}^{N_\ell} \phi|_{\Omega_\ell^i} (x_{ij}^k) \psi|_{\Omega_\ell^j} (x_{ij}^k) \omega_{ij}^k \\ &+ \sum_{\ell=L_0+1}^L \sum_{i,j=0}^{N_\ell} \phi|_{\Omega_\ell^i} (y_{ij}^\ell) \psi|_{\Omega_\ell^j} (y_{ij}^\ell) \xi_i^{(r), \ell} \rho_{ij}^\ell \end{aligned} \quad (3.2.7)$$

Les formes bilinéaires discrètes sont définies comme suit, pour u et $v \in \bigcup_{\ell=1}^L C^0(\bar{\Omega}_\ell)$ et nuls sur $r = 0$,

$$\begin{aligned} a_\delta(u, v) &= (\nabla u, \nabla v)_\delta \\ \text{et} \\ a_{1\delta}(u, v) &= a_\delta(u, v) + \left(\frac{u}{r}, \frac{v}{r}\right)_\delta \end{aligned}$$

et pour $\mathbf{w} = (u, v) \in \left\{ \bigcup_{\ell=1}^L C^0(\bar{\Omega}_\ell) \right\}^2$ et $q \in \bigcup_{\ell=1}^L C^0(\bar{\Omega}_\ell)$

$$b_\delta(\mathbf{w}, q) = -(\text{div}_r \mathbf{w}, q)_\delta$$

où l'opérateur div_r est donné par :

$$\text{div}_r \mathbf{w} = \partial_r u + \frac{1}{r} u + \partial_z v = \frac{1}{r} \partial_r (ru) + \partial_z v.$$

Soit \mathbb{Z}_δ l'espace défini par :

$$\mathbb{Z}_\delta = \{ \mathbf{w}_\delta = (u_\delta, v_\delta) \in \prod_{\ell=1}^L V_1^1(\Omega_\ell) \times \prod_{\ell=1}^L H_1^1(\Omega_\ell) \}.$$

On définit la norme produit $\|\cdot\|_{\mathbb{Z}}$ par :

$$\| \mathbf{w}_\delta \|_{\mathbb{Z}} = \| u_\delta \|_{\mathcal{X}_*} + \| v_\delta \|_{\mathcal{X}_1^1}. \quad (3.2.8)$$

On introduit \mathbf{Z}_δ l'espace produit $X_\delta^* \times X_\delta^\circ$, sur lequel on définit la norme induite $\|\cdot\|_{\mathbb{Z}}$.

Le problème discret associé au problème (3.2.1) s'écrit

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trouver } u_{\delta\theta} \in X_\delta^*(\Omega) \\ \text{tels que } u_{\delta\theta} - \mathcal{I}_\delta g_\theta \in X_\delta^\circ(\Omega) \\ \forall w_{\delta\theta} \in X_\delta^\circ(\Omega) \quad a_{1\delta}(u_{\delta\theta}, w_{\delta\theta}) = (\mathcal{I}_\delta f_\theta, w_{\delta\theta})_\delta, \end{array} \right. \quad (3.2.9)$$

et a fait le sujet du chapitre II.

Le problème discret associé au problème (3.2.2) s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trouver } (u_{\delta r}, u_{\delta z}, p_\delta) \in X_\delta^*(\Omega) \times X_\delta(\Omega) \times M_\delta(\Omega) \\ \text{tel que } u_{\delta r} - \mathcal{I}_\delta g_r \in X_\delta^\circ(\Omega) \text{ et } u_{\delta z} - \mathcal{I}_\delta g_z \in X_\delta^\circ(\Omega) \\ \forall \mathbf{w}_\delta = (w_{\delta r}, w_{\delta z}) \in X_\delta^\circ(\Omega) \times X_\delta^\circ(\Omega) \\ a_{1\delta}(u_{\delta r}, w_{\delta r}) + a_\delta(u_{\delta z}, w_{\delta z}) + b_\delta(\mathbf{w}_\delta, p_\delta) = (\mathcal{I}_\delta f_r, w_{\delta r})_\delta + (\mathcal{I}_\delta f_z, w_{\delta z})_\delta, \\ \text{et } \forall q_\delta \in M_\delta \\ b_\delta(\mathbf{u}_\delta, q_\delta) = 0, \end{array} \right. \quad (3.2.10)$$

Ce problème (3.2.10) se met dans le cadre abstrait de problèmes mixtes. Les ingrédients essentiels pour montrer qu'il soit bien posé sont la vérification d'une condition inf-sup pour la forme bilinéaire b_δ et sa continuité ainsi que la continuité et coercivité des formes $a_{1\delta}, a_\delta$. On rappelle que dans notre cas, il existe des constantes $\alpha, \alpha_1, \gamma, \gamma_1$ positives, telles que :

$$\begin{aligned} |a_\delta(u_\delta, v_\delta)| &\leq \alpha \|u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \|v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} \text{ et } a_\delta(u_\delta, u_\delta) \geq \gamma \|u_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1}^2. \\ |a_{1\delta}(u'_\delta, v'_\delta)| &\leq \alpha_1 \|u'_\delta\|_{\mathcal{X}_*} \|v'_\delta\|_{\mathcal{X}_*} \text{ et } a_{1\delta}(u'_\delta, u'_\delta) \geq \gamma_1 \|u'_\delta\|_{\mathcal{X}_*}^2. \end{aligned}$$

On notera $\mathcal{A}_\delta(\cdot, \cdot)$

$$\mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{w}_\delta) = a_{1\delta}(u_{r\delta}, w_{r\delta}) + a_\delta(u_{z\delta}, w_{z\delta}).$$

avec $\mathbf{u}_\delta = (u_{r\delta}, u_{z\delta})$ et $\mathbf{w}_\delta = (w_{r\delta}, w_{z\delta})$, on déduit que \mathcal{A}_δ est continue et coercive sur $X_\delta \times X_\delta^*$ pour la norme $\|\cdot\|_{\mathbb{Z}}$.

On remarque que sur chaque Ω_ℓ , $1 \leq \ell \leq L$, l'exactitude de la formule de quadrature fait que

$$\forall \mathbf{v}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta, \forall q_\delta \in M_\delta, b_\delta(\mathbf{v}_\delta, q_\delta) = \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} q_\ell(r, z) \operatorname{div}_r \mathbf{v}_\ell r dr dz = b(\mathbf{v}_\delta, q_\delta),$$

on en déduit que la forme $b_\delta(\cdot, \cdot)$ est continue sur $\mathbf{Z}_\delta \times M_\delta$ et que la constante de continuité est indépendante de δ .

La proposition suivante montre l'existence d'une condition inf-sup globale sur la forme $b_\delta(\cdot, \cdot)$.

Proposition 3.2.1 On a la condition inf-sup suivante, pour tout $q_\delta \in M_\delta$,

$$\sup_{\mathbf{w}_\delta \in \mathcal{Z}_\delta} \frac{b_\delta(\mathbf{w}_\delta, q_\delta)}{\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathcal{Z}}} \geq \beta_\delta \|q_\delta\|_{L^2_1(\Omega)} \quad (3.2.11)$$

où

$$\beta_\delta = \bar{N}_\delta^{-\frac{1}{2}} (\log \bar{N}_\delta)^{-1} \text{ et } \bar{N}_\delta = \max\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}. \quad (3.2.12)$$

Preuve On se donne un élément q_δ de M_δ . On décompose q_δ de la manière suivante

$$q_\delta = \bar{q}_\delta + \check{q}_\delta$$

avec

$$\bar{q}_\ell = \bar{q}_\delta|_{\Omega_\ell} = \frac{1}{\text{mes}(\Omega_\ell)} \int_{\Omega_\ell} q_\ell(r, z) r dr dz.$$

1) Sur chaque Ω_ℓ , on remarque que $\check{q}_\ell = \check{q}_\delta|_{\Omega_\ell} \in M_\ell$ où

$$M_\ell = \{q \in \mathbb{P}_{N_\ell-2}(\Omega_\ell), \int_{\Omega_\ell} q(r, z) r dr dz = 0, 1 \leq \ell \leq L\}.$$

D'après [8, Proposition X.2.5] et [23, Chapitre V, (25,24)] on a les résultats suivants.

a) Si $\ell > L_0$, alors il existe $\check{\mathbf{w}}_\ell = (\check{u}_{r,\ell}, \check{v}_{r,\ell}) \in \mathbb{P}_{N_\ell}^0(\Omega_\ell) \times \mathbb{P}_{N_\ell}^0(\Omega_\ell)$ tel que $b(\check{\mathbf{w}}_\ell, \check{q}_\ell) = \|\check{q}_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2$ et

$$\|\check{\mathbf{w}}_\delta\|_{V^1_1(\Omega_\ell)^2} \leq \bar{c} \sqrt{N_\ell} \log N_\ell \|\check{q}_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}.$$

b) Si $1 \leq \ell \leq L_0$ il existe $\check{\mathbf{w}}_\ell = (\check{u}_{r,\ell}, \check{v}_{r,\ell}) \in \mathbb{P}_{N_\ell}^0(\Omega_\ell) \times \mathbb{P}_{N_\ell}^0(\Omega_\ell)$ tel que $b(\check{\mathbf{w}}_\ell, \check{q}_\ell) = \|\check{q}_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}^2$ et

$$\|\check{\mathbf{w}}_\ell\|_{V^1_1(\Omega_\ell) \times H^1_1(\Omega_\ell)} \leq \bar{c}' \sqrt{N_\ell} \log N_\ell \|\check{q}_\ell\|_{L^2_1(\Omega_\ell)}.$$

Soit $\check{\mathbf{w}}_\delta$ tel que $\check{\mathbf{w}}_\delta|_{\Omega_\ell} = \check{\mathbf{w}}_\ell$, alors $\check{\mathbf{w}}_\delta = (\check{u}_{r,\delta}, \check{v}_{r,\delta}) \in X_\delta^\circ(\Omega) \times X_\delta^\circ(\Omega)$ et on a :

$$\begin{aligned} b(\check{\mathbf{w}}_\delta, \check{q}_\delta) &= \|\check{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}^2 \\ \|\check{\mathbf{w}}_\delta\|_{\mathcal{Z}} &\leq \bar{C} \sqrt{N_\delta} \log N_\delta \|\check{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)} \\ N_\delta &= \max\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}. \end{aligned} \quad (3.2.13)$$

2) Comme \bar{q}_δ est constante sur chaque Ω_ℓ , on a d'après [8, Lemme XI.1.1] l'existence de $\bar{\mathbf{w}}_\delta \in X_\delta^\circ(\Omega)^2$ telle que

$$b(\bar{\mathbf{w}}_\delta, \bar{q}_\delta) = \|\bar{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}^2$$

et

$$\|\bar{\mathbf{w}}_\delta\|_{\mathcal{Z}} \leq \|\bar{\mathbf{w}}_\delta\|_{\mathcal{X}_* \times \mathcal{X}_*} \leq \bar{c} \|\bar{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}. \quad (3.2.14)$$

On utilise la décomposition qui est due à Boland et Nicolaides, on pose alors $\mathbf{w}_\delta = \check{\mathbf{w}}_\delta + \lambda \bar{\mathbf{w}}_\delta$ on a $\mathbf{w}_\delta \in X_\delta^\circ(\Omega) \times X_\delta^\circ(\Omega)$. Il reste à trouver λ pour que la condition (3.2.11) soit

vérifiée. On a

$$\begin{aligned}
 b_\delta(\mathbf{w}_\delta, q_\delta) &= - \int_{\Omega} q_\delta \operatorname{div}_r \mathbf{w}_\delta(r, z) r dr dz \\
 &= - \int_{\Omega} (\check{q}_\delta + \bar{q}_\delta) \operatorname{div}_r (\check{\mathbf{w}}_\delta + \lambda \bar{\mathbf{w}}_\delta)(r, z) r dr dz \\
 &= - \int_{\Omega} \check{q}_\delta \operatorname{div}_r \check{\mathbf{w}}_\delta(r, z) r dr dz - \lambda \int_{\Omega} \check{q}_\delta \operatorname{div}_r \bar{\mathbf{w}}_\delta(r, z) r dr dz \\
 &\quad - \int_{\Omega} \bar{q}_\delta \operatorname{div}_r \check{\mathbf{w}}_\delta(r, z) r dr dz - \lambda \int_{\Omega} \bar{q}_\delta \operatorname{div}_r \bar{\mathbf{w}}_\delta(r, z) r dr dz.
 \end{aligned}$$

Puisque

$$\int_{\Omega} \bar{q}_\delta \operatorname{div}_r \check{\mathbf{w}}_\delta(r, z) r dr dz = \bar{q}_\delta \int_{\partial\Omega} \check{\mathbf{w}}_\delta(r, z) \cdot \mathbf{n} r dr dz = 0,$$

on en déduit que

$$\begin{aligned}
 b_\delta(\mathbf{w}_\delta, q_\delta) &\geq \|\check{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}^2 + \lambda \|\bar{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}^2 - c\lambda \|\check{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)} \|\bar{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)} \cdot \\
 &\geq \left(1 - \frac{c^2\eta^2}{2}\right) \|\check{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}^2 + \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{2\eta^2}\right) \|\bar{q}_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}^2
 \end{aligned}$$

où $\eta > 0$. En posant $\eta = \frac{1}{c}$ et $\lambda = \eta^2$ on a finalement :

$$b_\delta(\mathbf{w}_\delta, q_\delta) \geq \inf\left\{\frac{1}{2c^2}, \frac{1}{2}\right\} \|q_\delta\|_{L^2_1(\Omega)}^2. \quad (3.2.15)$$

De même en utilisant (3.2.13) et (3.2.14), on obtient

$$\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq C\sqrt{N_\delta} \log N_\delta \|q_\delta\|_{L^2_1(\Omega)} \quad (3.2.16)$$

En combinant (3.2.15) et (3.2.16) on obtient (3.2.11).

La continuité et la coercivité de a_δ et $a_{1\delta}$ respectivement sur $X_\delta^\diamond \times X_\delta^\diamond$ et $X_\delta^* \times X_\delta^*$ et la condition inf-sup (3.2.11) permettent d'avoir le théorème suivant. ■

Théorème 3.2.1 *Pour tout $\mathbf{f} \in L^2_1(\Omega)^2$ et $\mathbf{g} \in H^1_1(\Omega)^2$ le problème (3.2.10) admet une solution unique $(\mathbf{u}_\delta, p_\delta)$ dans $\mathbf{Z}_\delta \times M_\delta$.*

Preuve La condition inf-sup pour la forme bilinéaire b_δ et sa continuité ainsi que la continuité et coercivité des formes $a_{1\delta}, a_\delta$ donne l'existence et l'unicité de la solution $(\mathbf{u}_\delta, p_\delta)$. ■

3.2.3 Estimation de l'erreur

On considère maintenant l'espace \mathbb{V}_δ donné par :

$$\mathbb{V}_\delta = \{\mathbf{w}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta \mid b_\delta(\mathbf{w}_\delta, q_\delta) = 0, \forall q_\delta \in M_\delta\},$$

Proposition 3.2.2 Soit (u, p) la solution du problème (3.2.2) et (u_δ, p_δ) la solution du problème (3.2.10). On a alors :

$$\begin{aligned} \|u - u_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq & c \left\{ \inf_{v_\delta \in \mathbb{V}_\delta} [\|u - v_\delta\|_{\mathbb{Z}} \right. \\ & + \sup_{w_\delta \in \mathbb{Z}_\delta} \frac{\mathcal{A}(v_\delta, w_\delta) - \mathcal{A}_\delta(v_\delta, w_\delta)}{\|w_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \\ & + \inf_{q_\delta \in \mathcal{M}_\delta} \|p - q_\delta\|_{L^2_0(\Omega)} \\ & + \sup_{z_\delta \in \mathbb{Z}_\delta} \frac{\int_\Omega \mathbf{f} z_\delta(r, z) r dr dz - (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, z_\delta)_\delta}{\|z_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \\ & \left. + \sup_{y_\delta \in \mathbb{Z}_\delta} \frac{\sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left\{ -\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}_m} + p \mathbf{n}(\tau) \right\} \cdot [y_\delta](\tau) d\tau}{\|y_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \right\}. \end{aligned} \quad (3.2.17)$$

où c est une constante positive indépendante de δ .

Preuve Pour tout $v_\delta \in \mathbb{V}_\delta$ on a

$$\mathcal{A}_\delta(u_\delta - v_\delta, u_\delta - v_\delta) = (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, u_\delta - v_\delta)_\delta - a_\delta(v_\delta, u_\delta - v_\delta) \quad (3.2.18)$$

On pose $u_\delta - v_\delta = w_\delta \in \mathbb{V}_\delta$ on a

$$\begin{aligned} \int_\Omega (-\mathbf{f} - \Delta u + \nabla p) w_\delta r dr dz &= \mathcal{A}(u, w_\delta) + b(w_\delta, p) \\ &\quad - \int_\Omega \mathbf{f} w_\delta r dr dz \\ &\quad + \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(-\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}_m} + p \mathbf{n}(\tau) \right) \cdot [w_\delta](\tau) d\tau \\ &= 0. \end{aligned} \quad (3.2.19)$$

On injecte le terme (3.2.19) dans le terme (3.2.18), on obtient :

$$\begin{aligned} a_\delta(w_\delta, w_\delta) &= (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, w_\delta)_\delta - \int_\Omega \mathbf{f} w_\delta r dr dz \\ &\quad + b(w_\delta, p) \\ &\quad + \mathcal{A}(u, w_\delta) - \mathcal{A}_\delta(v_\delta, w_\delta) \\ &\quad + \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(-\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}_m} + p \mathbf{n}(\tau) \right) \cdot [w_\delta](\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (3.2.20)$$

Combinant la coercivité de a_δ sur \mathbb{V}_δ , la continuité de b sur $\mathcal{Z}_\delta \times M_\delta$, la condition inf-sup (3.2.11) et le fait que $b(\mathbf{w}_\delta, q) = 0$ on obtient :

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}_\delta - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}}^2 &\leq \mathcal{A}_\delta(\mathbf{w}_\delta, \mathbf{w}_\delta) \\ &\leq \|p - q_\delta\|_{L^2(\Omega)} \|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}} + \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \\ &\quad + \sup_{\mathbf{z}_\delta \in \mathcal{Z}_\delta} \left\{ \frac{(\mathcal{L}_\delta \mathbf{f}, \mathbf{z}_\delta)_\delta - \int_\Omega \mathbf{f} \cdot \mathbf{z}_\delta r dr dz}{\|\mathbf{z}_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \right\} \|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \\ &\quad + \mathcal{A}(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_\delta(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) \\ &\quad \quad \quad \sum \int_{\gamma_m} \left\{ -\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}_m} + p \cdot \mathbf{n}(\tau) \right\} [\mathbf{y}_\delta](\tau) d\tau \\ &\quad + \sup_{\mathbf{y}_\delta \in \mathcal{Z}_\delta} \left\{ \frac{\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} \left\{ -\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}_m} + p \cdot \mathbf{n}(\tau) \right\} [\mathbf{y}_\delta](\tau) d\tau}{\|\mathbf{y}_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \right\} \|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}}. \end{aligned}$$

On utilise l'inégalité triangulaire $\|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}} + \|\mathbf{u}_\delta - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}}$ pour conclure. ■

Remarque 3.2.2 Si on considère l'espace $\mathbb{V}_\delta^- = \mathbb{V}_\delta \cap \mathbb{P}_{\delta-1}$ et on choisit \mathbf{v}_δ dans cet espace, le terme $\sup_{\mathbf{w}_\delta \in \mathcal{Z}_\delta} \frac{\mathcal{A}_\delta(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_\delta(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta)}{\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}}}$ s'annule.

On va maintenant estimer le terme $\inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathbb{V}_\delta^-} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}}$, en deux étapes, dans la première, nous allons considérer la géométrie du domaine conforme et dans la seconde non conforme. Pour cela on commence par introduire pour tout entier naturel m le polynôme $\mathbb{P}_N^{m,0}(\Lambda)$ défini par :

$$\mathbb{P}_N^{m,0}(\Lambda) = \{v \in \mathbb{P}_N(\Lambda), v(\pm 1) = \dots = v^{m-1}(\pm 1) = 0\}.$$

avec la notation $\mathbb{P}_N^{1,0}(\Lambda) = \mathbb{P}_N^0(\Lambda)$. Ensuite on va introduire l'opérateur de relèvement de trace $\mathcal{R}^{2,\gamma}$ qui va nous servir dans la preuve.

Lemme 3.2.1 Pour tout côté γ de mesure non nulle de $\bar{\Sigma}$, il existe un opérateur de relèvement $\mathcal{R}^{2,\gamma}$ de $\mathbb{P}_N^{2,0}(\gamma) \times \mathbb{P}_N^0(\gamma)$, dans $\mathbb{P}_N(\Sigma)$ telle que

$$\forall \phi = (\varphi_0, \varphi_1) \in \mathbb{P}_N^{2,0}(\gamma) \times \mathbb{P}_N^0(\gamma)$$

on a :

$$\partial_n^k \mathcal{R}^{2,\gamma}(\phi) = \begin{cases} \varphi_k \text{ sur } \bar{\gamma} \\ 0 \text{ sur } \partial\Omega \setminus \gamma \end{cases}$$

où $k \in \{0, 1\}$, et pour tout réel s tel que $\frac{3}{2} < s < \frac{5}{2}$ on a :

$$\|\mathcal{R}^{2,\gamma}(\phi)\|_{H_1^s(\Sigma)} \leq c \left(\|\varphi_0\|_{H_1^{s-\frac{1}{2}}(\gamma)} + \|\varphi_1\|_{H_1^{s-\frac{3}{2}}(\gamma)} \right). \quad (3.2.21)$$

Pour la preuve on cite [18] et [17]. Grâce à ce lemme, on est maintenant en mesure d'énoncer la proposition suivante, on suppose toutefois qu'on est dans le cas homogène (le cas non homogène sera traité ultérieurement).

Proposition 3.2.3 Soit $\mathbf{u} = (u_r, u_z)$ la solution du problème (3.2.3), on suppose que $\mathbf{u}|_{\Omega_\ell} \in H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2$ alors il existe \mathbf{v}_δ dans \mathbb{V}_δ et c tels que :

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq c \lambda_\delta^{\frac{3}{4}} \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2}. \quad (3.2.22)$$

où λ_δ est défini dans (2.3.25).

Preuve I) Cas homogène

a) Etape 1 : construction de v_δ^{12}

Soit la fonction $\eta_p^*(\zeta)$ modifiée de la fonction construite dans le lemme 2.3.3 et qui a les mêmes propriétés que $\eta_p(\zeta)$:

$$\eta_p^*(\zeta) = \frac{(1 - \zeta^2)^2}{(1 - a_p^2)^2} \frac{\varphi_i^- + \varphi_{i+1}^-}{(\varphi_i^- + \varphi_{i+1}^-)(a_p)} \prod_{p' \neq p} \frac{\zeta - a_{p'}}{a_p - a_{p'}},$$

où φ_i^- est le polynôme de Lagrange avec $0 \leq i \leq N - P - 3$, associé aux nœuds ζ_i^- de Gauss-Lobatto. cette fonction η_p^* est dans $\mathbb{P}_N(\Lambda)$ et vérifie $\eta_p^*(a_p) = 1$ et 0 en ± 1 et en $a_{p' \neq p}$. Ce polynôme η_p^* satisfait :

$$\|\eta_p^*\|_{L^2_\omega(\Lambda)} \leq cN^{-\frac{1}{2}}, \quad \|\eta_p^*\|_{H^1_\omega(\Lambda)} \leq cN^{\frac{1}{2}} \text{ et } \|\eta_p^*\|_{H^2_\omega(\Lambda)} \leq cN^{\frac{3}{2}} \quad (3.2.23)$$

La constante c dépend uniquement des points a_p . Soit γ_μ^+ , $1 \leq \mu \leq M^+$ les joints et \mathcal{C}_μ^+ l'ensemble de tous les coins qui se trouvent sur γ_μ^+ . On construit alors la fonction déduite de (2.3.34) par

$$\bar{\Phi}_{\mu,e}^* = \begin{cases} \Phi_{\mu,e}^* & \text{dans } \Omega_{\mu}^+ \\ 0 & \text{dans } \Omega \setminus \bar{\Omega}_{\mu}^+ \end{cases} \quad (3.2.24)$$

$\Phi_{\mu,e}^*$ est obtenu à partir de Φ^* par homothétie et translation, où $\Phi^*(\zeta, \eta) = \eta_p^*(\zeta) \left(\frac{1-\eta}{2}\right)^{N_\mu^+}$.

On pose $\mathbf{u} = \mathbf{Rot}_a(\psi)$.

) Soit \mathbf{v}_δ^1 tel que $v_{\Omega_\ell}^1 = \mathbf{v}_\ell^1 = \mathbf{Rot}_a(\bar{\Pi}_N^{,2} \psi_\ell)$. On construit z_δ^1 avec $z_\ell^1 = \bar{\Pi}_N^{*,2} \psi_\ell$ alors on a

$$z_\delta^2 = \sum_{\mu=1}^{M^+} \sum_{e \in \mathcal{C}_\mu^+} (\psi - z_{\delta|\Omega_\mu^+}^1)(e) \bar{\Phi}_{\mu,e}^*$$

On pose $z_\delta^{12} = z_\delta^1 + z_\delta^2$.

**) Soit $\mathbf{v}_\delta^{12} = \mathbf{Rot}_a(z_\delta^{12})$, cette fonction vérifie la nullité sur Γ , et est à divergence nulle, et on a $z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12}$ s'annule sur toutes les extrémités des non joints γ_m^- , $1 \leq m \leq$

M^- (γ_m^+ étant le côté γ_m^- vu dans l'autre direction voir figure 2.2). D'une part on a

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^L \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta^1\|_{H_1^1(\Omega_\ell)^2} &= \sum_{\ell=1}^L \|\psi - \tilde{\Pi}_N^{*,2} \psi_\ell\|_{H_1^2(\Omega_\ell)^2} \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\psi\|_{H_1^{s_\ell+2}(\Omega_\ell)} \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2}. \end{aligned}$$

D'autre part on a

$$\sum_{\ell=1}^L \|\mathbf{Rot}_a(z_\delta^2)\|_{H_1^1(\Omega_\ell)^2} \leq \sum_{\mu=1}^{M^+} \sum_{e \in C_\mu} |(\psi - z_\delta^1|_{\Omega_\mu^+})(e)| \|\mathbf{Rot}_a(\tilde{\Phi}_{\mu,e}^*)\|_{H_1^1(\Omega_\mu^+)^2}$$

en utilisant (2.3.35), on a

$$\sum_{\ell=1}^L \|\mathbf{Rot}_a(z_\delta^2)\|_{H_1^1(\Omega_\ell)^2} \leq c \sum_{\mu=1}^{M^+} (N_\mu^+)^{-s_\mu^+ - 1} \|\psi\|_{H_1^{s_\mu^++2}(\Omega_\mu^+)} \|\tilde{\Phi}_{\mu,e}^*\|_{H_1^2(\Omega_\mu^+)}$$

D'après la définition de $\tilde{\Phi}_{\mu,e}^*$, on a

$$\|\tilde{\Phi}_{\mu,e}^*\|_{H_1^2(\Sigma)} \leq c N_\mu^+. \quad (3.2.25)$$

En effet on a

$$\left\| \left(\frac{1-\eta}{2} \right)^N \right\|_{H_1^2(\Omega)} \leq c N^{s-\frac{1}{2}} \quad (3.2.26)$$

En combinant (3.2.23) et (3.2.26), pour $s = 0$, $s = 1$, $s = 2$, on déduit (3.2.25). Enfin on a

$$\sum_{\ell=1}^L \|\mathbf{Rot}_a(z_\delta^2)\|_{H_1^1(\Omega_\ell)^2} \leq c \sum_{\mu=1}^{M^+} (N_\mu^+)^{-s_\mu^+} \|\mathbf{u}_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\mu^+)^2}.$$

D'où on déduit que

$$\sum_{\ell=1}^L \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta^{12}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)^2} \leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2}. \quad (3.2.27)$$

b) Etape 2 : construction de $\tilde{\pi}_N^{+,2}$ et $\tilde{\pi}_N^2$

L'élément $v_\delta^{12} = \mathbf{Rot}_a(z_\delta^{12})$ ne vérifie pas la condition sur les interfaces γ_m^- , $1 \leq m \leq M^-$. Pour relever ce terme, on commence par définir deux opérateurs de projections $\tilde{\pi}_N^{+,2}$ et $\tilde{\pi}_N^2$:

*) L'opérateur $\tilde{\pi}_N^{+,2}$ de $H_1^2(\Lambda)$ dans $\mathbb{P}_{N+2}(\Lambda)$ vérifie

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\Lambda} \left(\tilde{\pi}_N^{+,2} \varphi - \varphi \right) \psi(r) r dr = 0, \forall \psi \in \mathbb{P}_{N-2}(\Lambda) \\ \left(\tilde{\pi}_N^{+,2} \varphi - \varphi \right) (\pm 1) = 0 \\ \left(\tilde{\pi}_N^{+,2} \varphi - \varphi \right)' (\pm 1) = 0 \end{array} \right.$$

et pour $0 \leq t \leq 2 < s$ et pour toute fonction $\varphi \in H_1^s(\Lambda)$, on a

$$\left\| \varphi - \tilde{\pi}_N^{+,2} \varphi \right\|_{H_1^t(\Lambda)} \leq c N^{t-s} \|\varphi\|_{H_1^s(\Lambda)} \quad (3.2.28)$$

En effet en considérant l'application

$$\begin{array}{ccc} j : \mathbb{P}_{N+2}^{2,0}(\Lambda) & \longrightarrow & \mathbb{P}_{N-2}(\Lambda) \\ \chi & \longmapsto & \chi^{(4)} \end{array}$$

qui est un isomorphisme, on peut donc montrer que $\tilde{\pi}_N^{+,2} = \tilde{\pi}_{N+2}^{+,2,0}(\varphi - \varphi_3^{\circ}) + \varphi_3^{\circ}$, où $\tilde{\pi}_N^{+,2,0}$ est l'opérateur de projection orthogonale de $V_{1\circ}^2(\Lambda)$ dans $\mathbb{P}_N^{2,0}(\Lambda)$ et φ_3° est un polynôme de degré 3 tel que $\varphi_3^{\circ}(-1) = \varphi(-1)$, $\varphi_3^{\circ}(-1) = \varphi'(-1)$ et $\varphi_3^{\circ}(1) = \varphi_3^{\circ}(1)$. Cette construction est due à [1].

**) L'opérateur $\tilde{\pi}_N^2$ de $H^2(\Lambda)$ dans $\mathbb{P}_{N+2}(\Lambda)$ vérifie

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\Lambda} \left(\tilde{\pi}_N^2 \varphi - \varphi \right) \psi(r) ds = 0, \forall \psi \in \mathbb{P}_{N-2}(\Lambda) \\ \left(\tilde{\pi}_N^2 \varphi - \varphi \right) (\pm 1) = 0 \\ \left(\tilde{\pi}_N^2 \varphi - \varphi \right)' (\pm 1) = 0 \end{array} \right.$$

et pour $0 \leq t \leq 2 < s$ et pour toute fonction $\varphi \in H^s(\Lambda)$, on a

$$\left\| \varphi - \tilde{\pi}_N^2 \varphi \right\|_{H^t(\Lambda)} \leq c N^{t-s} \|\varphi\|_{H^s(\Lambda)}.$$

On réfère à [11, lemme 1.5] pour l'étude de cet opérateur. On note alors $\tilde{\pi}_{N_m-2}^{*,2}$:

$$\tilde{\pi}_{N_m-2}^{*,2} = \begin{cases} \tilde{\pi}_{N_m}^2 \varphi & \text{si } \Lambda \text{ est parallèle à l'axe } r = 0 \\ \tilde{\pi}_{N_m}^{*,2} \varphi & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.2.29)$$

c) Etape 3 : construction de v_δ^3 :

On pose $\sigma_{\gamma_m^-} = \tilde{\pi}_{N_m-2}^{*,2}(\varphi_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-}$, $\sigma_{\gamma_m^-}^n = \partial_n \left(\tilde{\pi}_{N_m-2}^{*,2}(z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right)$. On remarque que $\sigma_{\gamma_m^-}$ et $\sigma_{\gamma_m^-}^n$ s'annule sur les extrémités de γ_m^- . En effet $z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12}$ est nulle sur les extrémités de γ_m^- et $\tilde{\pi}_{N_m-2}^{*,2}$ et $\partial_n \tilde{\pi}_{N_m-2}^{*,2}$ conserve la nullité sur les coins. Donc on pose v_δ^3 :

$$v_\delta^3 = \mathbf{Rot}_a(z_\delta^{12}) + \sum_{m=1}^{M^-} \mathbf{Rot}_a \circ \tilde{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^-}^n).$$

On remarque que v_δ^3 est la bonne approximation de \mathbf{u} . En effet v_δ^3 est nul sur Γ , à divergence nulle et vérifie la condition de compatibilité. De plus on a

$$\left\| \mathbf{Rot}_a \circ \tilde{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^-}^n) \right\|_{H_1^1(\Omega_m^-)} \leq c \left\| \tilde{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^-}^n) \right\|_{H_1^2(\Omega_m^-)}.$$

En utilisant (3.2.21) on a

$$\begin{aligned} \left\| \tilde{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^-}^n) \right\|_{H_1^2(\Omega_m^-)} &\leq c \left(\left\| \tilde{\pi}_{N_m^- - 2}^{*,2}(z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} \right. \\ &\quad \left. + \left\| \partial_n \tilde{\pi}_{N_m^- - 2}^{*,2}(z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right\|_{V_1^{\frac{1}{2}}(\gamma_m^-)} \right) \\ &\leq c \left\| \tilde{\pi}_{N_m^- - 2}^{*,2}(z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)}. \end{aligned}$$

En utilisant la continuité des traces de $H_1^s(\Omega)$ dans $H_1^{s-\frac{1}{2}}(\gamma)$ et le fait que

$$\begin{aligned} \left\| \tilde{\pi}_{N_m^- - 2}^{*,2}(z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} &\leq \left\| (Id - \tilde{\pi}_{N_m^- - 2}^*)(z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} \\ &\quad + \left\| (z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} \\ &\leq c \left\| (z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} \\ &\quad + (N_m^-)^{-\frac{1}{2}} \left\| (z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right\|_{H_1^2(\gamma_m^-)} \end{aligned}$$

on déduit que $\psi - z_{\delta|\gamma_m^+}^{12}$ et $\psi - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12}$ s'annulent sur les extrémités de γ_m^- ainsi que leurs dérivées premières, alors ils appartiennent à $V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)$. On a en plus le fait que $z_{\delta|\gamma_m^-}^{12}$ s'annule sur γ_m^- ce qui implique

$$\left\| (z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12}) \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} \leq \left\| \psi - z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} + \left\| \psi - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12} \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)}$$

et

$$\left\| z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12} \right\|_{H_1^2(\gamma_m^-)} \leq \left\| \psi - z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} \right\|_{H_1^2(\gamma_m^-)} + \left\| \psi - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12} \right\|_{H_1^2(\gamma_m^-)}.$$

On rappelle l'inégalité d'interpolation pour $\psi \in V_1^r(\gamma)$ où γ est un côté de \mathbb{R} et $0 \leq r \leq s$

$$\|\psi\|_{V_1^r(\gamma)} \leq c \|\psi\|_{L_1^2(\gamma)}^{1-\frac{r}{s}} \|\psi\|_{H_1^s(\gamma)}^{\frac{r}{s}} \quad (3.2.30)$$

Ceci entraîne pour $r = \frac{3}{2}$ et $s = 2$ que

$$\left\| \psi - z_{\delta|\gamma_m^\pm}^{12} \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} \leq c \left\| \psi - z_{\delta|\gamma_m^\pm}^{12} \right\|_{L_1^2(\gamma_m^-)}^{\frac{1}{2}} \left\| \psi - z_{\delta|\gamma_m^\pm}^{12} \right\|_{H_1^2(\gamma_m^-)}^{\frac{3}{2}} \quad (3.2.31)$$

On a aussi l'inégalité suivante

$$\|\psi - z_\ell^1\|_{H_1^2(\Gamma)} + N_\ell \|\psi - z_\ell^1\|_{H_1^1(\Gamma)} + N_\ell^2 \|\psi - z_\ell^1\|_{L_1^2(\Gamma)} \leq c N_\ell^{\frac{3}{2}-s\epsilon} \|\psi\|_{H_1^{s+\epsilon}(\Omega)} \quad (3.2.32)$$

où Γ est un côté de Ω_ℓ . On note \mathcal{K}_m^- l'ensemble des indices, $1 \leq \mu \leq M^+$, tel que $\gamma_m^- \cap \gamma_\mu^+$ a une mesure non nulle. On écrit alors

$$\gamma_m^- = \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} \gamma_m^- \cap \gamma_\mu^+.$$

On a

$$\begin{aligned} \left\| (z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12}) \right\|_{V_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} &\leq c(N_m^-)^{-s_m^-} \|\psi\|_{H_1^{s_m^-+2}(\Omega_m^-)} \\ &\quad + c_{\gamma_m^-}^* \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{-s_\mu^+} \|\psi\|_{H_1^{s_\mu^++2}(\Omega_\mu^+)} \end{aligned}$$

où

$$c_{\gamma_m^-}^* = \max_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{3}{2}} / \min_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{3}{2}}$$

On a

$$\begin{aligned} \max_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{3}{2}} / \min_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{3}{2}} &\leq \frac{\max_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{3}{2}}}{2N_m^{-\frac{3}{2}}} + \frac{N_m^{-\frac{3}{2}}}{2 \min_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{3}{2}}} \\ &\leq \lambda_\delta^{\frac{3}{2}}. \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} \left\| (z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12}) \right\|_{H_1^1(\gamma_m^-)} &\leq c[(N_m^-)^{-s_m^-} \|\psi\|_{H_1^{s_m^-+2}(\Omega_m^-)} \\ &\quad + (N_m^-)^{-\frac{1}{2}} \sum_{\mu \in \mathcal{K}_m^-} (N_\mu^+)^{\frac{1}{2}-s_\mu^+} \|\psi\|_{H_1^{s_\mu^++2}(\Omega_\mu^+)}]. \end{aligned}$$

Ceci implique que

$$\sum_{m=1}^{M^-} \left\| \mathbf{Rot}_a \circ \tilde{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^-}^n) \right\|_{H_1^1(\Omega_m^-)} \leq c\lambda_\delta^{\frac{3}{2}} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2}.$$

combiné avec (3.2.27), on déduit (3.2.22). ■

Dans le cas conforme on peut éliminer le terme λ_δ et nous avons le corollaire suivant :

Corollaire 3.2.1 Soit $\mathbf{u} = (u_r, u_z)$ la solution du problème (3.2.3), on suppose que $\mathbf{u}_{|\Omega_\ell} \in H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2$ alors il existe \mathbf{v}_δ dans \mathbb{V}_δ et c tels que :

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2}. \quad (3.2.33)$$

Preuve Soit $\mathbf{u} = (u_r, u_z)$ la solution du problème (3.2.3). On suppose que $u \in \mathbf{H}_1^{s+2}(\Omega)$, d'après [8, remarque IX.1.2], il existe ψ dans $\mathbf{H}_1^{s+2}(\Omega)$ tel que $\mathbf{u} = \mathbf{Rot}_a(\psi)$ avec $\psi = 0$ et $\partial_n \psi = 0$ sur Γ . Dans le cas axisymétrique on pose

$$\mathbf{Rot}_a(\mu) = \left(\partial_z \mu, -\frac{1}{r} \partial_r (r\mu) \right).$$

On remarque qu'avec la définition

$$\operatorname{div}_r(\mathbf{u}) = \partial_r u_r + \frac{1}{r} u_r + \partial_z u_z$$

on a

$$\operatorname{div}_r(\mathbf{Rot}_a(\mu)) = 0. \quad (3.2.34)$$

On définit les opérateurs de projection orthogonale $\tilde{\Pi}_N^2$ et $\tilde{\Pi}_N^{-2}$ déduits de $\tilde{\Pi}_N^2$ et Π_N^{-2} par homothétie et translation [8, Proposition V.3.9] :

$$\tilde{\Pi}_N^2 : V_1^2(\Sigma) \longrightarrow \mathbb{P}_{N_\ell}(\Sigma)$$

et

$$\tilde{\Pi}_N^{-2} : V_1^2(\Sigma) \longrightarrow \mathbb{P}_{N_\ell}^{*,*}(\Sigma)$$

et qui vérifient pour $0 < t \leq 2 < s$

$$\left\| \psi - \tilde{\Pi}_N^{*,*} \psi \right\|_{V_1^t(\Omega)} \leq c N^{t-s} \|\psi\|_{H_1^t(\Omega)}. \quad (3.2.35)$$

avec

$$\tilde{\Pi}_N^{*,*} = \begin{cases} \tilde{\Pi}_N^2 & \text{si } \Omega \text{ est loin de l'axe } r = 0 \\ \tilde{\Pi}_N^{-2} & \text{si } \Omega \text{ touche l'axe } r = 0. \end{cases}$$

Cet opérateur conserve les valeurs des coins de Ω et la nullité des côtés de $\partial\Omega$.

a) Etape 1 : construction de \mathbf{v}_δ

On travaille localement. Soit \mathbf{v}_δ tel que $\mathbf{v}_{|\Omega_\ell} = \mathbf{v}_\ell = \mathbf{Rot}_a(\tilde{\Pi}_N^{*,*} \psi_\ell)$, or d'après (3.2.34), $\operatorname{div}_r \mathbf{v}_\delta = 0$ et on a l'approximation suivante :

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}} &= \sum_{\ell=1}^L \left\| \mathbf{Rot}_a(\psi_\ell - \tilde{\Pi}_N^{*,*} \psi_\ell) \right\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L \left\| \psi_\ell - \tilde{\Pi}_N^{*,*} \psi_\ell \right\|_{H_1^2(\Omega_\ell)} \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\psi_\ell\|_{H_1^{s_\ell+2}(\Omega_\ell)} \end{aligned}$$

et donc

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\ell\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2}. \quad (3.2.36)$$

L'inconvénient est que v_δ ne vérifie pas la condition de compatibilité sur les interfaces. Pour le corriger on va lui ajouter au terme v_δ un terme de type $\mathbf{Rot}_a(\mu)$ pour satisfaire la condition (3.2.34) d'une part et la condition de compatibilité sur les interfaces d'autre part.

- b) Etape 2 : Construcion de w_δ**
 On considère la figure 3.1.



FIGURE 3.1 – Décomposition conforme

On choisit γ_m^- le non joint de façon à avoir toujours $N_m^- \geq N_m^+$. Après avoir choisi l'ensemble de non joints indexés par M^- (on garde les mêmes notations que dans la preuve de la proposition 2.3.5), on note z_δ l'élément tel que $z_{\delta|\Omega_\ell} = \tilde{\Pi}_N^{*,2} \psi_\ell$ et $z_{\delta|\Omega_\ell} = \tilde{\Pi}_N^{*,2}(\partial_n \psi_\ell)$. On pose $(z_{\delta|\gamma_m^+} - z_{\delta|\gamma_m^-})|_{\gamma_m^-} = \sigma_{\gamma_m^-}$ et $(z_{\delta|\gamma_m^+} - z_{\delta|\gamma_m^-})|_{\gamma_m^+} = \sigma_{\gamma_m^+}$. On remarque que $\sigma_{\gamma_m^-}$ et $\sigma_{\gamma_m^+}$ sont nuls sur les extrémités de γ_m^- puisque $\tilde{\Pi}_N^{*,2}$ conserve les valeurs des coins et que ψ_ℓ et $\partial_n \psi_\ell$ sont continues sur les interfaces pour $s > \frac{5}{2}$. On pose alors

$$w_\delta = \sum_{m=1}^{M^-} \mathbf{Rot}_a \circ \tilde{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^+}). \quad (3.2.37)$$

On a alors

$$\left\| \mathbf{Rot}_a \circ \tilde{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^+}) \right\|_{H_1^1(\Omega_m^-)} \leq c \left\| \tilde{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^+}) \right\|_{H_1^2(\Omega_m^-)}.$$

En utilisant (3.2.21) on a

$$\begin{aligned} \left\| \tilde{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^+}) \right\|_{H_1^2(\Omega_m^-)} &\leq c \left(\left\| (z_{\delta|\gamma_m^+} - z_{\delta|\gamma_m^-})|_{\gamma_m^-} \right\|_{H_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^-)} \right. \\ &\quad \left. + \left\| (z_{\delta|\gamma_m^+} - z_{\delta|\gamma_m^-})|_{\gamma_m^+} \right\|_{H_1^{\frac{3}{2}}(\gamma_m^+)} \right) \end{aligned}$$

la continuité des traces de $H_1^s(\Omega)$ dans $H_1^{s-\frac{1}{2}}(\gamma)$ nous permet de déduire que

$$\left\| \widehat{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m}(\sigma_{\gamma_m^-, \sigma_{\gamma_m^+}^n) \right\|_{H_1^2(\Omega_m^-)} \leq c(\|\psi - z_\delta\|_{H_1^2(\Omega_m^-)} + \|\psi - z_\delta\|_{H_1^2(\Omega_m^+)}) + \|\partial_n \psi - z_\delta^n\|_{H_1^1(\Omega_m^-)} + \|\partial_n \psi - z_\delta^n\|_{H_1^1(\Omega_m^+)},$$

on déduit ensuite de (3.2.35) que

$$\begin{aligned} \|\psi - z_\delta\|_{H_1^2(\Omega_m^-)} + \|\psi - z_\delta\|_{H_1^2(\Omega_m^+)} &\leq N^{-s_m^-} \|\psi\|_{H_1^{\sigma_m^-+2}(\Omega_m^-)} \\ &\quad + N^{-s_m^+} \|\psi\|_{H_1^{\sigma_m^++2}(\Omega_m^+)} \end{aligned} \quad (3.2.38)$$

et

$$\begin{aligned} \|\partial_n \psi - z_\delta^n\|_{H_1^1(\Omega_m^-)} + \|\partial_n \psi - z_\delta^n\|_{H_1^1(\Omega_m^+)} &\leq N^{-s_m^-} \|\partial_n \psi\|_{H_1^{\sigma_m^-+1}(\Omega_m^-)} \\ &\quad + N^{-s_m^+} \|\partial_n \psi\|_{H_1^{\sigma_m^++1}(\Omega_m^+)} \\ &\leq N^{-s_m^-} \|\psi\|_{H_1^{\sigma_m^-+2}(\Omega_m^-)} \\ &\quad + N^{-s_m^+} \|\psi\|_{H_1^{\sigma_m^++2}(\Omega_m^+)}. \end{aligned} \quad (3.2.39)$$

Enfin en combinant (3.2.38), (3.2.39) et en sommant sur m , on déduit que

$$\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|\psi\|_{H_1^{\sigma_\ell+2}(\Omega_\ell)}$$

et que

$$\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\ell\|_{H_1^{\sigma_\ell+1}(\Omega_\ell)^2}. \quad (3.2.40)$$

c) Etape 3 : Construction de $\mathbf{y}_\delta = \mathbf{v}_\delta + \mathbf{w}_\delta$

On vérifie que \mathbf{y}_δ vérifie la condition de compatibilité. En combinant (3.2.36) et (3.2.40), on déduit que

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{y}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\ell\|_{H_1^{\sigma_\ell+1}(\Omega_\ell)^2}.$$

■

Proposition 3.2.4 Soit (\mathbf{u}, p) la solution du problème (3.2.2) et $(\mathbf{u}_\delta, p_\delta)$ la solution du

problème (3.2.10). On a alors :

$$\begin{aligned} \|p - p_\delta\|_{L_1^2(\Omega)} \leq & c(1 + \beta_\delta^{-1}) \left\{ \inf_{q_\delta \in M_\delta} \|p - q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)} + \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \right. \\ & \inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta} [\|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}} + \sup_{\mathbf{w}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta} \frac{\mathcal{A}(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_\delta(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta)}{\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}}}] \\ & + \sup_{\mathbf{z}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta} \frac{\int_\Omega \mathbf{f} \mathbf{z}_\delta(r, z) r \, dr \, dz - (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, \mathbf{z}_\delta)_\delta}{\|\mathbf{z}_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \\ & \left. + \sup_{\substack{\gamma_m^- \in \mathcal{S} \\ \mathbf{y}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta}} \frac{\sum_{\gamma_m^-} \int_{\gamma_m^-} \left\{ -\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}_m} + p \mathbf{n}(\tau) \right\} \cdot [\mathbf{y}_\delta](\tau) \, d\tau}{\|\mathbf{y}_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \right\} \end{aligned}$$

où c est une constante positive indépendante de δ et β_δ est défini dans (3.2.11).

Preuve Soit $\mathbf{w}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta$ on a

$$b_\delta(\mathbf{w}_\delta, p_\delta - q_\delta) = (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, \mathbf{w}_\delta)_\delta - \mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - b_\delta(\mathbf{u}_\delta, q_\delta)$$

et

$$\begin{aligned} 0 &= \int_\Omega \mathbf{f} \mathbf{w}_\delta r \, dr \, dz - \mathcal{A}(\mathbf{u}, \mathbf{w}_\delta) \\ &\quad - b(\mathbf{w}_\delta, q_\delta) - b(\mathbf{w}_\delta, p - q_\delta) \\ &\quad + \sum_{\gamma_m^- \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(-\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}_m} + p \mathbf{n}(\tau) \right) \cdot [\mathbf{w}_\delta](\tau) \, d\tau \end{aligned}$$

La condition inf-sup (3.2.11) donne

$$\begin{aligned} \beta_\delta \|p_\delta - q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)} &\leq \sup_{\mathbf{w}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta} \frac{|b(\mathbf{w}_\delta, p - q_\delta)|}{\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \\ &\leq \|p - q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)} \\ &\quad + \sup_{\mathbf{w}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta} \frac{\mathcal{A}(\mathbf{u}, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{w}_\delta)}{\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \\ &\quad + \sup_{\mathbf{z}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta} \frac{\int_\Omega \mathbf{f} \mathbf{z}_\delta(r, z) r \, dr \, dz - (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, \mathbf{z}_\delta)_\delta}{\|\mathbf{z}_\delta\|_{\mathbb{Z}}} \\ &\quad + \sup_{\substack{\gamma_m^- \in \mathcal{S} \\ \mathbf{y}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta}} \frac{\sum_{\gamma_m^-} \int_{\gamma_m^-} \left\{ -\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}_m} + p \mathbf{n}(\tau) \right\} \cdot [\mathbf{y}_\delta](\tau) \, d\tau}{\|\mathbf{y}_\delta\|_{\mathbb{Z}}}. \end{aligned}$$

On obtient le résultat en utilisant l'inégalité triangulaire et le fait que

$$\begin{aligned} a(\mathbf{u}, \mathbf{w}_\delta) - a_\delta(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{w}_\delta) &= \mathcal{A}(\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta - \mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) \\ &\quad + \mathcal{A}(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_\delta(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) \\ &\leq c \{ \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}} + \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \\ &\quad + |a(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - a_\delta(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta)| \} \end{aligned}$$

Finalement et pour être en mesure de majorer l'erreur, il nous reste à majorer l'erreur d'approximation qui est le sujet de la proposition suivante. ■

Théorème 3.2.2 Soit (u, p) la solution du problème (3.2.2) et (u_δ, p_δ) la solution du problème (3.2.10). On suppose que $\mathbf{u}_{|\Omega_\ell} \in H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2 \times H_1^{r_\ell+1}(\Omega_\ell)$, $p_{|\Omega_\ell} \in H_1^{s_\ell}(\Omega_\ell)$ avec $s_\ell > \frac{1}{2}$ ($s_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$) et $\mathbf{f}_{|\Omega_\ell} \in H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)^2$ avec $\sigma_\ell > 1$ ($\sigma_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$). Alors on distingue deux cas :

1) **Cas homogène** : on a

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}} + \beta_\delta \|p - p_\delta\|_{L_1^2(\Omega)} &\leq c \left\{ \sum_{\ell=1}^L (1 + \lambda_\ell)^{\frac{3}{2}} N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} \|\mathbf{u}\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} \|p\|_{H_1^{s_\ell}(\Omega_\ell)} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-\sigma_\ell} \|\mathbf{f}\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)^2} \right\}. \end{aligned} \quad (3.2.41)$$

2) **Cas non homogène** : on a

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}} + \beta_\delta \|p - p_\delta\|_{L_1^2(\Omega)} &\leq c \left\{ \beta_\delta^{-1} \sum_{\ell=1}^L (1 + \lambda_\ell)^{\frac{1}{2}} N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} \|\mathbf{u}\|_{H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} \|p\|_{H_1^{s_\ell}(\Omega_\ell)} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-\sigma_\ell} \|\mathbf{f}\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)^2} \right\}. \end{aligned} \quad (3.2.42)$$

où

$$\bar{N}_\delta = \max\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$$

et θ_ℓ resp λ_ℓ sont définis dans (2.4.5) resp (2.3.38).

Preuve Nous allons étudier chacun des termes des propositions 3.2.2 et 3.2.4.

1) **Erreur de consistance** : On a

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(\mathbf{v}, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_\delta(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) &= a_1(v_r, w_{r\delta}) - a_{1\delta}(v_r, w_{r\delta}) \\ &\quad + a(v_z, w_{z\delta}) - a_\delta(v_z, w_{z\delta}). \end{aligned}$$

Pour le terme $a_1(v_r, w_{r\delta}) - a_{1\delta}(v_r, w_{r\delta})$, on intercale $x_{\delta-1}$ tel que $x_{\delta-1}|_{\Omega_\ell} = \Pi_{N_\ell-1}^{-1} u_r$, où $\Pi_{N_\ell-1}^{-1}$ est l'opérateur de projection orthogonale de $V_1^1(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_{N_\ell-1}^*(\Omega_\ell)$. Pour le terme $a(v_z, w_{z\delta}) - a_\delta(v_z, w_{z\delta})$, on intercale $y_{\delta-1}$ tel que $y_{\delta-1}|_{\Omega_\ell} = \Pi_{N_\ell-1}^{+1} u_z$, où $\Pi_{N_\ell-1}^{+1}$ est l'opérateur de projection orthogonale de $H_1^1(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_{N_\ell-1}(\Omega_\ell)$ et on applique [8,

Proposition V.3.3 et V.3.8] pour conclure que

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(\mathbf{v}, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_\delta(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) &\leq c \sum_{\ell=1}^L \left(\|u_r - \Pi_{N_\ell-1}^{-1} u_r\|_{V_1^1(\Omega_\ell)} \right. \\ &\quad \left. + \|u_z - \Pi_{N_\ell-1}^{+1} u_z\|_{H_1^1(\Omega_\ell)} \right) \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|\mathbf{u}\|_{V_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell) \times H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)} \end{aligned}$$

2) Erreur de quadrature : On a

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{f} z_\delta r dr dz - (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, \mathbf{z}_\delta)_\delta &= \int_{\Omega} f_r z_{r\delta} r dr dz - (\mathcal{I}_\delta f_r, z_{r\delta})_\delta \\ &\quad + \int_{\Omega} f_z z_{z\delta} r dr dz - (\mathcal{I}_\delta f_z, z_{z\delta})_\delta. \end{aligned}$$

Le premier terme est majoré par $\sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-\sigma_\ell} \|f_r\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}$ et le second par $\sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-\sigma_\ell} \|f_z\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}$.

3) Erreur d'approximation sur les pressions :

On a $\inf_{q_\delta \in M_\delta} \|p - q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)} \leq \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|p\|_{H_1^{s_\ell}(\Omega_\ell)}$. En effet il suffit de prendre

$$q_\delta = \Pi_\delta p - \frac{1}{mes(\Omega)} \int_{\Omega} \Pi_\delta p \, d\tau$$

et de remarquer que $p - q_\delta = (p - \Pi_\delta p) + \frac{1}{mes(\Omega)} \int_{\Omega} (\Pi_\delta p - p) \, d\tau$ pour conclure.

4) D'après la proposition 2.3.6 on a

$$\sup_{\mathbf{y}_\delta \in \mathcal{Z}_\delta} \frac{\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial n_m} [\mathbf{y}_\delta](\tau) \, d\tau}{\|\mathbf{y}_\delta\|_{\mathcal{Z}}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} \|\mathbf{u}\|_{V_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell) \times H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}$$

et pour le terme $\sup_{\mathbf{y}_\delta \in \mathcal{Z}_\delta} \frac{\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} p \mathbf{n}(\tau) \cdot [\mathbf{y}_\delta](\tau) \, d\tau}{\|\mathbf{y}_\delta\|_{\mathcal{Z}}}$, on utilise les mêmes arguments on obtient

$$\sup_{\mathbf{y}_\delta \in \mathcal{Z}_\delta} \frac{\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} p \mathbf{n} [\mathbf{y}_\delta](\tau) \, d\tau}{\|\mathbf{y}_\delta\|_{\mathcal{Z}}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} \|p\|_{H_1^{s_\ell}(\Omega_\ell)}.$$

5) Le terme $\inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathcal{Z}_\delta} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{Z}}$ est majoré par $c \sum_{\ell=1}^L (1 + \lambda_\ell)^{\frac{1}{2}} N_\ell^{-s_\ell} \|\mathbf{u}\|_{V_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell) \times H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}$. En effet on utilise la proposition 2.3.5 et la proposition 2.4.4, (pour $k = 1$).

6.a) Dans le cas homogène, le terme $\inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathcal{V}_\delta} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{Z}}$ est majoré dans la proposition 3.2.3.

6.b) Dans le cas non homogène on utilise un résultat général pour estimer la distance entre (u_r°, u_z°) et $V_N^\circ(\Omega)$, voir [35, Chapitre. II, (1.16)], or d'après [22, Thm 23.10] on a

$$\begin{aligned} & \inf_{(w_{r,N}, w_{z,N}) \in V_N^\circ(\Omega)} (\|u_r^\circ - w_{r,N}\|_{V_1^1(\Omega)} + \|u_z^\circ - w_{z,N}\|_{H_1^1(\Omega)}) \\ & \leq c(1 + \beta_N^{-1}) \inf_{(v_{r,N}, v_{z,N}) \in \mathbb{P}_N^0(\Omega) \times \mathbb{P}_N^\circ(\Omega)} (\|u_r^\circ - v_{r,N}\|_{V_1^1(\Omega)} + \|u_z^\circ - v_{z,N}\|_{H_1^1(\Omega)}) \end{aligned} \quad (3.2.43)$$

Si Ω ne touche pas l'axe $r = 0$, on prend dans le second membre de l'inégalité $(v_{r,N}, v_{z,N}) \in \mathbb{P}_N^0(\Omega) \times \mathbb{P}_N^\circ(\Omega)$.

Si on généralise ce résultat, dans le cas d'un domaine Ω décomposé en sous domaines, on obtient que

$$\beta_{N_\ell}^{-1} \leq \bar{N}_\delta^{\frac{1}{2}} \log \bar{N}_\delta, \forall 1 \leq \ell \leq L.$$

et

$$\inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathbb{V}_\delta} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \leq c\beta_\delta^{-1} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|\mathbf{u}\|_{\mathbf{V}_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell) \times H_1^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}.$$

■

3.2.4 Estimations d'erreur : cas avec singularités

On commence par rappeler un résultat sur les singularités qui est analogue au cas de Laplace on cite [8] et [24].

Théorème 3.2.3 *On suppose que $\mathbf{f} \in H^{s-1}(\Omega) \times H_+^{s-1}(\Omega)$ et $\mathbf{g} \in H^{s+1}(\Omega) \times H_+^{s+1}(\Omega)$, avec $s > \frac{3}{2}$. Soit (\mathbf{u}, p) la solution du problème (3.2.2) et $(\mathbf{u}_\delta, p_\delta)$ la solution du problème (3.2.10). Alors on distingue deux cas :*

1) **Cas homogène** : on a

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}} + \beta_\delta \|p - p_\delta\|_{L_1^1(\Omega)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, E_\delta^S\} \|\mathbf{f}\|_{H_1^{s-1}(\Omega)^2}. \quad (3.2.44)$$

2) **Cas non homogène** : on a

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}} + \beta_\delta \|p - p_\delta\|_{L_1^1(\Omega)} & \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \beta_\delta^{-1} E_\delta^S\} \\ & (\|\mathbf{f}\|_{H_1^{s-1}(\Omega)^2} + \|\mathbf{g}\|_{H_1^{s+1}(\Omega)^2}). \end{aligned} \quad (3.2.45)$$

où

$$E_\delta^S = \max\{E_\ell^S, 1 \leq \ell \leq L\}. \quad (3.2.46)$$

et

$$E_\ell^S = \begin{cases} 0 & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ ne contient pas des } e_i, \\ N_{e_i}^{-2\eta(\frac{\pi}{2})} (\log N_{e_i})^{\frac{1}{2}} & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ contient } e_i \text{ avec } \omega_{e_i} = \frac{\pi}{2}, \\ N_{e_i}^{-2\eta(\frac{3\pi}{2})} (\log N_{e_i})^{\frac{1}{2}} & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ contient } e_i \text{ avec } \omega_{e_i} = \frac{3\pi}{2}. \end{cases} \quad (3.2.47)$$

N_{e_i} est défini dans la proposition 2.3.7.

Remarque 3.2.3 *On a les valeurs approximatives $\eta(\frac{\pi}{2}) \simeq 2,73959$ et $\eta(\frac{3\pi}{2}) \simeq 0,54448$.*

Preuve 1) Cas homogène

On écrit $u_r = u_{r,reg} + \eta_u S_{r,e}^{(0)} + \sum_{\ell=2} \alpha_u S_{r,e}^{(0)\ell}$, $u_z = u_{z,reg} + \eta_u S_{z,e}^{(0)} + \sum_{\ell=2} \alpha_u S_{z,e}^{(0)\ell}$ et $p = p_{reg} + \eta_p S_{p,e}^{(0)} + \sum_{\ell=2} \alpha_p S_{p,e}^{(0)\ell}$. D'une part on utilise 2.3.7 pour estimer $\|u_r - S_{r,e}^{(0)}\|_{\mathcal{X}_1^2}$, $\|u_z - S_{z,e}^{(0)}\|_{\mathcal{X}_1^2}$ et $\|p - S_{p,e}^{(0)}\|_{L_1^2(\Omega)}$, seul λ change, voir [8, Théorème XI.1.5]. On utilise la même technique que dans la preuve du théorème 2.3.3 d'une part et les inégalités

$$\|u\|_{H_1^{s+1}(\Omega)^2} + \|p\|_{H_1^s(\Omega)^2} \leq c \|f\|_{H_1^{s-1}(\Omega)^2}$$

pour déduire (3.2.44).

2) Cas non homogène

On utilise 1) et le facteur $\bar{N}_\delta^{\frac{1}{2}} \log \bar{N}_\delta$ qui intervient dans $\inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathbb{V}_\delta} \|u - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathbb{Z}}$, donc qui apparaît dans le facteur $\|u\|_{H_1^{s+1}(\Omega)^2}$. En plus on a

$$\|u\|_{H_1^{s+1}(\Omega)^2} + \|p\|_{H_1^s(\Omega)^2} \leq c(\|f\|_{H_1^{s-1}(\Omega)^2} + \|g\|_{H_1^{s+1}(\Omega)^2})$$

et

$$\bar{N}_\delta^{\frac{1}{2}} \log \bar{N}_\delta (N_\delta^{-s} \log N_\delta) \leq c N_\delta^{1-s} \tag{3.2.48}$$

on déduit alors (3.2.45). ■

Théorème 3.2.4 On suppose que $f \in H_-^{s-1}(\Omega) \times H_+^{s-1}(\Omega)$ et $g \in H_-^{s+1}(\Omega) \times H_+^{s+1}(\Omega)$, avec $s > \frac{5}{2}$. Soit u la solution du problème (3.2.2) et u_δ la solution du problème (3.2.10). On distingue deux cas :

1) Cas homogène : on a

$$\|u - u_\delta\|_{L_1^2(\Omega)^2} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1} (\log N_\delta)^e E_\delta^S\} \|f\|_{H_1^{s-1}(\Omega)^2}. \tag{3.2.49}$$

2) Cas non homogène : on a

$$\|u - u_\delta\|_{L_1^2(\Omega)^2} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \beta_\delta^{-1} (\log N_\delta)^e N_\delta^{-1} E_\delta^S\} (\|f\|_{H_1^{s-1}(\Omega)^2} + \|g\|_{H_1^{s+1}(\Omega)^2}). \tag{3.2.50}$$

avec ϱ égal à 0 si la décomposition est conforme et 1 sinon. $N_\delta = \min\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$, E_δ^S resp λ_δ sont définis dans (3.2.46) resp (2.3.25).

Preuve On a

$$\|u - u_\delta\|_{L_1^2(\Omega)^2} = \sup_{h \in L_1^2(\Omega)^2} \frac{\int_\Omega (u - u_\delta) \cdot h \, r \, dr \, dz}{\|h\|_{L_1^2(\Omega)^2}}.$$

Pour toute fonction h dans $L_1^2(\Omega)^2$, on note $\chi_\ell = (\chi_{r,\ell}, \chi_{z,\ell})$ l'unique solution du problème

$$\begin{cases} -\Delta_r \chi_\ell + \nabla_r \eta_\ell = h_\ell & \text{dans } \Omega_\ell \\ \text{div}_r(\chi_\ell) = 0 & \text{dans } \Omega_\ell \\ \chi_\ell = 0 & \begin{cases} \text{sur } \partial\Omega_\ell \text{ si } \ell \geq L_0 \\ \text{sur } \Gamma_\ell \text{ si } \ell \leq L_0 \end{cases} \end{cases} \tag{3.2.51}$$

avec $\chi_\ell \in V_{1_0}^1(\Omega_\ell)^2$ si $\ell \geq L_0$ et $\chi_\ell \in V_{1_0}^1(\Omega_\ell) \times H_{1_0}^1(\Omega_\ell)$ si $\ell \leq L_0$ on note que $\Delta_r \chi = \begin{pmatrix} \partial_r^2 \chi_{r,\ell} - \frac{1}{r} \partial_r \chi_{r,\ell} - \partial_z^2 \chi_{r,\ell} \\ \partial_z^2 \chi_{z,\ell} - \frac{1}{r} \partial_r \chi_{z,\ell} - \partial_z^2 \chi_{z,\ell} \end{pmatrix}$, $\nabla_r \eta = \begin{pmatrix} \partial_r \eta \\ \partial_z \eta \end{pmatrix}$ et $\text{div}_r(\chi_\ell) = \partial_r \chi_{r,\ell} + \frac{1}{r} \chi_{r,\ell} + \partial_z \chi_{z,\ell}$. Du problème (3.2.51) on déduit que

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta) \cdot \mathbf{h} \, r \, dr \, dz &= \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla_r(\chi_{r,\ell}) \nabla_r(\mathbf{u}_r - \mathbf{u}_{r,\delta}) \, r \, dr \, dz \\ &\quad + \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \nabla_r(\chi_{z,\ell}) \nabla_r(\mathbf{u}_z - \mathbf{u}_{z,\delta}) \, r \, dr \, dz \\ &\quad - \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta \cdot \mathbf{n}_m \right) \cdot [\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta] \, d\tau \\ &= \mathcal{A}(\chi, \mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta) - \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta \cdot \mathbf{n}_m \right) \cdot [\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta] \, d\tau. \end{aligned}$$

a) On a $\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta \cdot \mathbf{n}_m \right) \cdot [\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta] \, d\tau = \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta \cdot \mathbf{n}_m \right) [\mathbf{u}_\delta] \, d\tau$. On utilise 4) de la preuve du théorème 3.2.2. La régularité de \mathbf{u} nous permet de conclure que

$$\begin{aligned} \left| \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta \cdot \mathbf{n}_m \right) [\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta] \, d\tau \right| &\leq \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-1} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} (\|\chi\|_{V_\ell^2(\Omega_\ell) \times H_\ell^2(\Omega_\ell)} \\ &\quad + \|\eta\|_{L_\ell^2(\Omega_\ell)}) \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \quad (3.2.52) \\ &\leq c N_\delta^{-1} (\log N_\delta) \|\mathbf{h}\|_{L_\ell^2(\Omega)^2} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}}, \end{aligned}$$

puisque [8] on a

$$\sum_{\ell=1}^L \|\chi\|_{V_\ell^2(\Omega_\ell) \times H_\ell^2(\Omega_\ell)} + \sum_{\ell=1}^L \|\eta\|_{L_\ell^2(\Omega_\ell)} \leq c \|\mathbf{h}\|_{L_\ell^2(\Omega)^2}.$$

On remarque que si la décomposition est conforme on a

$$\left| \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta \cdot \mathbf{n}_m \right) [\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta] \, d\tau \right| \leq c N_\delta^{-1} \|\mathbf{h}\|_{L_\ell^2(\Omega)^2} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}}. \quad (3.2.53)$$

b) On pose χ tel que $\chi|_{\Omega_\ell} = \chi_\ell$, alors $\chi \in V_{1_0}^1(\Omega) \times H_{1_0}^1(\Omega)$.

Soit $\tilde{\Pi}_N^{2,0}$ la projection orthogonale de $V_N^{2,0}(\Omega_\ell)$ dans $\mathbb{P}_N^{2,0}(\Omega_\ell)$, où $\mathbb{P}_N^{2,0}(\Omega_\ell)$ est l'ensemble des polynômes dans $\mathbb{P}_N(\Omega_\ell)$ qui s'annulent sur $\partial\Omega_\ell$, ainsi que leurs dérivées normales. On sait que pour tout $\chi = (\chi_r, \chi_z)$ solution du problème (3.2.51), on associe $\psi \in H^{s+1}(\Omega_\ell)$ tel que $\psi = \partial_n \psi = 0$ sur Γ_ℓ si $1 \leq \ell \leq L_0$ et $\psi = \partial_n \psi = 0$ sur $\partial\Omega_\ell$ si $L_0 \leq \ell \leq L$. ψ vérifie $\chi_r = \partial_z \psi$ et $\chi_z = -\frac{1}{r} \partial_r(r\psi)$ voir [8, Remarque IX.1.2].

On pose $\chi_{\delta-1}$ tel que $\chi_{\delta-1}|_{\Omega_\ell} = (\partial_z \tilde{\Pi}_{N_\ell-1}^{2,0} \psi, -\frac{1}{r} \partial_r(r \tilde{\Pi}_{N_\ell-1}^{2,0} \psi))$. On a alors $\chi_{\delta-1} \in V_{1_0}^1(\Omega) \times H_{1_0}^1(\Omega)$, en plus $\chi_{\delta-1} \in \mathbb{V} \cap \mathbb{V}_\delta$ [8, Proposition X.1.4]. Par cette construction

on déduit que

$$\begin{aligned}
 \mathcal{A}(\chi_{\delta-1}, \mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta) &= \int_{\Omega} \mathbf{f} \chi_{\delta-1} - (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, \chi_{\delta-1})_\delta & (3.2.54) \\
 &\leq cN_\delta^{-1} \|\mathbf{f}\|_{H_1^{2-1}(\Omega)^2} (\|\chi - \chi_\delta\|_{\mathbb{Z}} + \|\chi\|_{\mathbb{Z}}) \\
 &\leq cN_\delta^{-1} \|\mathbf{f}\|_{H_1^{2-1}(\Omega)^2} \|\mathbf{h}\|_{L_1^2(\Omega)^2}.
 \end{aligned}$$

et

$$\mathcal{A}(\chi - \chi_{\delta-1}, \mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta) \leq cN_\delta^{-1} \|\mathbf{h}\|_{L_1^2(\Omega)^2} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}} \quad (3.2.55)$$

puisque

$$\begin{aligned}
 \|\chi - \chi_{\delta-1}\|_{\mathbb{Z}} &\leq c \sum_{\ell=1}^L N_\delta^{-1} \|\chi\|_{V_1^2(\Omega_\ell) \times H_1^2(\Omega_\ell)} \\
 &\leq cN_\delta^{-1} \|\mathbf{h}\|_{L_1^2(\Omega)^2}.
 \end{aligned}$$

En combinant le théorème 3.2.3 pour majorer $\|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{\mathbb{Z}}$, avec (3.2.52), (3.2.54) et (3.2.55), on déduit alors le résultat. ■

3.3 Cas général

3.3.1 Problème continu

Dans le cas général \check{f} et \check{g} ne sont pas axisymétriques, le problème devient :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 -\partial_r^2 u_r^k - \frac{1}{r} \partial_r u_r^k - \partial_z^2 u_r^k + \frac{1+k^2}{r^2} u_r^k + \frac{2ik}{r^2} u_\theta^k + \partial_z p^k = f_r^k \quad \text{dans } \Omega, \\
 -\partial_r^2 u_\theta^k - \frac{1}{r} \partial_r u_\theta^k - \partial_z^2 u_\theta^k + \frac{1+k^2}{r^2} u_\theta^k - \frac{2ik}{r^2} u_r^k + \frac{ik}{r} p^k = f_\theta^k \quad \text{dans } \Omega, \\
 -\partial_r^2 u_z^k - \frac{1}{r} \partial_r u_z^k - \partial_z^2 u_z^k + \frac{k^2}{r^2} u_z^k + \partial_z p^k = f_z^k \quad \text{dans } \Omega, \\
 \partial_r u_r^k + \frac{1}{r} u_r^k + \frac{ik}{r} u_\theta^k + \partial_z u_z^k = 0 \quad \text{dans } \Omega, \\
 (u_r^k, u_\theta^k, u_z^k) = (g_r^k, g_\theta^k, g_z^k) \quad \text{sur } \Gamma,
 \end{array} \right. \quad (3.3.1)$$

où $\mathbf{f}^k = (f_r^k, f_\theta^k, f_z^k)$ et $\mathbf{g}^k = (g_r^k, g_\theta^k, g_z^k)$ sont les coefficients de Fourier respectifs de \check{f} et \check{g} .

On multiplie par r et on intègre les équations du problème (3.3.1), ensuite on pose :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{A}_k(\mathbf{u}, \mathbf{w}) &= \mathcal{A}(\mathbf{u}, \mathbf{w}) + \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} \left[\frac{1+k^2}{r^2} (u_{r\ell} \bar{w}_{r\ell} + u_{\theta\ell} \bar{w}_{\theta\ell}) + \right. & (3.3.2) \\
 &\quad \left. \frac{2ik}{r^2} (u_{\theta\ell} \bar{w}_{r\ell} - u_{r\ell} \bar{w}_{\theta\ell}) + \frac{k^2}{r^2} u_{z\ell} \bar{w}_{z\ell} \right] r dr dz, \\
 \mathcal{B}_k(\mathbf{w}, q) &= \sum_{\ell=1}^L \int_{\Omega_\ell} q [\partial_r \bar{w}_{r\ell} + \frac{1}{r} (\bar{w}_{r\ell} - ik \bar{w}_{\theta\ell}) + \partial_z \bar{w}_{z\ell}] r dr dz,
 \end{aligned}$$

avec $\mathbf{u} = (u_r, u_\theta, u_z)$ et $\mathbf{w} = (w_r, w_\theta, w_z)$ et $\mathcal{A}(\mathbf{u}, \mathbf{w})$ est définie par

$$\mathcal{A}(\mathbf{u}, \mathbf{w}) = a(u_r, v_r) + a(u_\theta, v_\theta) + a(u_z, v_z).$$

Alors on a à résoudre pour chaque k :

$$\begin{cases} \text{Trouver } (\mathbf{u}^k, p^k) \text{ dans } \mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega) \times L_1^2(\Omega), \\ \text{avec } \mathbf{u}^k - \mathbf{g}^k \text{ dans } \mathbf{H}_{(k)\diamond}^1(\Omega), \text{ tel que} \\ \forall \mathbf{v} \in \mathbf{H}_{(k)\diamond}^1(\Omega), \mathcal{A}_k(\mathbf{u}^k, \mathbf{v}) + \mathcal{B}_k(\mathbf{v}, q^k) = \langle \mathbf{f}^k, \mathbf{v} \rangle, \\ \forall q \in L_1^2(\Omega), \mathcal{B}_k(\mathbf{u}^k, q) = 0. \end{cases} \quad (3.3.3)$$

Pour l'existence et l'unicité voir [8, Chapitre IX].

3.3.2 Problème discret

La discrétisation du problème (3.3.3) s'écrit :

$$\begin{cases} \text{Trouver } (\mathbf{u}_\delta^k, p_\delta^k) \text{ dans } \mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega) \times M_\delta(\Omega), \\ \text{avec } \mathbf{u}_\delta^k - \mathcal{I}_\delta \mathbf{g}^k \text{ dans } \mathbb{X}_{k,\delta}^\diamond(\Omega), \text{ tel que} \\ \forall \mathbf{v}_\delta \in \mathbb{X}_{k,\delta}^\diamond(\Omega), \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta^k, \mathbf{v}_\delta) + \mathcal{B}_{k,\delta}(\mathbf{v}_\delta, p_\delta^k) = (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}^k, \mathbf{v}_\delta)_\delta, \\ \forall q_\delta \in M_\delta(\Omega), \mathcal{B}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta^k, q_\delta) = 0. \end{cases} \quad (3.3.4)$$

avec

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{v}_\delta) &= \mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{v}_\delta) \\ &+ (1 + k^2) [(r^{-1}u_{r\delta}, r^{-1}v_{r\delta})_\delta + (r^{-1}u_{\theta\delta}, r^{-1}v_{\theta\delta})_\delta] \\ &+ 2ik [(r^{-1}u_{\theta\delta}, r^{-1}v_{r\delta})_\delta - (r^{-1}u_{r\delta}, r^{-1}v_{\theta\delta})_\delta] \\ &+ k^2 (r^{-1}u_{z\delta}, r^{-1}v_{z\delta})_\delta, \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

et

$$\mathcal{B}_{k,\delta}(\mathbf{v}_\delta, q_\delta) = b_\delta(v_{r\delta}, v_{z\delta}, q_\delta) + ik(q_\delta, r^{-1}v_{\theta\delta})_\delta$$

où

$$\mathbf{u}_\delta = (u_{r\delta}, u_{\theta\delta}, u_{z\delta}), \mathbf{v}_\delta = (v_{r\delta}, v_{\theta\delta}, v_{z\delta}),$$

Les espaces $\mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega)$ et $\mathbb{X}_{k,\delta}^\diamond(\Omega)$ sont définis par :

$$\mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega) = \{(v_{r\delta}, v_{\theta\delta}, v_{z\delta}) \in X_\delta(\Omega) \times X_\delta(\Omega) \times X_\delta^*(\Omega); \\ v_{r\delta} + ikv_{\theta\delta} = 0 \text{ sur } \Gamma_0, \text{ si } k = \pm 1\}$$

et

$$\begin{aligned} \mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega) &= X_\delta^*(\Omega)^3 \text{ si } |k| \geq 2, \text{ on pose aussi} \\ \mathbb{X}_{k,\delta}^\diamond(\Omega) &= \mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega) \cap H_{10}^1(\Omega)^3. \end{aligned}$$

On rappelle que les normes $\|\cdot\|_{\mathcal{X}_1^1}$ et $\|\cdot\|_{\mathcal{X}_1^2}$ sont données par $\|v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^1} = (\sum_{\ell=1}^L \|v_\ell\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2)^{\frac{1}{2}}$,

et $\|v_\delta\|_{\mathcal{X}_1^2} = (\sum_{\ell=1}^L \|v_\ell\|_{H_{(k)}^2(\Omega_\ell)}^2)^{\frac{1}{2}}$. On définit la norme $\|\cdot\|_{\mathcal{L}_{-1}^2}$ par

$$\|\cdot\|_{\mathcal{L}_{-1}^2} = (\sum_{\ell=2}^L \|\cdot\|_{L_{-1}^2(\Omega_\ell)}^2)^{\frac{1}{2}}.$$

A l'aide de ces trois normes on définit les normes produits suivantes :

$$\begin{aligned} \|\mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} &= \|v_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|v_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \\ &\quad \|v_{r\delta} + ikv_{\theta\delta}\|_{\mathcal{L}_{-1}^2} + \|v_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \\ \text{si } k &= \pm 1 \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} \|\mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} &= \|v_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^2} + \|v_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1^2} + \|v_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^2} \\ \text{si } |k| &\geq 2. \end{aligned}$$

Sur l'espace $\mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega)$, on utilise la norme induite $\|\cdot\|_{\mathcal{X}_3}$.

Remarque 3.3.1 On remarque que la norme $\|\cdot\|_{\mathcal{X}_3}$ et la norme $\|\cdot\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega)}$ ($s = 1$) définies dans le théorème 1.6.2 sont équivalentes sur $\mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega)$.

On définit aussi l'espace

$$\mathbb{V}_{k,\delta} = \{v_\delta \in \mathbb{X}_{k,\delta}, \mathcal{B}_{k,\delta}(v_\delta, q_\delta) = 0, \forall q_\delta \in M_\delta\}. \quad (3.3.6)$$

Pour montrer que le problème (3.3.4) est bien posé, il suffit de montrer les propriétés suivantes :

- 1) $\mathcal{A}_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$ est continue sur $\mathbb{X}_{k,\delta}$ avec une norme indépendante de δ .
- 2) La forme $\mathcal{B}_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$ est continue sur $\mathbb{X}_{k,\delta} \times M_\delta$ et la constante de continuité est indépendante de δ .
- 3) $\mathcal{A}_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$ est coercive sur $\mathbb{V}_{k,\delta}$ avec une constante de coercivité indépendante de δ et $\mathcal{B}_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$ vérifie une condition inf-sup avec une constante indépendante de δ .

Remarque 3.3.2 La condition $\mathcal{B}_{k,\delta}(v_\delta, q_\delta) = 0$ est équivalente à :

$$\partial_r u_r^k + \frac{1}{r} u_r^k + \frac{ik}{r} u_\theta^k + \partial_z u_z^k = 0$$

et on note

$$\text{div}_k \mathbf{u}^k = \partial_r u_r^k + \frac{1}{r} u_r^k + \frac{ik}{r} u_\theta^k + \partial_z u_z^k \quad (3.3.7)$$

Proposition 3.3.1 Pour k fixé, il existe β et λ indépendantes de k qui vérifient :

$$\begin{aligned} \forall \mathbf{u}_\delta, \mathbf{v}_\delta \in \mathbb{X}_{k,\delta} \\ \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{v}_\delta) &\leq \beta \|\mathbf{u}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} \|\mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} \\ \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{u}_\delta) &\geq \lambda \|\mathbf{u}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}^2 \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

Preuve 1) Si $|k| \geq 2$, on a :

$$|\mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{v}_\delta)| \leq c_1 (\|u_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \|v_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|u_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \|v_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|u_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \|v_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1}). \quad (3.3.9)$$

Et pour les autres termes on a

$$|(1+k^2)[(r^{-1}u_{r\delta}, r^{-1}v_{r\delta})_\delta + (r^{-1}u_{\theta\delta}, r^{-1}v_{\theta\delta})_\delta]| \leq c(\|u_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \|v_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|u_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \|v_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1}) \quad (3.3.10)$$

et

$$|2ik[(r^{-1}u_{\theta\delta}, r^{-1}v_{r\delta})_\delta - (r^{-1}u_{r\delta}, r^{-1}v_{\theta\delta})_\delta]| \leq c'(\|u_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \|v_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|u_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \|v_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1}) \quad (3.3.11)$$

et

$$|k^2 (r^{-1}u_{z\delta}, r^{-1}v_{z\delta})_\delta| \leq c'' \|u_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_2^1} \|v_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_2^1} \quad (3.3.12)$$

On combine (3.3.9) et (3.3.12) pour montrer la continuité de $\mathcal{A}_{k,\delta}$.

Pour la coercivité on utilise la définition de $\mathcal{A}_{k,\delta}$ et on obtient

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{u}_\delta) &= a_\delta(u_{r\delta}, u_{r\delta}) + (1+k^2)(r^{-1}u_{r\delta}, r^{-1}u_{r\delta})_\delta \\ &\quad + a_\delta(u_{\theta\delta}, u_{\theta\delta}) + (1+k^2)(r^{-1}u_{\theta\delta}, r^{-1}u_{\theta\delta})_\delta \\ &\quad + a_\delta(u_{z\delta}, u_{z\delta}) + k^2(r^{-1}u_{z\delta}, r^{-1}u_{z\delta})_\delta \\ &\geq C(\|u_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1}^2 + \|u_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1}^2 + \|u_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_2^1}^2), \end{aligned}$$

finalemt on a le résultat en utilisant l'inégalité $(a^2 + b^2 + c^2) \geq \frac{1}{3}(a + b + c)^2$.

2) Si $|k| = 1$, on a

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{v}_\delta) &= \mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{v}_\delta) \\ &\quad + 2(r^{-1}\{u_{r\delta} + iku_{\theta\delta}\}, r^{-1}\{v_{r\delta} + ikv_{\theta\delta}\})_\delta \\ &\quad + (r^{-1}u_{z\delta}, r^{-1}v_{z\delta})_\delta. \end{aligned}$$

En utilisant (3.3.9), on obtient :

$$\begin{aligned} |(r^{-1}\{u_{r\delta} + iku_{\theta\delta}\}, r^{-1}\{v_{r\delta} + ikv_{\theta\delta}\})_\delta| &\leq \|u_{r\delta} + iku_{\theta\delta}\|_{\mathcal{L}_{-1}^2} \|v_{r\delta} + ikv_{\theta\delta}\|_{\mathcal{L}_{-1}^2} \\ |(r^{-1}u_{z\delta}, r^{-1}v_{z\delta})_\delta| &\leq \|u_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_2^1} \|v_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_2^1}. \end{aligned}$$

On en déduit que $\mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{v}_\delta) \leq \beta \|\mathbf{u}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} \|\mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}$.

D'autre part on a

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{u}_\delta) &= \mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{u}_\delta) \\ &\quad + 2(r^{-1}\{u_{r\delta} + iku_{\theta\delta}\}, r^{-1}\{u_{r\delta} + iku_{\theta\delta}\})_\delta \\ &\quad + (r^{-1}u_{z\delta}, r^{-1}u_{z\delta})_\delta \\ &= \mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{u}_\delta) + 2\|u_{r\delta} + iku_{\theta\delta}\|_{\mathcal{L}_{-1}^2}^2 + \|u_{z\delta}\|_{\mathcal{L}_{-1}^2}^2 \end{aligned}$$

On a alors $\mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{u}_\delta, \mathbf{u}_\delta) \geq \lambda \|\mathbf{u}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}^2$. ■

Proposition 3.3.2 Pour k fixé, il existe c indépendant de k et de δ tels que

$$\forall q_\delta \in M_\delta(\Omega), \forall \mathbf{v}_\delta \in \mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega) \\ \mathcal{B}_{k,\delta}(\mathbf{v}_\delta, q_\delta) \leq c \|\mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} \|q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)}.$$

Preuve On a

$$\mathcal{B}_{k,\delta}(\mathbf{v}_\delta, q_\delta) = b_\delta(v_{r\delta}, v_{z\delta}; q_\delta) + ik(v_{\theta\delta}, q_\delta)_\delta.$$

Si $|k| \geq 2$, on a

$$|b_\delta(v_{r\delta}, v_{z\delta}; q_\delta)| \leq c_1 (\|v_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^2} + \|v_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^2}) \|q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)} \text{ et } |ik(v_{\theta\delta}, q_\delta)_\delta| \leq c_2 \|v_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1} \|q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)}$$

Si $|k| = 1$, on a

$$|b_\delta(v_{r\delta}, v_{z\delta}; q_\delta)| \leq c_1 (\|v_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|v_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1}) \|q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)} \text{ et } |ik(v_{\theta\delta}, q_\delta)_\delta| \leq c_2 \|v_{\theta\delta}\|_{\mathcal{X}_1} \|q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)}$$

D'où le résultat. ■

Proposition 3.3.3 Il existe c indépendant de δ et de k , (avec $|k| \leq K$) tel que :

$$\forall q_\delta \in M_\delta(\Omega), \sup_{\mathbf{v}_\delta \in \mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega)} \frac{\mathcal{B}_{k,\delta}(\mathbf{v}_\delta, q_\delta)}{\|\mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}} \geq c\beta_{K,\delta} \|q_\delta\|_{L_1^2(\Omega)}$$

où

$$\beta_{K,\delta} = K^{-1} N_\delta^{-\frac{1}{2}} (\log N_\delta)^{-1}.$$

Preuve Soit $q_\delta \in M_\delta(\Omega)$. On a $q_\delta|_{\Omega_\ell} \in \mathbb{P}_{N_\ell-2}(\Omega_\ell)$, or d'après [8, Proposition X.2.14 et (X.2.32)] et [8, (XI.1.51)] on peut construire sur chaque sous domaine Ω_ℓ , $\mathbf{v}_{N_\ell} \in \mathbb{P}_{N_\ell}^\circ(\Omega_\ell)^3$, tel que

$$\forall q \in \mathbb{P}_{N_\ell-2}(\Omega_\ell), \sup_{\mathbf{v}_{N_\ell} \in \mathbb{P}_{N_\ell}^\circ(\Omega_\ell)^3} \frac{\mathcal{B}_{k,N_\ell}(\mathbf{v}_{N_\ell}, q)}{\|\mathbf{v}_{N_\ell}\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)}} \geq cK^{-1} N_\ell^{-\frac{1}{2}} (\log N_\ell)^{-1} \|q\|_{L_1^2(\Omega_\ell)} \quad (3.3.13)$$

On pose ensuite \mathbf{v}_δ avec $\mathbf{v}_\delta|_{\Omega_\ell} = \mathbf{v}_{N_\ell}$ et on a le résultat. ■

3.3.3 Estimation d'erreurs

Proposition 3.3.4 Soit (\mathbf{u}^k, p^k) la solution du problème (3.3.3) et $(\mathbf{u}_\delta^k, p_\delta^k)$ la solution du problème (3.3.4). Alors on a :

$$\|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3} + \beta_{K,\delta} \|p^k - p_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)} \leq c \left\{ \inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathbb{V}_{k,\delta}} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} \right. \\ + \sup_{\mathbf{w}_\delta \in \mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega)} \frac{\mathcal{A}_k(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta)}{\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}} \\ + \inf_{q_\delta \in M_\delta} \|p^k - q_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)} \\ + \sup_{\mathbf{z}_\delta \in \mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega)} \frac{\int_\Omega \mathbf{f}^k \mathbf{z}_\delta(r, z) r dr dz - \left(\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}^k, \mathbf{z}_\delta \right)_\delta}{\|\mathbf{z}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}} \\ + \sup_{\mathbf{y}_\delta \in \mathbb{X}_{k,\delta}(\Omega)} \frac{\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} \left\{ -\frac{\partial \mathbf{u}^k}{\partial \mathbf{n}_m} + p^k \mathbf{n}(\tau) \right\} \cdot [\mathbf{y}_\delta](\tau) d\tau}{\|\mathbf{y}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}} \left. \right\}.$$

Preuve La preuve est classique. On utilise la démarche des preuves des propositions 3.2.2 et 3.2.4, et on remplace $(\mathcal{A}(\cdot, \cdot))$ resp $\mathcal{A}_\delta(\cdot, \cdot)$ resp $b_\delta(\cdot, \cdot)$ par $\mathcal{A}_k(\cdot, \cdot)$ resp $\mathcal{A}_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$ resp $\mathcal{B}_{k,\delta}(\cdot, \cdot)$, la norme $\|\cdot\|_{\mathbb{Z}}$ par $\|\cdot\|_{\mathcal{X}_3}$ et l'espace \mathbb{V}_δ par $\mathbb{V}_{k,\delta}$. ■

Proposition 3.3.5 Soit $\mathbf{u}^k = (u_r^k, u_\theta^k, u_z^k)$ la solution du problème 3.2.3, on suppose que $\mathbf{u}^k|_{\Omega_\ell} \in \mathbf{H}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)$ alors il existe \mathbf{v}_δ dans $\mathbb{V}_{k,\delta}$ et c une constante positive tels que :

$$\|\mathbf{u}^k - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} \leq c\lambda_\delta^{\frac{3}{4}} \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\ell^k\|_{\mathbf{H}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}. \quad (3.3.14)$$

Preuve Soit $\mathbf{u}^k = (u_r^k, u_\theta^k, u_z^k)$ la solution du problème (3.2.2). On pose v_δ^k tel que $v_{r,\delta}^k$ et $v_{z,\delta}^k$ sont déduits de la construction faite dans la preuve de la proposition 3.2.3, c'est-à-dire pour construire $v_{r,\delta}^k$, on pose z_δ^1 tel que $z_\ell^1 = \bar{\Pi}_{N_\ell}^* u_{r,\ell}$, ensuite on pose

$$z_\delta^2 = \sum_{\mu=1}^{M^+} \sum_{c \in C_\mu^+} (u_r - z_{\delta|\Omega_\mu^+}^1)(e) \bar{\Phi}_{\mu,e}^* \quad , \quad z_\delta^{12} = z_\delta^1 + z_\delta^2, \quad \sigma_{\gamma_m^-} = \bar{\pi}_{N_m^-}^{*,2} (z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-},$$

et

$$\sigma_{\gamma_m^-}^n = \partial_n \left(\bar{\pi}_{N_m^-}^{*,2} (z_{\delta|\gamma_m^+}^{12} - z_{\delta|\gamma_m^-}^{12})|_{\gamma_m^-} \right), \quad u_{r,\delta}^k = z_\delta^1 + z_\delta^2 + \sum_{m=1}^{M^-} \bar{\mathcal{R}}^{2,\gamma_m^-}(\sigma_{\gamma_m^-}, \sigma_{\gamma_m^-}^n)$$

On définit $v_{z,\delta}^k$ de la même façon en changeant v_r par v_z . On pose ensuite

$$v_{\theta,\delta}^k = -ik(\partial_r(rv_{r,\delta}^k) + \partial_z(rv_{z,\delta}^k)). \quad (3.3.15)$$

On voit que par cette construction, que $v_{r,\delta}^k$, $v_{z,\delta}^k$ et $v_{\theta,\delta}^k$ sont nuls sur le bord et vérifient la condition (3.3.7). Ensuite on a

$$\sum_{\ell=1}^L \|u_r^k - v_{r,\delta}^k\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)} \leq c\lambda_\delta^{\frac{3}{4}} \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|u_r^k\|_{H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)},$$

et

$$\sum_{\ell=1}^L \|u_z^k - v_{z,\delta}^k\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)} \leq c\lambda_\delta^{\frac{3}{4}} \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|u_r^k\|_{H_{(k)}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}.$$

Enfin la condition

$$\sum_{\ell=1}^L \|u_\theta^k - v_{\theta,\delta}^k\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)} \leq c\lambda_\delta^{\frac{3}{4}} \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|u^k\|_{\mathbf{H}^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)}$$

se déduit de la condition (3.3.15). ■

Remarque 3.3.3 1) Dans la preuve, on utilise toujours la condition $K \leq N_\delta$

2) Le terme $\mathcal{A}_k(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta)$ s'annule si on cherche \mathbf{v}_δ dans $\mathbb{V}_{k,\delta} \cap \mathbb{P}_{\delta-1}$.

Théorème 3.3.1 Soit (\mathbf{u}^k, p) la solution du problème (3.2.2) et \mathbf{u}_δ^k la solution du problème (3.2.10). On suppose que $\mathbf{u}^k|_{\Omega_\ell} \in \mathbf{H}_1^{\sigma_\ell+1}(\Omega_\ell)$, $p|_{\Omega_\ell} \in H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)$ avec $s_\ell > \frac{1}{2}$ ($s_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$) et $\mathbf{f}|_{\Omega_\ell} \in \mathbf{H}_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)$ avec $\sigma_\ell > 1$ ($\sigma_\ell > \frac{3}{2}$ si $\ell \leq L_0$). Alors on distingue deux cas :

1) **Cas homogène** : Il existe une constante positive c telle qu'on a

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3} + \beta_{K,\delta} \|p^k - p_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)} &\leq c \left\{ (1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \log(N_\ell)^{\theta_\ell} \|\mathbf{u}^k\|_{\mathbf{H}_1^{\sigma_\ell+1}(\Omega_\ell)} \right. \\ &\quad + \sum_{\ell=1}^L \log(N_\ell)^{\theta_\ell} \|p^k\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)} \\ &\quad \left. + \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-\sigma_\ell} \|\mathbf{f}^k\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)^3} \right\}. \end{aligned}$$

et θ_ℓ est égal à 1 si l'un des côtés de Ω_ℓ est γ_m^- et intersecte au moins deux sous-domaines $\bar{\Omega}_{\ell'}$, $\ell' \neq \ell$ et 0 sinon. Et λ_ℓ est donné dans (2.3.38).

2) **Cas non homogène** : Il existe une constante positive c telle qu'on a

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3} + \beta_{K,\delta} \|p^k - p_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)} &\leq c \left\{ (1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \beta_\delta^{-1} \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} \|\mathbf{u}^k\|_{\mathbf{H}_1^{\sigma_\ell+1}(\Omega_\ell)} \right. \\ &\quad + \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} \|p^k\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)} \\ &\quad \left. + \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-\sigma_\ell} \|\mathbf{f}^k\|_{H_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)^3} \right\}. \end{aligned}$$

Preuve 1) On a $\sup_{\mathbf{w}_\delta \in \mathcal{X}_{k,\delta}(\Omega)} \frac{\mathcal{A}_k(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta)}{\|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|\mathbf{u}^k\|_{\mathbf{H}_1^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)}$.

En effet en utilisant la remarque 3.3.1 et (3.3.8) on a

$$\mathcal{A}_k(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) - \mathcal{A}_{k,\delta}(\mathbf{v}_\delta, \mathbf{w}_\delta) \leq \beta \|\mathbf{v}_\delta - \mathbf{x}_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_3} \|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}.$$

et

$$\|\mathbf{v}_\delta - \mathbf{x}_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_3} \|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} \leq (\|\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} + \|\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{x}_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_3}) \|\mathbf{w}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}.$$

a) Si $|k| \geq 2$ on a

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{x}_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_3} &= \left(\sum_{\ell=1}^L \|u_{r\delta}^k - x_{r\delta-1}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\quad + \left(\sum_{\ell=1}^L \|u_{\theta\delta}^k - x_{\theta\delta-1}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\quad + \left(\sum_{\ell=1}^L \|u_{z\delta}^k - x_{z\delta-1}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

(*) Si $|k| > s$, la norme $\|\cdot\|_{H_{(k),*}^s(\Omega_\ell)} = \|\cdot\|_{H_{(k)}^s(\Omega_\ell)}$. On pose alors $\mathbf{x}_{r\delta-1} = \Pi_{N_{\ell-1}}^{(k)} u_r^k$, $\mathbf{x}_{\theta\delta-1} = \Pi_{N_{\ell-1}}^{(k)} u_\theta^k$ et $\mathbf{x}_{z\delta-1} = \Pi_{N_{\ell-1}}^{(k)} u_z^k$ et on applique [8, Proposition V.4.2] pour déduire que $\|\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{x}_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_3} \leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell)}$.

(**) Si $|k| \leq s$, la norme $\|\cdot\|_{H_{(k),*}^s(\Omega_\ell)} = (\|\cdot\|_{H_{\mp}^s(\Omega_\ell)}$ ou $\|\cdot\|_{V_{\mp}^s(\Omega_\ell)}$) suivant la parité de k et s . Alors on a :

$$\|\cdot\|_{H_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell)} \leq c(s) \|\cdot\|_{H_{(k),*}^s(\Omega_\ell)}.$$

D'où $\|\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{x}_{\delta-1}\|_{\mathcal{X}_3} \leq c \sum_{\ell=1}^L N^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell)}$.

Le cas $|k| = 1$ se traite de la même façon.

On peut aussi étendre le résultat [8, lemme X.1.9] pour déduire qu'il existe un opérateur $\tilde{\Pi}_{N_{\ell-1}}^{div}$ qui satisfait

$$\|\mathbf{v} - \tilde{\Pi}_{N_{\ell-1}}^{div} \mathbf{v}\|_{H_{(k)}^1(\Omega_\ell)} \leq c N^{-s_\ell} \|\mathbf{v}\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell)}$$

avec $\mathbf{v} \in \mathbf{H}_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell) \cap \mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)$. On pose alors $\mathbf{x}_{\delta-1|\Omega_\ell} = \tilde{\Pi}_{N_{\ell-1}}^{div} \mathbf{u}_{|\Omega_\ell}^k$, on somme sur ℓ et on utilise la remarque 3.3.1 pour conclure. Les majorations

$$\sup_{\mathbf{z}_\delta \in \mathbb{X}_{k,\delta}} \frac{\int_{\Omega} \mathbf{f}^k \mathbf{z}_\delta(r,z) r dr dz - (\mathbf{f}^k, \mathbf{z}_\delta)_\delta}{\|\mathbf{z}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}} \leq \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-\sigma_\ell} \|\mathbf{f}_\ell^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell)},$$

$$\inf_{q_\delta \in M_\delta} \|p^k - q_\delta^k\|_{L^2_0(\Omega)} \leq \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|p_\ell^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell)},$$

$$\text{et } \sup_{\mathbf{y}_\delta \in \mathbb{Y}_{k,\delta}} \frac{\sum_{\tau_m \in S} \int_{\tau_m} \{-\frac{\partial \mathbf{u}_\delta^k}{\partial \mathbf{n}} + p^k \mathbf{n}(\tau)\} \cdot \mathbf{y}_\delta(\tau) d\tau}{\|\mathbf{y}_\delta\|_{\mathcal{X}_3}} \leq c \sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} (\log N_\ell)^{\theta_\ell} (\|p_\ell^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell)} + \|\mathbf{u}_\ell^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell)}).$$

sont prouvés exactement comme celles du théorème 3.2.2, avec la remarque que

$$\|\cdot\|_{H_{\mp}^{s_\ell}(\Omega_\ell)} \leq \|\cdot\|_{H_{(k),*}^{s_\ell}(\Omega_\ell)} \leq c \|\cdot\|_{H_{(k)}^{s_\ell}(\Omega_\ell)} \forall k \in \mathbb{Z}.$$

5) Dans le cas homogène, d'après la proposition 3.3.5 on a

$$\inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathbb{V}_{k,\delta}} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} \leq c \lambda^{\frac{3}{2}} N_\delta^{-s} \|\mathbf{u}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s+1}(\Omega)}.$$

5.a) Dans le cas non homogène, on utilise (3.2.43) pour déduire que

$$\inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathbb{V}_{k,\delta}} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{X}_3} \leq c \lambda^{\frac{1}{2}} N_\delta^{-s} \beta_\delta^{-1} \|\mathbf{u}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s+1}(\Omega)}.$$

où $\beta_\delta^{-1} = \tilde{N}_\delta^{\frac{1}{2}} (\log \tilde{N}_\delta)$. ■

Théorème 3.3.2 On suppose que $\mathbf{f}^k \in \mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\Omega)$ et $\mathbf{g}^k \in \mathbf{H}_{(k)}^{s+1}(\Omega)$ avec $s > \frac{5}{2}$. Soit (\mathbf{u}^k, p^k) les solutions du problème (3.2.2) et (u_δ^k, p_δ^k) du problème (3.3.4). On distingue alors deux cas

1) **Cas homogène** : Il existe une constante positive c telle que l'on a :

$$\|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3} + \beta_{K,\delta} \|p^k - p_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, E_\delta^S\} \|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\Omega)} \quad (3.3.16)$$

2) **Cas non homogène** : Il existe une constante positive c telle que l'on a :

$$\|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3} + \beta_{K,\delta} \|p^k - p_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \beta_\delta^{-1} E_\delta^S\} \left(\|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\Omega)} + \|\mathbf{g}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s+1}(\Omega)} \right) \quad (3.3.17)$$

où $N_\delta = \min\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$, E_δ^S resp λ_δ sont définis dans (3.2.46) resp (2.3.25).

Preuve On écrit $u_r^k = u_{r,reg}^k + \eta u_{r,e}^{S(k)} + \sum_{\ell=2} \alpha u_{r,e}^{S(k)\ell}$, $u_z^k = u_{z,reg}^k + \eta u_{z,e}^{S(k)} + \sum_{\ell=2} \alpha u_{z,e}^{S(k)\ell}$ et $p^k = p_{reg}^k + \eta p_{pe}^{S(k)} + \sum_{\ell=2} \alpha p_{pe}^{S(k)\ell}$. D'une part on combine le théorème 2.4.7 et [8, Théorème XI.1.12] pour estimer $\|u_r^k - S_{r,e}^{(k)}\|_{\mathcal{X}_1^2}$, $\|u_z^k - S_{z,e}^{(k)}\|_{\mathcal{X}_1^2}$ et $\|p^k - S_{pe}^{(k)}\|_{L_1^2(\Omega)}$ d'autre part on utilise le résultat du théorème 3.3.1 et (3.2.48) pour conclure. ■

Théorème 3.3.3 On suppose que $\mathbf{f} \in \mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\Omega)$ et $\mathbf{g} \in \mathbf{H}_{(k)}^{s+1}(\Omega)$, avec $s > \frac{5}{2}$. Soit \mathbf{u} la solution du problème (3.2.2) et \mathbf{u}_δ la solution du problème (3.2.10). On distingue deux cas :

1) **Cas homogène** : on a

$$\|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)^3} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1} (\log N_\delta)^\theta E_\delta^S\} \|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\Omega)}. \quad (3.3.18)$$

2) **Cas non homogène** : on a

$$\|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)^3} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1} \beta_\delta^{-1} (\log N_\delta)^\theta E_\delta^S\} \left(\|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\Omega)} + \|\mathbf{g}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s+1}(\Omega)} \right). \quad (3.3.19)$$

avec $\theta = 0$ si la décomposition est conforme et 1 sinon. $N_\delta = \min\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$ et E_δ^S resp λ_δ sont définis dans (3.2.46) resp (2.3.25).

Preuve On a

$$\|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{L_1^2(\Omega)^3} = \sup_{\mathbf{h} \in L_1^2(\Omega)^3} \frac{\langle \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k, \mathbf{h} \rangle}{\|\mathbf{h}\|_{L_1^2(\Omega)^3}}. \quad (3.3.20)$$

Pour toute fonction \mathbf{h} dans $L_1^2(\Omega)^3$, on note (χ^k, η^k) l'unique solution dans $\mathbf{H}_{(k)\circ}^1(\Omega_\ell) \times L_1^2(\Omega_\ell)$ du problème

$$\begin{cases} -\partial_r^2 \chi_{r,\ell}^k - \frac{1}{r} \partial_r \chi_{r,\ell}^k - \partial_z^2 \chi_{r,\ell}^k + \frac{1+k^2}{r^2} \chi_{r,\ell}^k + \frac{2ik}{r^2} \chi_{\theta,\ell}^k + \partial_r \eta_\ell^k & = h_{r,\ell}^k \text{ dans } \Omega_\ell \\ -\partial_r^2 \chi_{\theta,\ell}^k - \frac{1}{r} \partial_r \chi_{\theta,\ell}^k - \partial_z^2 \chi_{\theta,\ell}^k + \frac{1+k^2}{r^2} \chi_{\theta,\ell}^k - \frac{2ik}{r^2} \chi_{r,\ell}^k + \frac{ik}{r} \eta_\ell^k & = h_{\theta,\ell}^k \text{ dans } \Omega_\ell \\ -\partial_r^2 \chi_{z,\ell}^k - \frac{1}{r} \partial_r \chi_{z,\ell}^k - \partial_z^2 \chi_{z,\ell}^k + \frac{k^2}{r^2} \chi_{z,\ell}^k & + \partial_z \eta_\ell^k = h_{z,\ell}^k \text{ dans } \Omega_\ell \\ \partial_r \chi_{r,\ell}^k + \frac{1}{r} \chi_{r,\ell}^k + \frac{ik}{r} \chi_{\theta,\ell}^k + \partial_z \chi_{z,\ell}^k & = 0 \text{ dans } \Omega_\ell \end{cases} \quad \chi^k = 0 \begin{cases} \text{sur } \partial\Omega_\ell \text{ si } \ell \geq L_0 \\ \text{sur } \Gamma_\ell \text{ si } \ell \leq L_0 \end{cases} \quad (3.3.21)$$

En utilisant (3.3.3), on déduit que (χ^k, η^k) appartient à $\mathbf{H}_{(k)\circ}^1(\Omega) \times L_1^2(\Omega)$ et

$$\mathcal{A}_k(\chi^k, \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k) - \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi^k}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta^k \mathbf{n}_m \right) \cdot [\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k] d\tau = \langle \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k, \mathbf{h}^k \rangle$$

avec $\mathcal{A}_k(\cdot, \cdot)$ défini dans (3.3.2).

a) Pour majorer le terme $\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi^k}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta^k \mathbf{n}_m \right) \cdot [\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k] d\tau$ on procède de la même façon que dans (3.2.52). On a :

$$\left| \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi^k}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta^k \mathbf{n}_m \right) \cdot [\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k] d\tau \right| \leq cN_\delta^{-1} (\log N_\delta) \|\mathbf{h}^k\|_{L_1^2(\Omega)^3} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3}.$$

et

$$\left| \sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m^-} \left(\frac{\partial \chi^k}{\partial \mathbf{n}_m} + \eta^k \mathbf{n}_m \right) \cdot [\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k] d\tau \right| \leq cN_\delta^{-1} \|\mathbf{h}^k\|_{L_1^2(\Omega)^3} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3}.$$

dans le cas conforme.

b) Pour majorer le terme $\mathcal{A}_k(\chi^k, \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k)$, on utilise la même démarche que dans (2) de la preuve du théorème 3.2.4. On a

$$\mathcal{A}_k(\chi^k, \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k) = \mathcal{A}_k(\chi^k - \chi_{\delta-1}^k, \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k) + \mathcal{A}_k(\chi_{\delta-1}^k, \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k),$$

On choisit $\chi_{\delta-1}$ tel que $\chi_{\delta-1}|_{\Omega_\ell} = \left(\tilde{\Pi}_{N_\ell-1}^{div(r)} \circ \tilde{\Pi}_{N_\ell-1}^{div(z)} \right) (\chi_\ell)$, $\tilde{\Pi}_{N_\ell-1}^{div(r)}$ resp $\tilde{\Pi}_{N_\ell-1}^{div(z)}$ sont déduits de $\Pi_{N_\ell-1}^{div(r)}$ resp $\Pi_{N_\ell-1}^{div(z)}$ par translation et homothétie et où $\Pi_N^{div(r)}$ est l'opérateur de projection de $\mathbf{H}_{(k)\circ}^1(\Omega)$ dans l'ensemble des fonctions qui sont des polynômes de degré inférieur à N dans la direction r , et $\Pi_N^{div(z)}$ est l'opérateur de projection de $\mathbf{H}_{(k)\circ}^1(\Omega)$ dans l'ensemble des polynômes de degré inférieur à N dans la direction z . Et qui sont en plus à divergence nulle. Avec un tel choix $\chi_{\delta-1} \in \mathbf{H}_{(k)\circ}^1(\Omega) \cap \nabla_{k,\delta} \cap \nabla_k$, et on a

$$\mathcal{A}_k(\chi_{\delta-1}^k, \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k) = \langle \mathbf{f}^k, \chi_{\delta-1}^k \rangle - (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}^k, \chi_{\delta-1}^k)_\delta. \quad (3.3.22)$$

et

$$\|\chi^k - \chi_{\delta-1}^k\|_{\mathcal{X}_3} \leq cN_\delta^{-1} \sum_{\ell=1}^L \|\chi^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)}.$$

Ceci implique que

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_k(\chi^k - \chi_{\delta-1}^k, \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k) &\leq c \|\chi^k - \chi_{\delta-1}^k\|_{\mathcal{X}_3} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3} \\ &\leq cN_\delta^{-1} \sum_{\ell=1}^L \|\chi^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3} \\ &\leq cN_\delta^{-1} \|\mathbf{h}^k\|_{L_1^2(\Omega)^3} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3}. \end{aligned} \quad (3.3.23)$$

En effet d'après [8], on a puisque Ω_ℓ est convexe

$$\|\chi^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)} + \|\eta^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \leq c \|\mathbf{h}^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)^3}$$

d'où

$$\sum_{\ell=1}^L \left(\|\chi^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)} + \|\eta^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)} \right) \leq c \|\mathbf{h}^k\|_{L^2_1(\Omega)^3}.$$

On sait d'après 2) de la preuve du théorème 3.3.1 que si $\mathbf{f}^k \in \mathbf{H}_{(k)}^s(\Omega)$ alors on a :

$$|\langle \mathbf{f}^k, \chi_{\delta-1}^k \rangle - (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}^k, \chi_{\delta-1}^k)_\delta| \leq c N_\delta^{1-s} \|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^s(\Omega)} (\|\chi^k - \chi_{\delta-1}^k\|_{\mathcal{X}_3} + \|\chi^k\|_{\mathcal{X}_3}). \quad (3.3.24)$$

Pour majorer $\|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathcal{X}_3}$, on utilise le théorème 3.3.1.

Enfin en combinant (3.3.16), (3.3.20), a), (3.3.23), (3.3.24) et le théorème 3.3.1 on déduit le résultat. ■

3.4 Retour au problème tridimensionnel

On pose

$$\check{\mathbf{u}}_K = \frac{1}{2\pi} \sum_{|k| \leq K} \mathcal{R}_\theta u^k(r, z) e^{ik\theta} \text{ et } \check{p}_K = \frac{1}{2\pi} \sum_{|k| \leq K} p^k(r, z) e^{ik\theta}. \quad (3.4.1)$$

Soit $(\check{\mathbf{u}}_{K,\delta}, \check{p}_{K,\delta})$ l'approximation de la solution $(\check{\mathbf{u}}, \check{p})$ du problème (3.1.1), avec

$$\check{\mathbf{u}}_{K,\delta} = \frac{1}{2\pi} \sum_{|k| \leq K} \mathcal{R}_\theta u_\delta^k(r, z) e^{ik\theta} \text{ et } \check{p}_{K,\delta} = \frac{1}{2\pi} \sum_{|k| \leq K} p_\delta^k(r, z) e^{ik\theta}, \quad (3.4.2)$$

Le couple $(\mathbf{u}_\delta^0, p_\delta^0)$ est la solution des problèmes (3.2.9) et (3.2.10) avec \mathbf{f}^0 et g^0 pour second membres. Le couple $(\mathbf{u}_\delta^k, p_\delta^k)$ avec $k \neq 0$ est la solution du problème (3.3.4) avec second membres \mathbf{f}^k et g^k .

Soit $(\check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*, \check{p}_{K,\delta}^*)$ l'approximation de la solution $(\check{\mathbf{u}}, \check{p})$ du problème (3.1.1), avec

$$\check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^* = \frac{1}{2\pi} \sum_{|k| \leq K} \mathcal{R}_\theta u_{K,\delta}^k(r, z) e^{ik\theta} \text{ et } \check{p}_{K,\delta}^* = \frac{1}{2\pi} \sum_{|k| \leq K} p_{K,\delta}^k(r, z) e^{ik\theta}. \quad (3.4.3)$$

Le couple $(\mathbf{u}_{K,\delta}^0, p_{K,\delta}^0)$ est la solution des problèmes (3.2.9) et (3.2.10) avec second membres \mathbf{f}_K^0 et g_K^0 . Le couple $(\mathbf{u}_{K,\delta}^k, p_{K,\delta}^k)$ avec $k \neq 0$ est la solution du problème (3.3.4) avec second membres \mathbf{f}_K^k et g_K^k .

Remarque 3.4.1 Si $\check{\mathbf{u}} \in \mathbf{H}^1(\check{\Omega})$, alors $\check{\mathbf{u}}_{K,\delta}$ et $\check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*$ n'appartiennent pas nécessairement à $\mathbf{H}^1(\check{\Omega})$. Pour le retour au problème 3D, on doit définir une norme qu'on appellera $\|\cdot\|_{\check{\mathcal{X}}_3}$.

Notation 3.4.1 On définit la norme $\check{\chi}_3$ par :

$$\|\cdot\|_{\check{\chi}_3} = \left(\sum_{\ell=1}^L \|\cdot\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4.4)$$

Théorème 3.4.1 Soit $s > \frac{5}{2}$, \check{f} est dans $\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})$ et \check{g} est dans $\mathbf{H}^{s+1}(\check{\Omega})$. Alors si $\left(\check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*, \check{p}_{K,\delta}^* \right)$ est l'approximation de la solution $(\check{\mathbf{u}}, \check{p})$ du problème (3.1.1).

1) **Cas homogène :**

$$\begin{aligned} \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{\check{\chi}_3} + \beta_{K,\delta} \|\check{p} - \check{p}_{K,\delta}^*\|_{L_1^2(\Omega)} &\leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \{ \sup(N_\delta^{1-s}, E_\delta^S) \\ &\quad + K^{1-s} \} \|\check{f}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})}. \end{aligned} \quad (3.4.5)$$

2) **Cas non homogène :**

$$\begin{aligned} \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{\check{\chi}_3} + \beta_{K,\delta} \|\check{p} - \check{p}_{K,\delta}^*\|_{L_1^2(\Omega)} &\leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \{ \sup(N_\delta^{1-s}, \beta_\delta^{-1} E_\delta^S) + K^{1-s} \} \\ &\quad (\|\check{f}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})} + \|\check{g}\|_{\mathbf{H}^{s+1}(\check{\Omega})}). \end{aligned} \quad (3.4.6)$$

où $N_\delta = \min \{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$ et E_δ^S resp λ_δ sont définis dans (3.2.46) resp (2.3.25).

Preuve 1) Cas homogène :

a) D'une part on a $\|\cdot\|_{\check{\chi}_3} \simeq \sum_{\ell=1}^L \|\cdot\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)}$, d'autre part on décompose $\|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{\check{\chi}_3}$ en trois parties :

$$\begin{aligned} \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{\check{\chi}_3} &\leq c \sum_{\ell=1}^L \{ \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_K\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)} \\ &\quad + \|\check{\mathbf{u}}_K - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)} + \|\check{\mathbf{u}}_{K,\delta} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)} \}. \end{aligned}$$

On distingue trois cas :

(*) On a d'après (1.6.6) et (1.6.5)

$$\sum_{\ell=1}^L \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_K\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)} \leq c \sum_{\ell=1}^L \sum_{k \in \mathbb{Z}} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)}.$$

On remarque que

$$\sum_{\ell=1}^L \|\cdot\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)} \simeq \|\cdot\|_{\chi_3} \text{ si } k \neq 0$$

et

$$\sum_{\ell=1}^L \|\mathbf{u}^{(0)} - u\|_{\mathbf{H}_{(0)}^1(\Omega_\ell)} \leq c \left\| u_\theta^{(0)} - u_{\theta\delta}^{(0)} \right\|_{\chi_1^2} + \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta^{(0)}\|_{\mathbb{Z}}.$$

Donc on peut utiliser (2.3.53), (3.2.49) et (3.3.16) et le fait que $E_\delta \leq E_\delta^S$ pour déduire que

$$\sum_{\ell=1}^L \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_K\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N^{1-s}, E_\delta^S\} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\Omega)}.$$

Enfin l'équivalence des normes $\sum_{k \in \mathbb{Z}} \|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\Omega)}$ et $\|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})}$, donne que

$$\sum_{\ell=1}^L \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_K\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N^{1-s}, E_\delta^S\} \|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})}.$$

(**) On a d'après (1.6.8)

$$\sum_{\ell=1}^L \|\check{\mathbf{u}}_K - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)} \leq c \sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)},$$

on conclut comme dans (*).

(***) En utilisant (3.2.9) et (3.3.8) si $k = 0$, on a

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}_\delta - \mathbf{u}_\delta^*\|_{\mathbb{Z}}^2 &\leq \gamma \mathcal{A}_\delta(\mathbf{u}_\delta - \mathbf{u}_\delta^*, \mathbf{u}_\delta - \mathbf{u}_\delta^*) = \gamma(\mathcal{I}_\delta(\mathbf{f}^0 - \mathbf{f}_K^0), \mathbf{u}_\delta^0 - \mathbf{u}_\delta^{0*}) \\ \|u_{\theta\delta} - u_{\theta\delta}^*\|_{\mathcal{X}_1^2}^2 &\leq \beta a_{1\delta}(u_{\theta\delta} - u_{\theta\delta}^*, u_{\theta\delta} - u_{\theta\delta}^*) = \beta(\mathcal{I}_\delta(\mathbf{f}_\theta^0 - \mathbf{f}_{\theta K}^0), u_{\theta\delta} - u_{\theta\delta}^*) \end{aligned}$$

ce qui donne

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}_\delta - \mathbf{u}_\delta^*\|_{\mathbb{Z}} + \|u_{\theta\delta} - u_{\theta\delta}^*\|_{\mathcal{X}_1} &\leq \|\mathcal{I}_\delta(\mathbf{f}^0 - \mathbf{f}_K^0)\|_{\mathbb{Z}} + \|\mathcal{I}_\delta(\mathbf{f}_\theta^0 - \mathbf{f}_{\theta K}^0)\|_{\mathcal{X}_1} \\ &\leq \|\mathcal{I}_\delta(\mathbf{f}_3^0 - \mathbf{f}_{3K}^0)\|_{\mathcal{X}_3} \end{aligned}$$

avec $\mathbf{f}_3^0 = (f_r^0, f_\theta^0, f_z^0)$. D'autre part si $k \neq 0$, on a d'après (3.3.8) :

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{u}_\delta^{k*}\|_{\mathcal{X}_3}^2 &\leq \lambda \mathcal{A}_k(\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{u}_\delta^{k*}, \mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{u}_\delta^{k*}) \\ &= \lambda(\mathcal{I}_\delta(\mathbf{f}^k - \mathbf{f}_K^k), \mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{u}_\delta^{k*}) \leq c \|\mathcal{I}_\delta(\mathbf{f}^k - \mathbf{f}_K^k)\|_{\mathcal{X}_3} \|\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{u}_\delta^{k*}\|_{\mathcal{X}_3}. \end{aligned}$$

D'où on obtient :

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^L \|\check{\mathbf{u}}_{K,\delta} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{\mathbf{H}^1(\check{\Omega}_\ell)} &\leq c \sum_{|k| \leq K} \left\{ \sum_{\ell=1}^L \|\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{u}_\delta^{k*}\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\Omega_\ell)} \right\} \\ &\leq c \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{u}_\delta^k - \mathbf{u}_\delta^{k*}\|_{\mathcal{X}_3} \\ &\leq c \sum_{|k| \leq K} \|\mathcal{I}_\delta(\mathbf{f}^k - \mathbf{f}_K^k)\|_{\mathcal{X}_3} \\ &\leq c \sum_{|k| \leq K} \{ \|\mathbf{f}^k - \mathcal{I}_\delta \mathbf{f}^k\|_{\mathcal{X}_3} + \|\mathbf{f}_K^k - \mathcal{I}_\delta \mathbf{f}_K^k\|_{\mathcal{X}_3} \\ &\quad + \|\mathbf{f}^k - \mathbf{f}_K^k\|_{\mathcal{X}_3} \}. \end{aligned}$$

Pour le premier terme $\sum_{|k| \leq K} \{\|\mathbf{f}^k - \mathcal{I}_\delta \mathbf{f}^k\|_{\mathcal{X}_3}\}$ on a :

$$\begin{aligned} \sum_{|k| \leq K} \{\|\mathbf{f}^k - \mathcal{I}_\delta \mathbf{f}^k\|_{\mathcal{X}_3}\} &\leq c \sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{f}^k - \mathcal{I}_\delta \mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \\ &\leq cN^{1-s} \sum_{\ell=1}^L \|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\tilde{\Omega}_\ell)}. \end{aligned}$$

et pour le terme $\sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{f}_K^k - \mathcal{I}_\delta \mathbf{f}_K^k\|_{\mathcal{X}_3}$, on a :

$$\begin{aligned} \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{f}_K^k - \mathcal{I}_\delta \mathbf{f}_K^k\|_{\mathcal{X}_3} &\leq c \sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{f}_K^k - \mathcal{I}_\delta \mathbf{f}_K^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \\ &\leq cN^{1-s} \sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{f}_K^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\tilde{\Omega}_\ell)} \\ &\leq cN^{1-s} \sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \{\|\mathbf{f}^k - \mathbf{f}_K^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\tilde{\Omega}_\ell)} + \|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\tilde{\Omega}_\ell)}\} \end{aligned}$$

On utilise de nouveau (1.6.6) et (1.6.8) pour conclure que

$$\sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{f}^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\tilde{\Omega}_\ell)} \leq c\|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\tilde{\Omega})},$$

et

$$\sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \{\|\mathbf{f}^k - \mathbf{f}_K^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^{s-1}(\tilde{\Omega}_\ell)}\} \leq c\|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\tilde{\Omega})}.$$

Pour le dernier terme $\sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{f}^k - \mathbf{f}_K^k\|_{\mathcal{X}_3}$, on a

$$\begin{aligned} \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{f}^k - \mathbf{f}_K^k\|_{\mathcal{X}_3} &\leq c \sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{f}^k - \mathbf{f}_K^k\|_{\mathbf{H}_{(k)}^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \\ &\leq c \sum_{\ell=1}^L \|\check{\mathbf{f}} - \check{\mathbf{f}}_K\|_{\mathbf{H}^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \end{aligned}$$

On utilise (*) pour conclure que

$$c \sum_{\ell=1}^L \|\check{\mathbf{f}} - \check{\mathbf{f}}_K\|_{\mathbf{H}^1(\tilde{\Omega}_\ell)} \leq cK^{1-s} \|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\tilde{\Omega}_\ell)}$$

Finalement, en utilisant (*), (**) et (***) on obtient

$$\|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{\check{\mathcal{X}}_3} \leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \{ \sup(N_\delta^{1-s}, E_\delta^S) + K^{1-s} \} \|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})}.$$

On utilise la même démarche pour démontrer que

$$\begin{aligned} \beta_{K,\delta} \|\check{p} - \check{p}_{K,\delta}^*\|_{L^2_1(\check{\Omega})} &\leq C(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \{ \sup(N_\delta^{1-s}, E_\delta^S) \\ &\quad + K^{1-s} \} \|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})}, \end{aligned}$$

et la preuve est terminée.

2) **Cas non homogène :**

Comme dans le cas axisymétrique et général, le terme β_δ^{-1} intervient dans le facteur contenant $\|\mathbf{u}\|_{\mathbb{Z}}$ et $\|\mathbf{u}^k\|_{\mathcal{X}_3}$. En utilisant 1), (3.2.50) et en sommant sur k dans l'inégalité (3.3.17), on obtient (3.4.6). ■

Théorème 3.4.2 *On suppose que $\check{\mathbf{f}} \in \mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})$ et $\check{\mathbf{g}} \in \mathbf{H}^{s+1}(\check{\Omega})$ avec $s > \frac{5}{2}$. Soit $\check{\mathbf{u}}$ la solution du problème (3.1.1) $\check{\mathbf{u}}_{K,\delta}$ et $\check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*$ les sommes finies induites dans (3.4.2) et (3.4.3).*

1) **Cas homogène :** on a

$$\begin{aligned} \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{L^2(\check{\Omega})^3} &\leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \{ \sup(N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1} E_\delta^S) \\ &\quad + K^{1-s} \} \|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})}. \end{aligned} \quad (3.4.7)$$

2) **Cas non homogène :** on a

$$\begin{aligned} \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{L^2(\check{\Omega})^3} &\leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{1}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, N_\delta^{-1} \beta_\delta^{-1} (\log N_\delta)^q E_\delta^S, K^{1-s}\} \\ &\quad (\|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})} + \|\check{\mathbf{g}}\|_{\mathbf{H}^{s+1}(\check{\Omega})}). \end{aligned} \quad (3.4.8)$$

où $q = 0$ si la décomposition est conforme et 1 sinon. $N_\delta = \min\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\}$ et E_δ^S resp λ_δ sont définis dans (3.2.46) resp (2.3.25).

Preuve 1) On a

$$\|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}\|_{L^2(\check{\Omega})^3} \leq \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_K\|_{L^2(\check{\Omega})^3} + \|\check{\mathbf{u}}_K - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}\|_{L^2(\check{\Omega})^3} \quad (3.4.9)$$

Or d'après

$$\|\check{\mathbf{u}}\|_{\mathbf{H}^{s+1}(\check{\Omega})} \leq c \|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})}.$$

on déduit que

$$\begin{aligned} \|\check{\mathbf{u}} - \check{\mathbf{u}}_{K,\delta}\|_{L^2(\check{\Omega})^3} &\leq c \{ K^{-1-s} \|\check{\mathbf{u}}\|_{\mathbf{H}^{s+1}(\check{\Omega})} + \sum_{\ell=1}^L \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)^3} \} \\ &\leq c \{ K^{-1-s} \|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})} + \sum_{|k| \leq K} \left(\sum_{\ell=1}^L \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{L^2_1(\Omega_\ell)^3} \right) \}. \\ &\leq c \{ K^{-1-s} \|\check{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\check{\Omega})} + \sum_{|k| \leq K} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{L^2_1(\check{\Omega})^3} \} \end{aligned} \quad (3.4.10)$$

On utilise le théorème 3.2.4, pour majorer $\|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k\|_{L^2_1(\Omega)^3}$.

2) La coercivité et la continuité de \mathcal{A}_k et le fait que

$$\mathcal{A}_k(\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k, \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k) = \langle \mathcal{I}_\delta \mathbf{f}^k, \mathbf{u}^k - \mathbf{u}_\delta^k \rangle.$$

nous mène à utiliser la même démarche que dans la preuve du théorème 2.5.1, pour déduire que

$$\|\tilde{\mathbf{u}}_{K,\delta} - \tilde{\mathbf{u}}_{K,\delta}^*\|_{L^2(\tilde{\Omega})^3} \leq c(K^{1-s} + N_\delta^{1-s}) \|\tilde{\mathbf{f}}\|_{\mathbf{H}^{s-1}(\tilde{\Omega})}.$$

En combinant 1) et 2), on déduit le résultat. ■

3.4.1 Algorithme de Strang et Fix

Le problème discret : cas homogène

Dans cette partie on va agrandir l'espace discret où est définie la vitesse. Pour la pression, on garde l'espace M_δ . On va se limiter au cas **homogène** avec $\omega_1 = \frac{3\pi}{2}$ et $\omega_2 = \frac{\pi}{2}$. Pour cela, soit \mathbf{S}_1 la première fonction singulière de la vitesse, on définit, alors l'espace $\tilde{\mathbf{Z}}_\delta$ comme suit :

$$\tilde{\mathbf{Z}}_\delta = \mathbf{Z}_\delta + \mathbb{R}\mathbf{S}_1$$

C'est à dire, si $\tilde{\mathbf{u}}_\delta$ appartient à $\tilde{\mathbf{Z}}_\delta$ il existe \mathbf{u}_δ qui appartient à \mathbf{Z}_δ et λ appartenant à \mathbb{R} tel que :

$$\tilde{\mathbf{u}}_\delta = \mathbf{u}_\delta + \lambda \mathbf{S}_1$$

On sait que \mathbf{S}_{1v} appartient à $V_1^1(\Omega) \times H_1^1(\Omega)$, on définit, alors la norme suivante :

$$\|\tilde{\mathbf{u}}_\delta\|_{\tilde{\mathbf{Z}}_\delta} = (\|\mathbf{u}_\delta\|_{\mathbf{Z}_\delta}^2 + |\lambda|^2 \|\mathbf{S}_1\|_{\mathbf{Z}_\delta}^2)^{\frac{1}{2}}$$

Ainsi, on définit le problème discret comme suit :

Pour une donnée $\mathbf{f} = (f_1, f_2)$ continue sur $\tilde{\Omega}$, trouver $\tilde{\mathbf{u}}_\delta = (\tilde{u}_{\delta r}, \tilde{u}_{\delta z})$ dans $\tilde{\mathbf{Z}}_\delta$ et p_δ dans M_δ tel que pour tout $\tilde{\mathbf{v}}_\delta = (\tilde{v}_{\delta r}, \tilde{v}_{\delta z})$ dans $\tilde{\mathbf{Z}}_\delta$ et pour tout q_δ appartenant à M_δ , on a :

$$\begin{cases} \hat{a}_\delta(\tilde{\mathbf{u}}_\delta, \tilde{\mathbf{v}}_\delta) + \hat{b}_\delta(\tilde{\mathbf{v}}_\delta, p_\delta) = (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, \tilde{\mathbf{v}}_\delta)_\delta \\ \hat{b}_\delta(\tilde{\mathbf{u}}_\delta, q_\delta) = 0 \end{cases} \quad (3.4.11)$$

avec

$$\hat{a}_\delta(\tilde{\mathbf{u}}_\delta, \tilde{\mathbf{v}}_\delta) = \hat{a}_{1\delta}(\tilde{u}_{\delta r}, \tilde{v}_{\delta r}) + \hat{a}_\delta(\tilde{u}_{\delta z}, \tilde{v}_{\delta z})$$

où $\hat{a}_\delta(\dots)$ est défini dans (2.5.21) et $\hat{a}_{1\delta}(\dots)$ est défini dans (2.5.37) pour $k = 1$, et

$$(\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, \tilde{\mathbf{v}}_\delta)_\delta = (\mathcal{I}_\delta f_r, \tilde{v}_{\delta r})_\delta + (\mathcal{I}_\delta f_z, \tilde{v}_{\delta z})_\delta.$$

Enfin, $\hat{b}_\delta(\dots)$ est définie de la façon suivante, pour $\tilde{\mathbf{u}}_\delta = \tilde{\mathbf{u}}_\delta + \lambda \mathbf{S}_{1v}$ dans $\tilde{\mathbf{Z}}_\delta$ et q_δ dans M_δ :

$$\hat{b}_\delta(\tilde{\mathbf{u}}_\delta, q_\delta) = -\sum_{\ell=1}^L (\text{div}_r \mathbf{u}_\delta, q_\delta)_{N_\ell} + \lambda \int_{\Omega_\ell} (\text{div}_r \mathbf{S}_1) q_\delta r dr dz. \quad (3.4.12)$$

Comme $\text{div}_r \mathbf{S}_{1v} = 0$, on a

$$\check{b}_\delta(\check{\mathbf{u}}_\delta, q_\delta) = b_\delta(\mathbf{u}_\delta, q_\delta)$$

Soit le noyau discret de $\check{b}_\delta(\cdot, \cdot)$

$$\check{\mathbb{V}}_\delta = \left\{ \check{\mathbf{v}}_\delta \in \check{\mathbf{Z}}_\delta, \check{b}_\delta(\check{\mathbf{v}}_\delta, q_\delta) = 0, \forall q_\delta \in M_\delta \right\}.$$

On va montrer que le problème (3.4.11) est bien posé, on commence par montrer les propriétés suivantes :

Proposition 3.4.1 *La forme bilinéaire $\hat{a}_\delta(\cdot, \cdot)$ est continue et coercive sur $\check{\mathbb{V}}_\delta$ et il existe deux constantes σ_δ et β_δ telles que*

$$\begin{aligned} \forall \check{\mathbf{u}}_\delta, \check{\mathbf{v}}_\delta &\in \check{\mathbb{V}}_\delta, \\ \hat{a}_\delta(\check{\mathbf{u}}_\delta, \check{\mathbf{v}}_\delta) &\leq \sigma_\delta \|\check{\mathbf{u}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta} \|\check{\mathbf{v}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta}, \\ \hat{a}_\delta(\check{\mathbf{u}}_\delta, \check{\mathbf{u}}_\delta) &\geq \beta_\delta \|\check{\mathbf{u}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta}^2. \end{aligned} \quad (3.4.13)$$

Preuve 1) On a $\hat{a}_\delta(\check{\mathbf{u}}_\delta, \check{\mathbf{v}}_\delta) = \hat{a}_{1\delta}(\check{u}_{r\delta}, \check{v}_{r\delta}) + \hat{a}_\delta(\check{u}_{z\delta}, \check{v}_{z\delta})$, et

$$\begin{aligned} |\hat{a}_\delta(\check{u}_{z\delta}, \check{v}_{z\delta})| &\leq \alpha \|\check{u}_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \|\check{v}_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} \\ |\hat{a}_{1\delta}(\check{u}_{r\delta}, \check{v}_{r\delta})| &\leq \alpha_1 \|\check{u}_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_*} \|\check{v}_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_*} \end{aligned}$$

D'où

$$\begin{aligned} |\hat{a}_\delta(\check{\mathbf{u}}_\delta, \check{\mathbf{v}}_\delta)| &\leq \eta (\|\check{u}_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|\check{u}_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_*}) (\|\check{v}_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|\check{v}_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_*}) \\ \text{et} \\ \|\check{u}_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1} + \|\check{u}_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_*} &\leq c \|\check{\mathbf{u}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta} \end{aligned}$$

en effet sur chaque Ω_ℓ on utilise l'inégalité $(a^{\frac{1}{2}} + b^{\frac{1}{2}})^2 \leq 2(a + b)$ pour déduire que

$$\begin{aligned} (\|u_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_*}^2 + |\lambda|^2 \|S_{1r}\|_{\mathcal{X}_*}^2)^{\frac{1}{2}} + (\|v_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1}^2 + |\lambda|^2 \|S_{1z}\|_{\mathcal{X}_1^1}^2)^{\frac{1}{2}} \\ \leq c [(\|u_{r\delta}\|_{\mathcal{X}_*} + \|v_{z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1})^2 + |\lambda|^2 (\|S_{1r\delta}\|_{\mathcal{X}_*} + \|S_{1z\delta}\|_{\mathcal{X}_1^1})^2]^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

On a alors le résultat de la première inégalité.

2) On prend $\check{\mathbf{u}}_\delta = \mathbf{u}_\delta + \lambda \mathbf{S}_1$ de $\check{\mathbb{V}}_\delta$, (puisque $\text{div}_r \mathbf{S}_{1v} = 0$). Alors on a d'après (2.5.27) et (2.5.43, $k = 1$), on a

$$\begin{aligned} \hat{a}_\delta(\check{\mathbf{u}}_\delta, \check{\mathbf{u}}_\delta) &\geq c \sum_{\ell=1}^L \{ (\|u_{r\ell}\|_{V_1^1(\Omega_\ell)}^2 + |\lambda|^2 \|S_{1r\ell}\|_{V_1^1(\Omega_\ell)}^2) \\ &\quad + (\|u_{z\ell}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2 + |\lambda|^2 \|S_{1rz\ell}\|_{H_1^1(\Omega_\ell)}^2) \} \end{aligned}$$

D'où

$$\hat{a}_\delta(\check{\mathbf{u}}_\delta, \check{\mathbf{u}}_\delta) \geq c' (\|\mathbf{u}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta}^2 + |\lambda|^2 \|\mathbf{S}\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta}^2).$$

■ On démontre maintenant la condition $\inf - \sup$ sur $\check{b}_\delta(\cdot, \cdot)$.

Proposition 3.4.2 On a la condition inf-sup suivante sur la forme $\check{b}_\delta(\cdot, \cdot)$. Il existe une constante β_δ telle que

$$\forall q_\delta \in M_\delta, \sup_{\check{\mathbf{u}}_\delta \in \check{\mathbf{Z}}_\delta} \frac{\check{b}_\delta(\check{\mathbf{u}}_\delta, q_\delta)}{\|\check{\mathbf{u}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}}} \geq \beta_\delta \|q_\delta\|_{L^2_1(\Omega)},$$

avec

$$\beta_\delta = \bar{N}_\delta^{-\frac{1}{2}} (\log \bar{N}_\delta)^{-1}.$$

Preuve Puisque l'espace \mathbf{Z}_δ est inclus dans l'espace $\check{\mathbf{Z}}_\delta$ on a

$$\sup_{\check{\mathbf{u}}_\delta \in \check{\mathbf{Z}}_\delta} \frac{\check{b}_\delta(\check{\mathbf{u}}_\delta, q_\delta)}{\|\check{\mathbf{u}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}}} \geq \sup_{\mathbf{u}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta} \frac{b_\delta(\mathbf{u}_\delta, q_\delta)}{\|\mathbf{u}_\delta\|_{\mathbf{Z}}},$$

et puisque

$$\sup_{\mathbf{u}_\delta \in \mathbf{Z}_\delta} \frac{b_\delta(\mathbf{u}_\delta, q_\delta)}{\|\mathbf{u}_\delta\|_{\mathbf{Z}}} \geq \beta_\delta \|q_\delta\|_{L^2_1(\Omega)},$$

ceci termine la démonstration. ■

Proposition 3.4.3 Pour tout \mathbf{f} appartenant à $L^2_1(\Omega)^2$, le problème (3.4.11) admet une solution unique $(\check{\mathbf{u}}_\delta, p_\delta)$ dans $\check{\mathbf{Z}}_\delta \times M_\delta$ vérifiant :

$$\|\check{\mathbf{u}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta} + \mu_\delta \|p_\delta\|_{L^2_1(\Omega)} \leq c \|\mathbf{f}\|_{L^2_1(\Omega)}.$$

3.4.2 Estimation de l'erreur

Ici on s'intéresse à l'erreur sur la vitesse car c'est elle qu'on va améliorer. Puisque la forme $\check{a}_\delta(\cdot, \cdot)$ est continue et coercive, on montre de la même façon que dans le chapitre précédent, que l'erreur entre la solution du problème continu (3.1.1) et celle du problème discret (3.4.11) vérifie la proposition suivante :

Proposition 3.4.4 Soit (\mathbf{u}, p) la solution du problème (3.1.1), $(\check{\mathbf{u}}_\delta, p)$ la solution du problème (3.4.11). Alors on a :

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u} - \check{\mathbf{u}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta} + \beta_\delta \|p - p_\delta\|_{L^2_1(\Omega)} &\leq c \left\{ \inf_{\check{\mathbf{v}}_\delta \in \check{\mathbf{V}}_\delta} [\|\mathbf{u} - \check{\mathbf{v}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta} + \sup_{\check{\mathbf{w}}_\delta \in \check{\mathbf{Z}}_\delta} \frac{(A - A_\delta)(\check{\mathbf{v}}_\delta, \check{\mathbf{w}}_\delta)}{\|\check{\mathbf{w}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta}}] \right. \\ &\quad \left. + \inf_{q_\delta \in M_\delta} [\|p - q_\delta\|_{L^2_1(\Omega)} + \sup_{\check{\mathbf{w}}_\delta \in \check{\mathbf{Z}}_\delta} \frac{(b - b_\delta)(\check{\mathbf{w}}_\delta, q_\delta)}{\|\check{\mathbf{w}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta}}] \right. \\ &\quad \left. + \sup_{\check{\mathbf{w}}_\delta \in \check{\mathbf{Z}}_\delta} \frac{\int_\Omega \mathbf{f} \check{\mathbf{w}}_\delta(r, z) r \, dr \, dz - (\mathcal{I}_\delta \mathbf{f}, \check{\mathbf{w}}_\delta)_\delta}{\|\check{\mathbf{w}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta}} + \sup_{\check{\mathbf{w}}_\delta \in \check{\mathbf{Z}}_\delta} \frac{\sum_{\gamma_m \in \mathcal{S}} \int_{\gamma_m} (-\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial n_m} + p \cdot \mathbf{n}(\tau)) (\check{\mathbf{w}}_\delta)(\tau) \, d\tau}{\|\check{\mathbf{w}}_\delta\|_{\check{\mathbf{Z}}_\delta}} \right\} \end{aligned} \quad (3.4.14)$$

où c est une constante positive indépendante de δ .

Preuve La preuve est une conséquence directe des propositions 3.2.2 et 3.2.4. ■

Théorème 3.4.3 Soit (\mathbf{u}, p) la solution du problème (3.1.1), $(\hat{\mathbf{u}}_\delta, p)$ la solution du problème (3.4.11). On suppose que pour $1 \leq \ell \leq L$, $\mathbf{u}_{|\Omega_\ell} \in H_+^{s_\ell}(\Omega_\ell)^2$, $p_{|\Omega_\ell} \in H_+^{s_\ell-1}(\Omega_\ell)$ pour tout $s_\ell \geq 2$ et que la donnée \mathbf{f} vérifie $\mathbf{f}_{|\Omega_\ell} \in H_+^{s_\ell}(\Omega_\ell)^2$ pour tout $s_\ell > 1$. On a alors :

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}_\delta\|_{\tilde{\mathcal{Z}}_\delta} + \beta_\delta \|p - p_\delta\|_{L_+^2(\Omega)} &\leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \sum_{\ell=1}^L [N_\ell^{-s_\ell} \log(N_\ell) (\|\mathbf{u}_{|\Omega_\ell}\|_{H_+^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2} \\ &\quad + \|p_{|\Omega_\ell}\|_{H_+^{s_\ell}(\Omega_\ell)}) \\ &\quad + N_\ell^{-\sigma_\ell} \|\mathbf{f}_{|\Omega_\ell}\|_{H_+^{\sigma_\ell}(\Omega_\ell)^2}]. \end{aligned}$$

Preuve D'après (3.4.14) on remarque que

$$\inf_{\tilde{\mathbf{v}}_\delta \in \tilde{\mathbf{V}}_\delta} \|\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{v}}_\delta\|_{\tilde{\mathcal{Z}}_\delta} \leq \inf_{\mathbf{v}_\delta \in \mathbf{V}_\delta} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_\delta\|_{\mathcal{Z}_\delta},$$

en effet il suffit de prendre $\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{v}}_\delta = \mathbf{u}_{reg} - \mathbf{v}_\delta$. Le terme $\sup_{\tilde{\mathbf{w}}_\delta \in \tilde{\mathcal{Z}}_\delta} \frac{(A-\mathcal{A}_\delta)(\tilde{\mathbf{w}}_\delta, \tilde{\mathbf{w}}_\delta)}{\|\tilde{\mathbf{w}}_\delta\|_{\tilde{\mathcal{Z}}_\delta}}$ est majoré

par $\sum_{\ell=1}^L N_\ell^{-s_\ell} \|\mathbf{u}_{|\Omega_\ell}\|_{H_+^{s_\ell+1}(\Omega_\ell)^2}$ si on choisit $\tilde{\mathbf{v}}_\delta = \mathbf{v}_\delta$ (voir 1) de la preuve du théorème

3.2.2. Le terme $\sup_{\tilde{\mathbf{w}}_\delta \in \tilde{\mathcal{Z}}_\delta} \frac{(b-b_\delta)(\tilde{\mathbf{w}}_\delta, q_\delta)}{\|\tilde{\mathbf{w}}_\delta\|_{\tilde{\mathcal{Z}}_\delta}}$ s'annule pour $q_\delta \in M_\delta$. Pour les autres termes ils se majorent comme dans le théorème (3.2.2). ■

Théorème 3.4.4 On suppose que $\mathbf{f} \in H^{s-1}(\Omega) \times H^{s-1}(\Omega)$ et $\mathbf{g} \in H^{s+1}(\Omega) \times H_+^{s+1}(\Omega)$ avec $s > \frac{5}{2}$, alors il existe une constante positive c telle que, la solution (\mathbf{u}, p) solution du problème (3.2.2) et $(\hat{\mathbf{u}}_\delta, p_\delta)$ solution du problème (3.4.11) vérifient :

1) *Cas homogène* : on a

$$\|\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}_\delta\|_{\mathcal{Z}} + \beta_\delta \|p - p_\delta\|_{L_+^2(\Omega)} \leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, E_\delta^{1S}\} \|\mathbf{f}\|_{H_+^{s-1}(\Omega)^2} \quad (3.4.15)$$

2) *Cas non homogène* : on a

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}_\delta\|_{\mathcal{Z}} + \beta_\delta \|p - p_\delta\|_{L_+^2(\Omega)} &\leq c(1 + \lambda_\delta)^{\frac{3}{2}} \sup\{N_\delta^{1-s}, \beta_\delta^{-1} E_\delta^{1S}\} \\ &\quad (\|\mathbf{f}\|_{H_+^{s-1}(\Omega)^2} + \|\mathbf{g}\|_{H_+^{s+1}(\Omega)}) \end{aligned} \quad (3.4.16)$$

où

$$N_\delta = \min\{N_\ell, 1 \leq \ell \leq L\} \text{ et } E_\delta^{1S} = \max\{E_\ell^{1S}, 1 \leq \ell \leq L\} \quad (3.4.17)$$

$$E_\ell^{1S} = \begin{cases} 0 & \text{si } \Omega_\ell \text{ ne contient pas des } e_i, \\ N_{e_i}^{-4\eta(\frac{\pi}{2})} (\log N_{e_i})^{\frac{1}{2}} & \text{si } \Omega_\ell \text{ contient } e_i \text{ avec } \omega_{e_i} = \frac{\pi}{2}, \\ N_{e_i}^{-4\eta(\frac{3\pi}{2})} (\log N_{e_i})^{\frac{1}{2}} & \text{si } \bar{\Omega}_\ell \text{ contient } e_i \text{ avec } \omega_{e_i} = \frac{3\pi}{2}. \end{cases} \quad (3.4.18)$$

et λ_δ est définie dans (2.3.25).

Preuve La preuve est identique à la preuve du théorème 3.2.3. ■

3.5 Ecriture matricielle du problème de Stokes

3.5.1 Dans un cylindre de référence

Cas axisymétrique

On rappelle que $r_i^{(2)} = \frac{1+\xi_i^{(2)}}{2}$ où $1 \leq i \leq N+1$ et $\xi_j, 0 \leq j \leq N$. On a

$$\begin{aligned} u_{rN}(r, z) &= \sum_{i=2}^{N+1} \sum_{j=0}^N u_{r,ij} l_i^{(2)}(r) l_j(z), \\ u_{zN}(r, z) &= \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=0}^N u_{z,ij} l_i^{(2)}(r) l_j(z) \\ p_N &= \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{N-1} p_{ij} m_i^{(1)}(r) m_j(z). \end{aligned}$$

On pose \mathcal{I} , respectivement \mathcal{I}^* , respectivement \mathcal{B} l'ensemble d'indice (i, j) , $1 \leq i \leq N$ et $1 \leq j \leq N-1$, respectivement $2 \leq i \leq N$ et $1 \leq j \leq N-1$, respectivement $(i = N+1$ et $0 \leq j \leq N, 1 \leq i \leq N$ et $j = 0$ ou $j = N)$. On remarque que $u_{r,ij} = g_r(r_i^{(2)}, \xi_j)$ et $u_{z,ij} = g_z(r_i^{(2)}, \xi_j)$ sur B . On pose U le vecteur $u_{r,ij}, (i, j) \in \mathcal{I}^*$ et $u_{z,ij}, (i, j) \in \mathcal{I}$.

1) Pour $m = 1, p_N = \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{N-1} p_{ij} m_i^{(1)}(r) m_j(z)$, où $m_i^{(1)}$ respectivement m_j associé

avec $r_i^{(2)} 2 \leq i \leq N$ et $\xi_j, 1 \leq j \leq N-1$. On note P le vecteur constitué par $p_{ij} 1 \leq i \leq N$ et $0 \leq j \leq N+1$.

Le système linéaire s'écrit

$$\begin{pmatrix} A & B \\ B^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix}$$

Les expressions de A, B, F et

$$A = \begin{pmatrix} A_r & 0 \\ 0 & A_z \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} B_r \\ B_z \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} F_r \\ F_z \end{pmatrix} \text{ et } U = \begin{pmatrix} U_r \\ U_z \end{pmatrix}$$

La matrice A

La matrice A_r est constituée d'éléments $a_{1N}(l_i^2 l_j, l_i^2 l_{j'})$ avec $(i, j) \in \mathcal{I}^*$ et $(i', j') \in \mathcal{I}^*$ et la matrice A_z est constituée d'éléments $a_N(l_i^2 l_j, l_i^2 l_{j'})$ avec $(i, j) \in \mathcal{I}$ et $(i', j') \in \mathcal{I}$.

La matrice B

La matrice B_r est constituée d'éléments $b_N(l_i^2 l_{j'}, 0, l_i^2 l_j)$ avec $(i', j') \in \mathcal{I}$ et $(i, j) \in \mathcal{I} \cup B$ et la matrice B_z est constituée d'éléments de type $b_N(0, l_i^2 l_{j'}, l_i^2 l_j)$ avec $(i', j') \in \mathcal{I}^*$ et $(i, j) \in \mathcal{I} \cup B$.

La matrice U

La matrice $U_r = u_{r,ij}$ avec $(i, j) \in \mathcal{I}^*$ et la matrice $U_z = u_{z,ij}$ avec $(i, j) \in \mathcal{I}$ et $p = p_{ij}$ avec $(i, j) \in \mathcal{I}^*$.

La matrice F se décompose en F_r et F_z avec

$$F_{r,i'j'} = 1/4 f_r(r_{i'}^{(2)}, \xi_{j'}) \omega_{i'}^{(2)} \rho_{j'} - \sum_{(i,j) \in \mathcal{B}} g_r(r_i^{(2)}, \xi_j) a_{1N}(l_i^{(2)} l_j, l_{i'}^{(2)} l_{j'}), (i', j') \in I^*$$

$$F_{z,i'j'} = 1/4 f_z(r_{i'}^{(2)}, \xi_{j'}) \omega_{i'}^{(2)} \rho_{j'} - \sum_{(i,j) \in \mathcal{B}} g_z(r_i^{(2)}, \xi_j) a_N(l_i^{(2)} l_j, l_{i'}^{(2)} l_{j'}), (i', j') \in I.$$

Cas général

Cas $|k| \geq 2$ Le système s'écrit :

$$\begin{pmatrix} A_k & B_k \\ B_k^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_k \\ P_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_k \\ 0 \end{pmatrix}$$

La matrice U_k

Le vecteur U_k est constitué des $u_{r,ij} = u_{rN}^k(r_i^{(2)}, \xi_j)$, $u_{\theta,ij} = u_{\theta N}^k(r_i^{(2)}, \xi_j)$ et $u_{z,ij} = u_{zN}^k(r_i^{(2)}, \xi_j)$, $(i, j) \in I^*$. P_k est le même que P pour $k = 0$.

La matrice A_k

La matrice A_k se décompose en A_{rk} , $A_{\theta k}$, $A_{r\theta k}$ et A_{zk} avec :

$$A_k = \begin{pmatrix} A_{rk} & A_{r\theta k} & 0 \\ {}^t A_{r\theta k} & A_{\theta k} & 0 \\ 0 & 0 & A_{zk} \end{pmatrix}.$$

La matrice A_{rk} est constituée d'éléments $a_N(l_i^{(2)} l_j, l_{i'}^{(2)} l_{j'}) + (1+k^2)(r^{-1} l_i^{(2)} l_j, r^{-1} l_{i'}^{(2)} l_{j'})_N$ avec $(i, j), (i', j') \in I^*$.

La matrice $A_{r\theta k}$ est constituée d'éléments $2ik(r^{-1} l_i^{(2)} l_j, r^{-1} l_{i'}^{(2)} l_{j'})_N$ avec $(i, j), (i', j') \in I^*$.

La matrice $A_{\theta k}$ est constituée d'éléments $a_N(l_i^{(2)} l_j, l_{i'}^{(2)} l_{j'}) + (1+k^2)(r^{-1} l_i^{(2)} l_j, r^{-1} l_{i'}^{(2)} l_{j'})_N$ avec $(i, j), (i', j') \in I^*$.

La matrice A_{zk} est constituée d'éléments $a_N(l_i^{(2)} l_j, l_{i'}^{(2)} l_{j'}) + k^2(r^{-1} l_i^{(2)} l_j, r^{-1} l_{i'}^{(2)} l_{j'})_N$ avec $(i, j), (i', j') \in I^*$.

La matrice F_k

F_k se décompose en F_{rk} resp $F_{\theta k}$ resp F_{zk} avec

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} f_r(r_{i'}^{(2)}, \xi_{j'}) \omega_{i'}^{(2)} \rho_{j'} - \mathcal{A}_{k,N}(\bar{g}^k, \boldsymbol{\ell}_{r,i'j'}), \quad (i', j') \in \mathcal{I}^*. \\ \frac{1}{4} f_r(r_{i'}^{(2)}, \xi_{j'}) \omega_{i'}^{(2)} \rho_{j'} - \mathcal{A}_{k,N}(\bar{g}^k, \boldsymbol{\ell}_{\theta,i'j'}), \quad (i', j') \in \mathcal{I}^*. \\ \frac{1}{4} f_r(r_{i'}^{(2)}, \xi_{j'}) \omega_{i'}^{(2)} \rho_{j'} - \mathcal{A}_{k,N}(\bar{g}^k, \boldsymbol{\ell}_{z,i'j'}), \quad (i', j') \in \mathcal{I}^*. \end{aligned}$$

où $\bar{g}^k = g^k(r_i^{(2)}, \xi_j)$, $(i, j) \in \mathcal{B}$ et 0 si $(i, j) \in \mathcal{I}$

$$\boldsymbol{\ell}_{r,i'j'} = \left(l_{i'}^{(2)} l_{j'}, 0, 0 \right), \boldsymbol{\ell}_{\theta,i'j'} = \left(0, l_{i'}^{(2)} l_{j'}, 0 \right) \text{ et } \boldsymbol{\ell}_{z,i'j'} = \left(0, 0, l_{i'}^{(2)} l_{j'} \right).$$

La matrice B_k

La matrice B_k se décompose en B_{rk} , $B_{\theta k}$ et B_{zk} avec

$$B = \begin{pmatrix} B_{rk} \\ B_{\theta k} \\ B_{zk} \end{pmatrix}.$$

La matrice B_{rk} est constituée d'éléments $b_N(l_i^{(2)}l_j, 0, l_i^{(2)}l_j)$ avec (i, j) et $(i', j') \in I^*$.
 La matrice $B_{\theta k}$ est constituée d'éléments $ik(l_i^{(2)}l_j, r^{-1}l_i^{(2)}l_j)_N$ avec (i, j) et $(i', j') \in I^*$.
 La matrice B_{zk} est constituée d'éléments $b_N(0, l_i^{(2)}l_j, l_i^{(2)}l_j)$ avec (i, j) et $(i', j') \in I^*$.

Cas $k = \pm 1$ Le vecteur \bar{U}_\pm est constitué par $u_{r,ij}, u_{\theta,ij}$ ($(i, j) \in I$) et $u_{z,ij}$ ($(i, j) \in I^*$)
 La condition $v_{r,N} + ikv_{\theta,N} = 0$ sur Γ_0 se traduit par :

$$u_{r,1j} + ik u_{\theta,1j} = 0, 1 \leq j \leq N - 1.$$

Ici l'idée est d'introduire une matrice qui injecte cette hypothèse. On l'appellera R_\pm avec

$$\bar{U}_\pm = R_\pm U_\pm.$$

Le système devient

$$\begin{cases} \bar{R}_\pm^T A_\pm Q_\pm U_\pm + \bar{R}_\pm^T B_\pm P_\pm = R_\pm^T F_\pm \\ B_\pm^T R_\pm \bar{U}_\pm = 0 \end{cases}$$

Matriciellement le problème s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \bar{R}_{\pm 1}^T A_{\pm 1} R_{\pm 1} & \bar{R}_{\pm 1}^T B_{\pm 1} \\ B_{\pm 1}^T R_{\pm 1} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{\pm 1} \\ P_{\pm 1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{\pm 1} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

3.5.2 Dans un domaine décomposé

Soit $\Omega = \bigcup_{\ell=1}^L \Omega_\ell$ La matrice A_k est présentée sous la forme donnée dans (2.6.2) et B_k est de la forme

$$B_k = \begin{pmatrix} E_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & E_L \\ F_1 & F_2 & \cdots & F_L \end{pmatrix}$$

où $E_\ell, 1 \leq \ell \leq L$, sont les matrices qui agissent sur les nœuds internes à Ω_ℓ et les matrices $F_\ell, 1 \leq \ell \leq L$ agissent sur la squelette S . On resoud alors le système

$$\begin{aligned} A_k U_k + B_k P_k &= F_k \\ B_k^T P_k &= 0. \end{aligned} \tag{3.5.1}$$

On peut traiter chaque sous domaine par un algorithme itératif.

3.5.3 La matrice des joints

On note Q la matrice qui traduit la condition de transmission aux interfaces des sous-domaines. On ne résout pas le système (3.5.1) parce qu'il comporte de faux degrés de liberté qui sont les valeurs de la solution aux nœuds dits esclaves. Ces nœuds sont éliminés par l'action de la matrice Q^T . Le système global qu'on résout est alors :

$$\begin{aligned} (Q^T A_k Q) \tilde{U}_k + Q^T B_k P_k &= Q^T F_k \\ B_k^T Q P_k &= 0. \end{aligned} \quad (3.5.2)$$

3.5.4 L'algorithme d'Uzawa

On pose $Q^T A_k Q = \tilde{A}_k$, $Q^T B_k = \tilde{B}_k$ et $Q^T F_k = \tilde{F}_k$.

On calcule d'abord P à l'aide de l'équation $\tilde{B}_k^T \tilde{A}_k^{-1} \tilde{B}_k P_k = \tilde{B}_k^T \tilde{A}_k^{-1} \tilde{F}_k$ ensuite on calcule U_k qui est égale à $\tilde{A}_k^{-1} \tilde{F}_k - \tilde{A}_k^{-1} \tilde{B}_k P_k$.

3.6 Résultats numériques

Dans cette section, nous allons présenter comme dans le cas de l'équation de Laplace, des tests numériques. Ces tests confirment bien les résultats théoriques dans les deux cas axisymétrique et général. On se limitera aux deux types de domaines Ω^a et Ω^b .

3.6.1 Cas axisymétrique

Dans ce paragraphe, on commence par faire des tests sur un domaine de référence Ω sans décomposition en sous domaines.

Domaine $\Omega = [0, 1] \times [-1, 1]$.

1) Pour un premier test on utilise les données suivantes :

$$f_r = -45/4r^{3/2}z^2 - 2r^{7/2} - 1, f_z = 3/8r^{1/2}z(25z^2 + 24r^2),$$

$$g_r = r^{7/2}z^2, g_z = -3/2r^{5/2}z^3,$$

$$N = 20.$$

Dans les figures 3.2, resp 3.3 et 3.4 on représente les tracés de u_r , resp u_z et p .

2) Pour un deuxième test, on considère les données suivantes :

$$f_r = -6r, f_z = 16z, g_r = 0, g_z = 0, N = 24.$$

Dans les figures 3.5, 3.6 et 3.7 on présente les tracés de u_r , u_z et p .

Commentaire : dans ce cas la solution exacte on l'a connaît et on a bien $(u_r, u_z) = (0, 0)$.

Domaine Ω^a

Soit le domaine Ω^a décomposé en trois sous domaines, voir la figure 2.4. On considère les fonctions $f_r = 1, f_z = 0, g_r = r^{7/2}z^2, g_z = -3/2r^{5/2}z^3$, avec $N = 20$ sur Ω, Ω_1^a et Ω_2^a et $N = 22$ sur Ω_3^a . Dans les figures 3.8, 3.9 et 3.10, on représente les tracés de u_r, u_z et p .

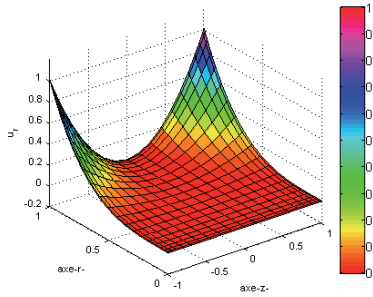


FIGURE 3.2 – Tracé de la fonction u_1

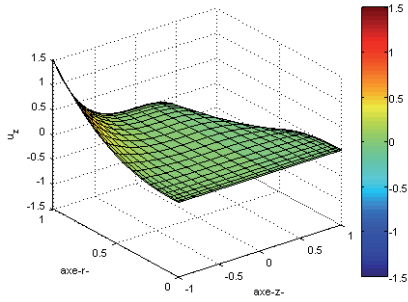


FIGURE 3.3 – Tracé de la fonction u_2

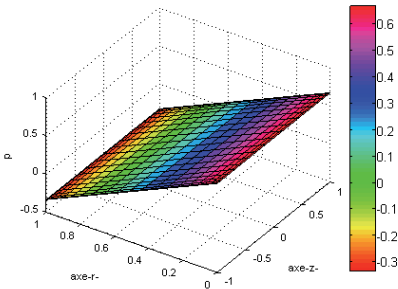


FIGURE 3.4 – Tracé de la fonction p

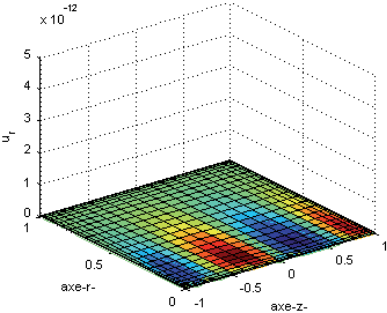


FIGURE 3.5 – Tracé de la fonction u_r

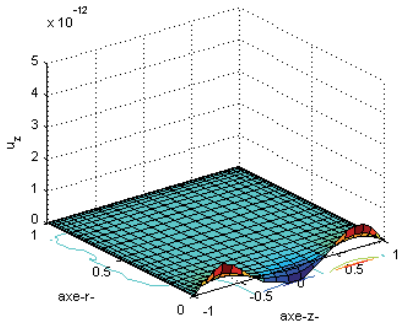


FIGURE 3.6 – Tracé de la fonction u_z

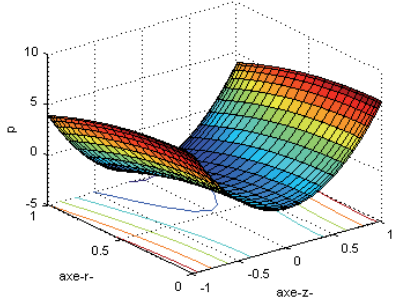


FIGURE 3.7 – Tracé de la fonction p

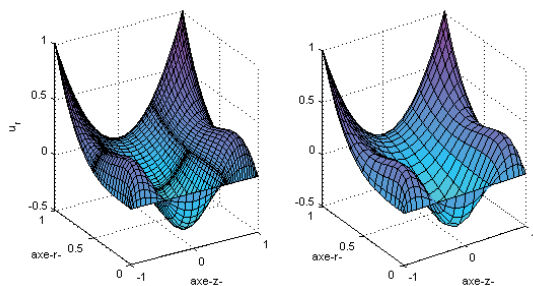


FIGURE 3.8 – Tracé de la fonction u_r

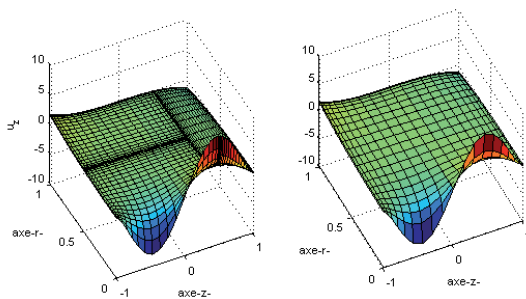


FIGURE 3.9 – Tracé de la fonction u_z

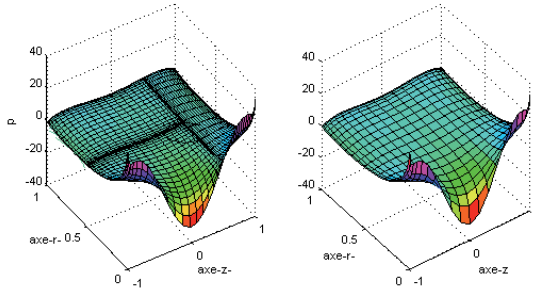


FIGURE 3.10 – Tracé de la fonction p

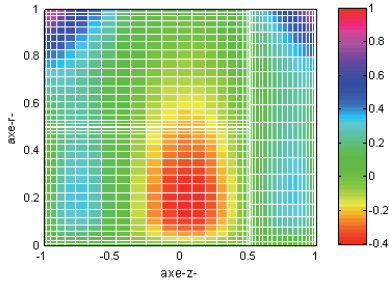


FIGURE 3.11 – Isovaleurs de u_r avec $N = 20$ sur chaque sous domaine

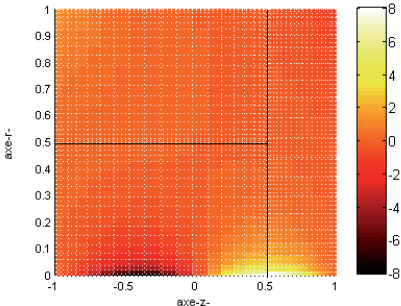


FIGURE 3.12 – Isovaleurs de u_z avec $N = 20$ sur chaque sous domaine

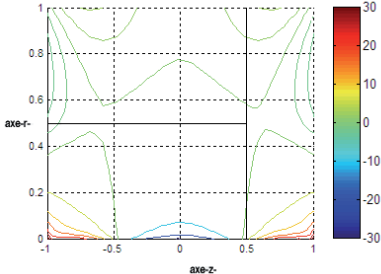


FIGURE 3.13 – Isovaleurs de p avec $N = 20$ sur Ω_1^r, Ω_3^c et $N = 22$ sur Ω_2^c

Dans les figures 3.11, 3.12 et 3.13, on représente les isovaleurs de u_r , u_z et p .

On remarque l'excellent raccord entre les trois parties du domaine Ω^a et la bonne répartition des couleurs dans les figures 3.11 et 3.12.

Remarque 3.6.1 Dans l'exemple précédent la solution exacte n'est pas connue.

Mesures de l'erreur sur le domaine $\tilde{\Omega}^a$

On considère les fonctions singulières suivantes :

$$u_r = r^{7/2} z^2, u_z = -3/2 r^{5/2} z^3, p = r^{1/2}.$$

On mesure alors les erreurs $\|u - u_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega}^a)}$, $\|u - u_\delta\|_{H^1(\tilde{\Omega}^a)}$ et $\|p - p_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega}^a)}$, sur $\tilde{\Omega}^a$

N	Norme L^2 de p	Norme L^2 de u	Norme $V_1^1 \times H_1^1$ de u
8	9.8305×10^{-5}	7.4125×10^{-6}	7.5842×10^{-5}
16	3.7346×10^{-6}	4.5674×10^{-8}	1.1940×10^{-6}
20	1.2261×10^{-6}	8.4821×10^{-9}	3.0756×10^{-7}
24	4.8009×10^{-7}	2.1992×10^{-9}	1.0347×10^{-7}
30	1.6068×10^{-7}	4.4262×10^{-10}	2.6800×10^{-8}

On représente alors les courbes $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega}^a)})$, $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{H^1(\tilde{\Omega}^a)})$ et $(\log_{10}(N), \log_{10} \|p - p_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega}^a)})$, sur la figure 3.14.

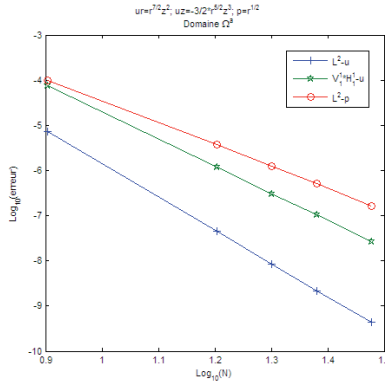


FIGURE 3.14 – Les courbes d'erreur sur u et p

Commentaire : sur la figure 3.14, on remarque qu'on obtient des droites ce qui confirme les estimations dans le théorème 3.2.2.

Domaine Ω^b

Soit le domaine Ω^b illustré, dans la figure 2.8.

On considère les fonctions, $f_r = -6r$, $f_z = 16z$, $g_r = r^3$, $g_z = -4r^2z$.

On représente dans les figures 3.15, resp 3.16 et 3.17 les tracés de u_r resp u_z et p avec $N = 30$ sur chaque sous domaine.

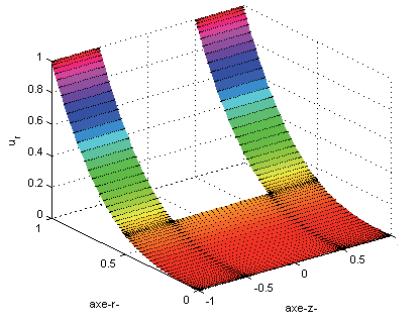


FIGURE 3.15 – Tracé de la fonction u_r , avec $N = 30$ sur chaque sous domaine

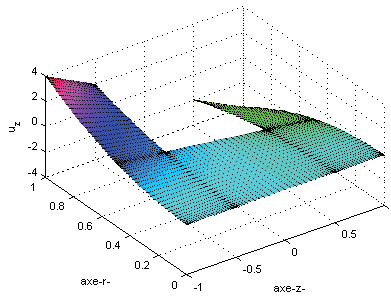


FIGURE 3.16 – Tracé de la fonction u_z

On représente ensuite dans les figures 3.18, resp 3.19 et 3.20 les isovaleurs de u_r (avec $N = 30$ sur $\Omega_2^b, \Omega_3^b, \Omega_4^b$ et $N = 28$ sur Ω_1^b et Ω_5^b), resp u_z avec $N = 30$ sur chaque sous domaine et p avec $N = 30$ sur $\Omega_2^b, \Omega_3^b, \Omega_4^b$ et $N = 28$ sur Ω_1^b et Ω_5^b .

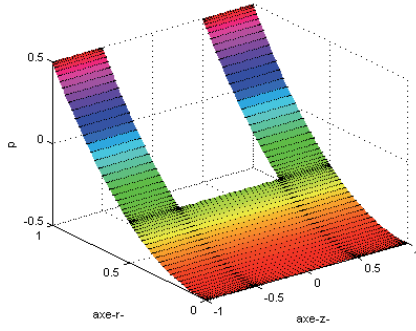


FIGURE 3.17 – Tracé de la fonction p

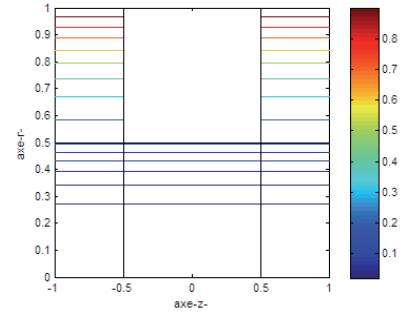


FIGURE 3.18 – Isovaleurs de u_r

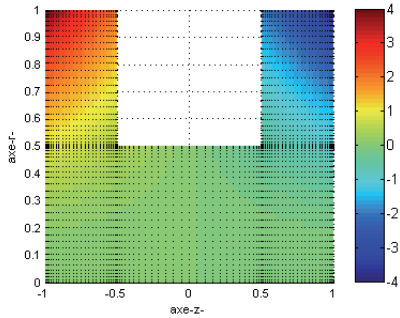


FIGURE 3.19 – Isovaleurs de u_z

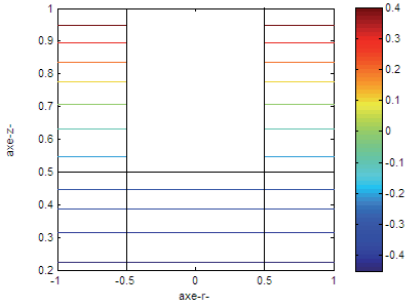


FIGURE 3.20 – Isovaleurs de p

Commentaire : on remarque dans toutes ces figures l'excellent raccord entre les cinq parties du domaine Ω^b .

Mesures de l'erreur sur le domaine $\check{\Omega}^b$

On considère maintenant les fonctions suivantes dans le domaine $\check{\Omega}^b$:

$$u_r = r^7/2z^2, u_z = -3/2r^5/2z^3, p = -r.$$

On mesure les erreurs $\|u - u_\delta\|_{L^2(\check{\Omega}^b)}$, $\|u - u_\delta\|_{H^1(\check{\Omega}^b)}$ et $\|p - p_\delta\|_{L^2(\check{\Omega}^b)}$, sur $\check{\Omega}^b$

N	Norme L^2 de p	Norme L^2 de u	Norme $V^1 \times H^1$ de u
8	7.0340×10^{-5}	4.4125×10^{-6}	4.1011×10^{-5}
16	3.9970×10^{-6}	4.3193×10^{-8}	1.3043×10^{-6}
20	1.5144×10^{-6}	9.7311×10^{-9}	4.0839×10^{-7}
24	7.0100×10^{-7}	2.8579×10^{-9}	1.5671×10^{-7}
30	2.7460×10^{-7}	6.1090×10^{-10}	4.7943×10^{-8}

Dans la figure 3.21, on présente les courbes $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{L^2(\check{\Omega}^b)})$, $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{H^1(\check{\Omega}^b)})$ et $(\log_{10}(N), \log_{10} \|p - p_\delta\|_{L^2(\check{\Omega}^b)})$.

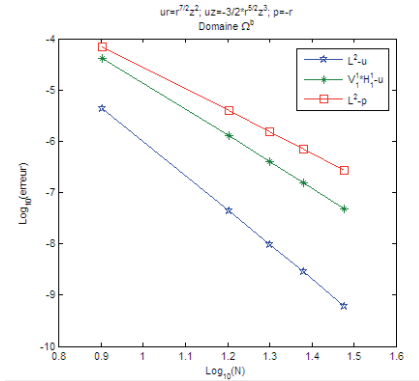


FIGURE 3.21 – Mesures d'erreur sur u et p

Commentaire : on remarque que la courbe de la pression est au-dessus de la courbe de la vitesse et ceci est dû au terme β_δ dans les estimations dans le théorème 3.2.2

3.6.2 Cas général

Domaine $\check{\Omega}^a$

On considère pour un premier test les fonctions :

$$(f_r, f_\theta, f_z) = (r^{3/2}z\cos\theta, r^{5/2}z\sin\theta, rz^2\cos^2\theta) \text{ et } (g_r, g_\theta, g_z) = (0, 0, 0).$$

On représente alors les tracés de u_r^0 resp u_θ^0, u_z^0 (avec $N = 30, K = 8$ sur chaque sous domaine sur les figures 3.22 resp 3.23, 3.24, 3.25, et les tracés de u_r^1 resp u_θ^1, u_z^1 (avec $N = 30, K = 8$ sur chaque sous domaine), sur les figures 3.26 resp 3.27 et 3.28.

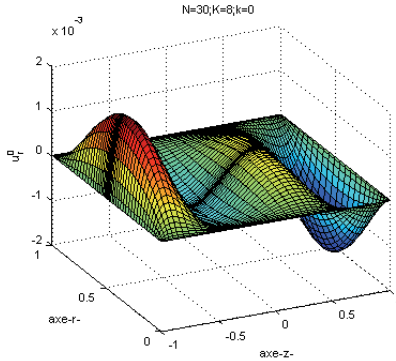


FIGURE 3.22 – Tracé de la fonction u_r^0

On représente ensuite les isovalues de u_r^0 (avec $N = 24$ sur Ω_1^a, Ω_2^a , et $N = 28$ sur Ω_3^a et $K = 8$) resp u_z^0, p^0 et p^1 (avec $N = 30$ et $K = 8$), sur les figures 3.29 resp , 3.30, 3.31 et 3.32.

Commentaire : on remarque, comme dans le cas axisymétrique, l'excellente liaison entre les trois parties du domaine Ω^a .

Remarque 3.6.2 Dans cet exemple, la solution exacte n'est pas connue.

Mesures de l'erreur sur le domaine $\check{\Omega}^a$

On considère les fonctions suivantes :

$u_x = x^2y^2, u_y = 0, u_z = -2xzy^2$ et $p = (x^2 + y^2)^{5/4}(z^2 - 1)^{3/2}$. On donne alors les courbes $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{L^2(\check{\Omega}^a)})$, $(\log_{10}(N), \log_{10} \|u - u_\delta\|_{H^1(\check{\Omega}^a)})$ et

$(\log_{10}(N), \log_{10} \|p - p_\delta\|_{L^2(\check{\Omega}^a)})$, sur le domaine $\check{\Omega}^a$, sur la figure 3.33.

On a la même remarque sur la droite de la pression qui est au dessus de la droite de la vitesse. Le théorème 3.3.1 confirme ce résultat.

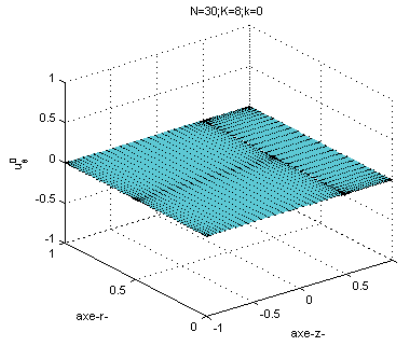


FIGURE 3.23 – Tracé de la fonction u_θ^0

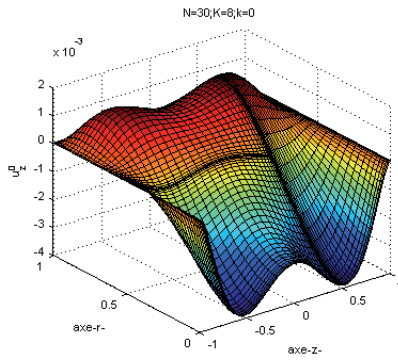


FIGURE 3.24 – Tracé de la fonction u_z^0

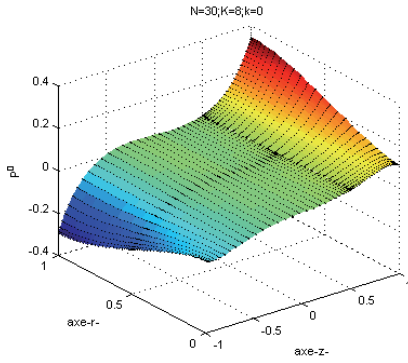


FIGURE 3.25 – Tracé de la fonction p^0

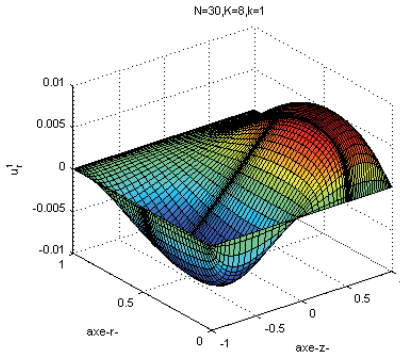


FIGURE 3.26 – Tracé de la fonction u_r^1

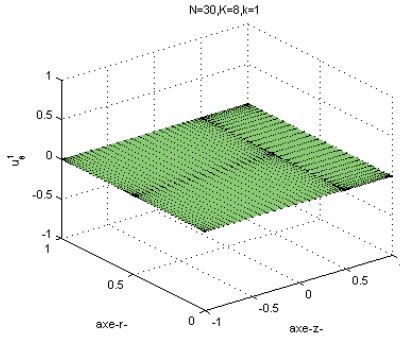


FIGURE 3.27 – Tracé de la fonction u_0^1

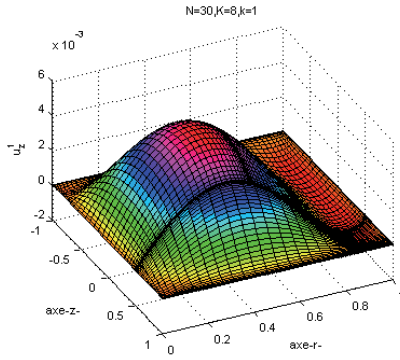


FIGURE 3.28 – Tracé de la fonction u_2^1

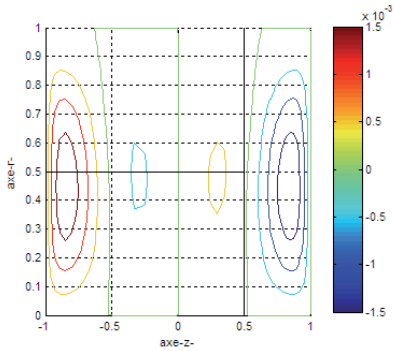


FIGURE 3.29 – Isovaleurs de u_r^0 (avec $N = 24$ sur Ω_1^a, Ω_2^a , et $N = 28$ sur Ω_3^a et $K = 8$)

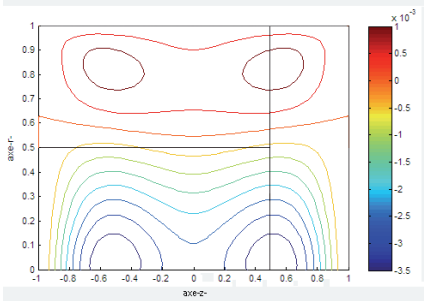


FIGURE 3.30 – Isovaleurs de u_z^0 avec $N = 30, K = 8$

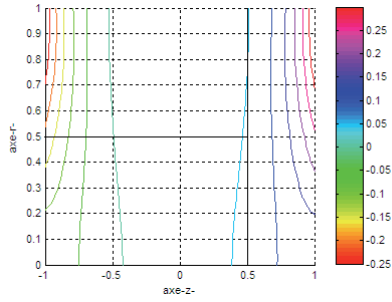


FIGURE 3.31 – Isovaleurs de p^0 avec $N = 30$, $K = 8$

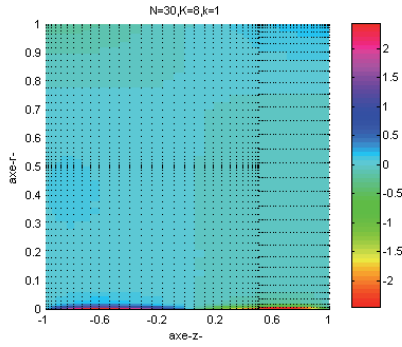


FIGURE 3.32 – Isovaleurs de p^1 avec $N = 30$, $K = 8$

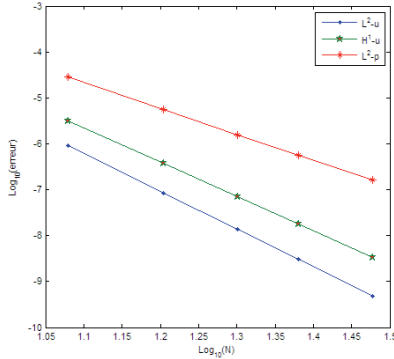


FIGURE 3.33 – Mesures de l'erreur sur \mathbf{u} et p

Domaine $\tilde{\Omega}^b$

On considère les fonctions :

$$(f_x, f_y, f_z) = (z^2 + x^2 + y^2, -2xy, -2zx) \text{ et } (g_x, g_y, g_z) = (0, -xy(1 - z^2), 0).$$

On représente les tracés de $u_r^{(1)}$ resp $\text{Imag}(u_\theta^{(1)})$, $p^{(1)}$ et $u_r^{(3)}$ ($N = 34$, $K = 5$ sur chaque sous domaine) sur les figures , 3.34 resp 3.35, 3.36 et 3.37.

Dans les figures 3.38 resp 3.39 on présente les isovaleurs de u_θ^0 resp de p^2 et u_θ^2 avec $N = 20$, $K = 5$.

Mesures de l'erreur sur le domaine $\tilde{\Omega}^b$

On considère les fonctions suivantes :

$$u_x = (x^2 + y^2)^{7/3}; u_y = 0; u_z = -\frac{14}{3}(x^2 + y^2)^{4/3}xz \text{ et } p = xz. \text{ Dans la figure 3.40, on}$$

représente les courbes $(\log_{10}(N), \log_{10} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega}^b)})$,

$(\log_{10}(N), \log_{10} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\delta\|_{H^1(\tilde{\Omega}^b)})$ et $(\log_{10}(N), \log_{10} \|p - p_\delta\|_{L^2(\tilde{\Omega}^b)})$, sur le domaine $\tilde{\Omega}^b$

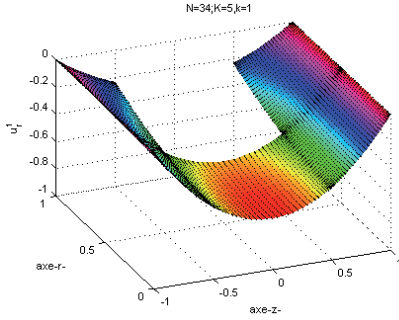


FIGURE 3.34 – Tracé de la fonction u_r^1

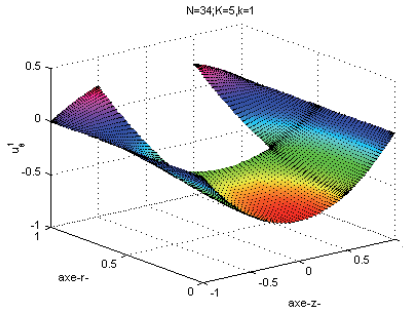


FIGURE 3.35 – Tracé de la partie Imaginaire de u_θ^1

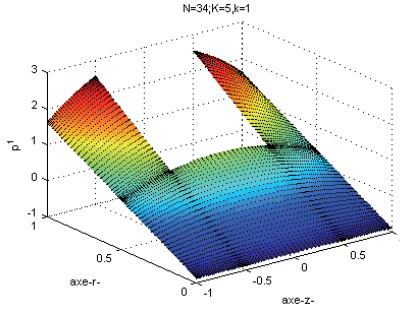


FIGURE 3.36 – Tracé de la fonction p^1

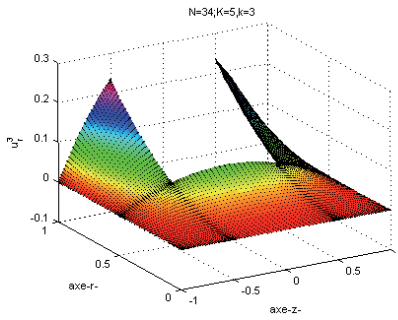


FIGURE 3.37 – Tracé de la fonction u_r^3

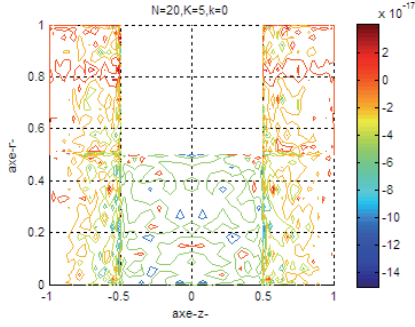


FIGURE 3.38 – Isovaleurs de u_r^0

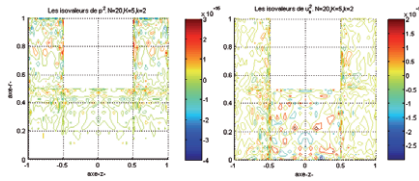


FIGURE 3.39 – Isovaleurs de p^2 et u_0^2

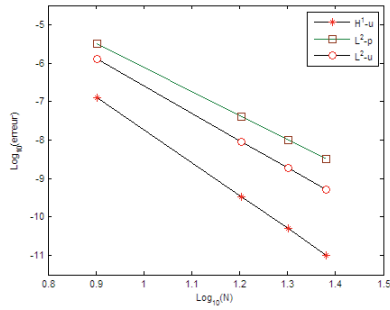


FIGURE 3.40 – Courbes d'erreur de u et p

Conclusion

Dans cette thèse on s'est intéressé aux problèmes tridimensionnels de Laplace et de Stokes dans des domaines axisymétriques. Ces problèmes sont réduits, sans approximation et par des développements en coefficients de Fourier en une famille dénombrable de problèmes bidimensionnels. Les domaines qu'on a considérés présentent des singularités géométriques et sont décomposés de façons non nécessairement conformes. Les non conformités sur les interfaces entre les sous-domaines sont traitées par la méthode des joints. La méthode de base de discrétisation est la méthode spectrale. On a montré alors des résultats d'approximation optimaux, proches de ceux trouvés lors de l'approximation conformes avec des contraintes de continuités sur les interfaces. Ceci prouve encore une fois l'efficacité de la méthode de joints. On a fait en outre plusieurs tests numériques qui ont confirmé nos prédictions théoriques. Quelques remarques sont à signaler concernant ces tests. On note que les erreurs sur la vitesse et sur la pression perdent une partie de l'information théorique sur les interfaces, ceci nous a obligés à augmenter le nombre de nœuds pour avoir une bonne précision. On note aussi qu'après un certain seuil, l'ordre de troncature dans les séries de Fourier n'a plus d'influence sur la convergence de la vitesse et la pression. Enfin, les techniques utilisées dans ce travail pourraient être généralisées à des géométries axisymétriques plus complexes parfaitement réalistes dans les applications tels que les cônes ou les sphères (qui présentent des singularités de coins) ou encore à des fluides ayant des lois de comportements plus complexes tels que ceux régis par les équations de Navier-Stokes.



Annexe 1 : Calcul des Polynômes

Sommaire

4.1	Polynômes orthogonaux dans $L^2(\Lambda)$	182
4.2	Formules de Gauss-Lobatto associées à L'_N	183
4.3	Polynômes orthogonaux dans $L^2_1(\Lambda)$	183
4.4	Formules de Gauss-Lobatto associées à M'_N	184
4.5	Polynômes de Lagrange	184
4.5.1	Explicitation de $l_j^{(2)}$	184
4.5.2	Explicitation de m_j	186
4.5.3	Ecriture des intégrales dans un rectangle $[a, b] \times [c, d]$	188
4.6	Mise en œuvre du Laplacien et du problème de Stokes	189
4.6.1	Calcul de la matrice A	189
4.6.2	Ecriture de a_N, a_N^k	190
4.6.3	Calcul de la matrice B	191
4.6.4	Calcul de p	193

4.1 Polynômes orthogonaux dans $L^2(\Lambda)$

On appelle $(L_n)_n$ la famille des polynômes Legendre orthogonaux dans $L^2([-1, 1])$ vérifiant pour tout $n \in \mathbb{N}$

$$((1 - \zeta^2)L'_n)' + n(n+1)L_n = 0 \quad (4.1.1)$$

et

$$\forall n \geq 0, \int_{-1}^1 L_n(\zeta) L_m(\zeta) d\zeta = \frac{\delta_{nm}}{n + \frac{1}{2}},$$

en plus on a la relation de recurrence :

$$\begin{cases} L_0(\zeta) = 1 \text{ et } L_1(\zeta) = \zeta, \\ (n+1)L_{n+1}(\zeta) = (2n+1)\zeta L_n(\zeta) - nL_{n-1}(\zeta), \quad n \geq 1. \end{cases}$$

4.2 Formules de Gauss-Lobatto associées à L'_N

On appelle formule de quadrature de Gauss-Lobatto, la formule de quadrature sur $[-1, 1]$ exacte pour les polynômes de degré $\leq 2N - 1$ qui s'écrit :

$$\forall \Phi \in P_{2N-1}(\Lambda), \int_{-1}^1 \Phi(\xi) d\xi = \sum_{j=0}^N \Phi(\xi_j) \rho_j$$

où les points d'intégration sont

$$\begin{aligned} \xi_0 = -1 \quad \xi_N = 1 \quad \xi_j, 1 \leq j \leq N-1 \text{ sont les zéros du polynôme } L'_N \\ \rho_0 = \rho_N = \frac{2}{N(N+1)} \quad \rho_j = \frac{2}{N(N+1)L_N^2(\xi_j)} \quad 1 \leq j \leq N-1 \text{ sont les poids associés} \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

4.3 Polynômes orthogonaux dans $L^2_1(\Lambda)$

On définit une famille de polynômes $(M_n)_n$ par :

$$M_n(\zeta) = \frac{L_n(\zeta) + L_{n+1}(\zeta)}{1 + \zeta}, \quad n \geq 0.$$

Ces polynômes vérifient l'équation différentielle :

$$((1 + \zeta)^2(1 - \zeta)M'_n)' + n(n+2)(1 + \zeta)M_n = 0 \quad (4.3.1)$$

et sont orthogonaux dans $L^2_1([-1, 1])$ et vérifient :

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 M_n(\zeta) M_m(\zeta) (1 + \zeta) d\zeta &= 0 \text{ et } M_n(1) = 1. \\ \int_{-1}^1 M_n^2(\zeta) (1 + \zeta) d\zeta &= \frac{2}{n+1}, \end{aligned}$$

et la formule de recurrence :

$$\begin{cases} M_0(\zeta) = 1 \text{ et } M_1(\zeta) = \frac{1}{2}(3\zeta - 1), \\ \left(\frac{n+2}{2n+3} M_{n+1}(\zeta) = \left(\zeta - \frac{1}{(2n+1)(2n+3)} \right) M_n(\zeta) - \frac{n}{2n+1} M_{n-1}(\zeta), \quad n \geq 1. \right. \end{cases}$$

4.4 Formules de Gauss-Lobatto associées à M'_N

Ce sont des formules de quadrature à $N + 1$ points exactes sur $P_{2N-1}([-1, 1])$ qui s'écrivent :

$$\forall \Phi \in P_{2N-1}(\Lambda), \int_{-1}^1 \Phi(\zeta) (1 + \zeta) d\zeta = \sum_{j=1}^{N+1} \Phi(\zeta_j^{(2)}) \omega_j^{(2)},$$

où

$$\begin{aligned} \zeta_1^{(2)} = -1 \quad \zeta_{N+1}^{(2)} = 1 \quad \zeta_j^{(2)}, 2 \leq j \leq N \text{ sont les zéros du polynôme } M'_N \\ \omega_1^{(2)} = \frac{8}{N(N+2)M'_N(-1)} \quad \omega_j^{(2)} = \frac{4}{N(N+2)M'_N(\zeta_j^{(2)})}, 2 \leq j \leq N+1 \text{ sont les poids associés} \end{aligned} \quad (4.4.1)$$

4.5 Polynômes de Lagrange

4.5.1 Explicitation de $l_j^{(2)}$

On note $l_j^{(2)}$ le j -ième polynôme de base de Lagrange associé aux zéros de $(1 - \zeta^2)M'_N$, on a la proposition suivante.

Proposition 4.5.1 *Le polynôme $l_j^{(2)}$ de Lagrange, associé aux zéros de $(1 - \zeta^2)M'_N$ vérifie*

$$l_i^{(2)}(\zeta) = \begin{cases} -\frac{(1-\zeta^2)M'_N}{N(N+2)M_N(\zeta_i^{(2)})(\zeta-\zeta_i^{(2)})} & \text{si } 2 \leq i \leq N \text{ et } \zeta \neq \zeta_j \\ (-1)^{N+1} \frac{2(1-\zeta)M'_N(\zeta)}{N(N+1)(N+2)} & \text{si } i = 1 \\ \frac{(1+\zeta)M'_N(\zeta)}{N(N+2)} & \text{si } i = N+1 \\ \delta_{ij} & \text{si } \zeta = \zeta_j \text{ et } 1 \leq j \leq N+1. \end{cases} \quad (4.5.1)$$

Preuve Par définition de $l_i^{(2)}$, on a $l_i^{(2)}(\xi_j) = \delta_{ij}, 1 \leq j \leq N + 1$ et il existe $c \in \mathbb{R}$ tel que

$$l_i^{(2)}(\zeta) = c \frac{(1 - \zeta^2)M'_N}{(\zeta - \zeta_i)} \quad (4.5.2)$$

Il reste à calculer c pour que $\lim_{\zeta \rightarrow \zeta_i} l_i^{(2)}(\zeta)$ soit égal à 1.

1) Si $2 \leq i \leq N$ un développement de Taylor donne que $\lim_{\zeta \rightarrow \zeta_i^{(2)}} \frac{M'_N(\zeta)}{(\zeta - \zeta_i^{(2)})} = M''_N(\zeta_i)$.

D'autre part, la formule (4.3.1) donne $M''_N(\zeta_i) = -\frac{N(N+2)M_N(\zeta_i)}{(1-\zeta_i^2)}$. On remplace dans (4.5.2), on trouve alors

$$l_i^{(2)}(\zeta) = -\frac{(1 - \zeta^2)M'_N}{N(N + 2)M_N(\zeta_i)(\zeta - \zeta_i)}.$$

2) Si $i = 1$ on utilise (4.3.1) pour $\zeta = \zeta_1 = -1$, on obtient $M'_N(-1) = -\frac{N(N+2)M_N(-1)}{4}$, où $M_N(-1) = (-1)^N(N+1)$. On remplace $M'_N(-1)$ dans (4.5.2), on trouve le résultat.

3) Si $i = N+1$ on utilise (4.3.1) pour $\zeta = \zeta_{N+1} = 1$, on obtient $M'_N(1) = \frac{N(N+2)}{2}M_N(1)$, où $M_N(1) = 1$. On remplace $M'_N(1)$ dans (4.5.2), on trouve le résultat. ■

Proposition 4.5.2 Soit $l_j^{(2)}$ les polynômes de Lagrange associés aux zéros de $(1 - \zeta^2)M'_N$. Alors on a :

$$l_i^{(2)'}(\zeta_j) = \begin{cases} \frac{M_N(\zeta_j)}{M_N(\zeta_j)(\zeta_j - \zeta_i)} & \text{si } 2 \leq i \leq N \text{ et } j \neq i \\ -\frac{1}{2(1+\zeta_i)} & \text{si } 2 \leq i \leq N \text{ et } j = i \\ \frac{2(-1)^N M_N(\zeta_j)}{(N+1)(1+\zeta_j)} & \text{si } i = 1 \text{ et } j \neq i \\ -\frac{N(N+2)}{6} & \text{si } i = 1 \text{ et } j = 1 \\ -\frac{M_N(\zeta_j)}{(1-\zeta_j)} & \text{si } i = N+1 \text{ et } j \neq i \\ \frac{N(N+1)^2(N+2)}{4} + 1 & \text{si } i = N+1 \text{ et } j = i. \end{cases} \quad (4.5.3)$$

Preuve D'après la proposition précédente on a

1) Si $2 \leq i \leq N$, $l_i^{(2)}(\zeta) = -\frac{(1-\zeta^2)M'_N}{N(N+2)M_N(\zeta_i^{(2)})(\zeta - \zeta_i^{(2)})}$.

a) On dérive $\left((1 + \zeta)(\zeta - \zeta_i)l_i^{(2)}(\zeta)\right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_j$ avec $j \neq i$, on obtient $l_i^{(2)'}(\zeta_j) = \frac{M'_N(\zeta_j^{(2)})}{M_N(\zeta_j^{(2)})(\zeta_j - \zeta_i^{(2)})}$.

b) On dérive deux fois $\left((1 + \zeta)(\zeta - \zeta_i)l_i^{(2)}(\zeta)\right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_i$, on obtient $l_i^{(2)'}(\zeta_i) = -\frac{1}{2(1+\zeta_i^{(2)})}$.

2) Si $i = 1$, on a $l_1^{(2)}(\zeta) = (-1)^{N+1} \frac{2(1-\zeta)M'_N(\zeta)}{N(N+1)(N+2)}$.

a) On dérive $\left((1 + \zeta)^2 l_1^{(2)}(\zeta)\right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_j$ avec $j \neq i$, on obtient $l_1^{(2)'}(\zeta_j) = \frac{2(-1)^N M_N(\zeta_j^{(2)})}{(N+1)(1+\zeta_j^{(2)})}$.

b) On dérive trois fois $\left((1 + \zeta)^2 l_1^{(2)}(\zeta)\right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_1 = -1$, on obtient $l_1^{(2)'}(\zeta_1) = -\frac{N(N+2)}{6}$.

3) Si $i = N+1$, on a $l_{N+1}^{(2)}(\zeta) = \frac{(1+\zeta)M'_N(\zeta)}{N(N+2)}$

a) On dérive $\left((1 - \zeta)l_{N+1}^{(2)}(\zeta)\right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_j$ avec $j \neq i$, on obtient $l_{N+1}^{(2)'}(\zeta_j) = -\frac{M_N(\zeta_j^{(2)})}{(1-\zeta_j^{(2)})}$.

b) On dérive deux fois $\left((1 - \zeta)l_{N+1}^{(2)}(\zeta)\right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_{N+1} = 1$, on obtient $l_{N+1}^{(2)'}(1) = \frac{N(N+1)^2(N+2)}{4} + 1$.

On note m_j le polynôme de base de Lagrange associé à ζ_j , $1 \leq j \leq N-1$ ζ_j étant les zéros de L'_N . ■

Proposition 4.5.3 Soit $l_i^{(2)}$ le polynômes de Lagranges associés à $(1 - \zeta)M'_N$. Alors on a :

$$l_i^{(2)''}(\zeta_j) = \begin{cases} \frac{(\zeta_i - 3\zeta_j - 2)M_N(\zeta_j)}{(1 + \zeta_j)(\zeta_j - \zeta_i)^2 M_N(\zeta_j)} & \text{si } 2 \leq i \leq N \text{ et } j \neq i \\ \frac{1}{(1 + \zeta_i)^2} - \frac{N(N+2)}{3(1 - \zeta_i^2)} & \text{si } 2 \leq i \leq N \text{ et } j = i \\ \frac{(-1)^N 6M_N(\zeta_j)}{(N+1)(1 + \zeta_j)^2} & \text{si } i = 1 \text{ et } 2 \leq j \leq N \\ \frac{(N-1)N(N+1)(N+3)}{32} & \text{si } i = 1 \text{ et } j = 1 \\ \frac{(-1)^N (N-1)(N+3)}{2(N+1)} & \text{si } i = 1 \text{ et } j = N+1 \\ -\frac{(1+3\zeta_j)M_N(\zeta_j)}{(1 + \zeta_j)(1 - \zeta_j)^2} & \text{si } i = N+1 \text{ et } 2 \leq j \leq N \\ \frac{(-1)^N (N+1)(N^2+2N-6)}{12} & \text{si } i = N+1 \text{ et } j = 1 \\ \frac{(N+1)^2(3N^2+6N+2)}{12} + 1 & \text{si } i = N+1 \text{ et } j = i \end{cases} \quad (4.5.4)$$

Preuve 1)

a) On dérive deux fois $\left((1 + \zeta)(\zeta - \zeta_i)l_i^{(2)}(\zeta) \right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_j$ avec $j \neq i$, on obtient $l_i^{(2)''}(\zeta_j) = \frac{(\zeta_i - 3\zeta_j - 2)M_N(\zeta_j)}{(1 + \zeta_j)(\zeta_j - \zeta_i)^2 M_N(\zeta_j)}$.

b) On dérive trois fois $\left((1 + \zeta)(\zeta - \zeta_i)l_i^{(2)}(\zeta) \right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_i$, on obtient $l_i^{(2)''}(\zeta_j) = \frac{1}{(1 + \zeta_i)^2} - \frac{N(N+2)}{3(1 - \zeta_i^2)}$.

2)

a) On dérive deux fois $\left((1 + \zeta)^2 l_1^{(2)}(\zeta) \right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_j$ avec $j \neq i$ et $2 \leq j \leq N+1$, on obtient $l_1^{(2)''}(\zeta_j) = \frac{(-1)^N 6M_N(\zeta_j)}{(N+1)(1 + \zeta_j)^2}$ et $l_1^{(2)''}(1) = \frac{(-1)^N (N-1)(N+3)}{2(N+1)}$.

b) On dérive trois fois $\left((1 + \zeta)^2 l_1^{(2)}(\zeta) \right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_1$, on obtient $l_1^{(2)''}(-1) = \frac{(N-1)N(N+1)(N+3)}{32}$.

3) On dérive deux fois $\left((1 - \zeta^2)l_{N+1}^{(2)}(\zeta) \right)$ et on utilise (4.3.1). On pose $\zeta = \zeta_j$ avec $j \neq i$ et $1 \leq j \leq N$, on obtient $l_{N+1}^{(2)''}(\zeta_j) = -\frac{(1+3\zeta_j)M_N(\zeta_j)}{(1 + \zeta_j)(1 - \zeta_j)^2}$ ■

4.5.2 Explicitation de m_j

On note m_j le polynôme de base de Lagrange associé à ξ_j , $1 \leq j \leq N-1$ ξ_j étant les zéros de L'_N .

Proposition 4.5.4 On a

$$m'_j(\xi_q) = \begin{cases} \frac{(1 - \xi_j^2)L_N(\xi_q)}{L_N(\xi_j)(1 - \xi_j^2)(\xi_q - \xi_j)} & \text{si } j \neq q \\ \frac{2\xi_j}{(1 - \xi_j^2)} & \text{si } j = q. \end{cases}$$

Preuve On remarque que, d'après (4.1.1), on a :

$$m_j(\xi) = -\frac{(1 - \xi_j^2)L'_N(\xi)}{N(N+1)L_N(\xi_j)(\xi - \xi_j)}, \text{ pour } \xi \neq \xi_j \text{ et } 1 \leq j \leq N$$

On en déduit que :

$$m_j(-1) = -\frac{(1-\xi_j)}{2L_N(\xi_j)}L_N(-1) \quad (4.5.5)$$

et

$$m_j(1) = -\frac{(1+\xi_j)}{2L_N(\xi_j)}. \quad (4.5.6)$$

On dérive le polynôme $(1-\xi^2)(\xi-\xi_j)m_j(\xi)$ deux fois et on utilise (4.1.1), on trouve :

$$m'_j(\xi_q) = \frac{(1-\xi_j^2)L'_N(\xi_q)}{2L_N(\xi_j)(-3\xi_q^2+2\xi_j\xi_q+1)} \left[1 + \frac{(2\xi_j-6\xi_q)}{N(N+1)(\xi_q-\xi_j)} \right], \text{ pour } q = 0 \text{ ou } N,$$

en remplaçant q par N et 0 , on obtient

$$m'_j(1) = \frac{(1+\xi_j)}{4L_N(\xi_j)} \left(-L'_N(1) + L_N(1) \frac{(3-\xi_j)}{(1-\xi_j)} \right) \quad (4.5.7)$$

et

$$m'_j(-1) = -\frac{(1-\xi_j)}{4L_N(\xi_j)} \left(L'_N(-1) + \frac{L_N(-1)(3+\xi_j)}{(1+\xi_j)} \right). \quad (4.5.8)$$

Pour $1 \leq q \leq N-1$ on trouve

$$m'_j(\xi_q) = \frac{(1-\xi_j^2)L_N(\xi_q)}{(1-\xi_q^2)(\xi_q-\xi_j)L_N(\xi_j)} \text{ pour } j \neq q$$

et

$$m'_j(\xi_j) = \frac{2\xi_j}{(1-\xi_j^2)}.$$

■

Explicitation de $m_i^{(2)}$

Proposition 4.5.5 Soit $m_i^{(2)}$ le ième polynôme de base de Lagrange associé aux nœuds de (ζ_i^2) , $2 \leq i \leq N$. Alors on a :

$$m_i^{(2)}(\zeta_p) = \frac{(1-\zeta_i^2)M_N(\zeta_p)}{(1-\zeta_i^2)M_N(\zeta_i)(\zeta_p-\zeta_i)} \text{ pour } p \neq i$$

$$m_i^{(2)}(\zeta_i) = \frac{5\zeta_i-1}{2(1-\zeta_i^2)}.$$

Preuve On remarque que, d'après (4.3.1) on a

$$m_i^{(2)}(\zeta) = -\frac{(1-\zeta_i^2)M'_N(\zeta)}{N(N+2)M_N(\xi_i)(\zeta-\zeta_i)}, \text{ pour } \zeta \neq \zeta_i \text{ et } 2 \leq i \leq N+1$$

On en déduit que :

$$m_i^{(2)}(1) = -\frac{(1+\zeta_i)M_N(-1)}{2M_N(\zeta_i)} \quad (4.5.9)$$

et

$$m_i^{(2)}(-1) = -\frac{(1-\zeta_i)M_N(-1)}{4M_N(\zeta_i)}. \quad (4.5.10)$$

On dérive le polynôme $(1-\zeta^2)(1+\zeta)(\zeta-\zeta_j)m_i^{(2)}(\zeta)$ deux fois et on utilise (4.3.1), on trouve alors

$$m_i^{(2)}(1) = \frac{(\zeta_i+1)}{4(\zeta_i-1)M_N(\zeta_i)} \left((1-\zeta_i)M_N'(1) + \frac{(3\zeta_i-7)M_N(1)}{2} \right) \quad (4.5.11)$$

et

$$m_i^{(2)}(-1) = -\frac{(1-\zeta_i)}{6(1+\zeta_i)M_N(\zeta_i)} \left((1+\zeta_i)M_N'(-1) + \frac{(9+3\zeta_i)M_N(-1)}{4} \right) \quad (4.5.12)$$

Pour $2 \leq p \leq N$ on trouve

$$m_i^{(2)}(\zeta_p) = \frac{(1-\zeta_i^2)M_N(\zeta_p)}{(1-\zeta_p^2)M_N(\zeta_i)(\zeta_p-\zeta_i)} \text{ pour } p \neq i$$

et

$$m_i^{(2)}(\zeta_i) = \frac{5\zeta_i-1}{2(1-\zeta_i^2)}.$$

■

4.5.3 Ecriture des intégrales dans un rectangle $[a, b] \times [c, d]$

Lemme 4.5.1 On a

$$\omega' = \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \omega \text{ et } \rho' = \left(\frac{d-c}{2}\right) \rho.$$

où ω' resp ρ' sont les poids associés à ζ resp ξ dans un rectangle $[a, b] \times [c, d]$.

Preuve Ces formules s'obtiennent simplement en faisant le changement de variable

1) On pose $\zeta' = \left(\frac{b-a}{2}\right)\zeta + \left(\frac{b+a}{2}\right)$ et $\tilde{u}(\zeta') = u(\zeta)$. On a alors

$$\begin{aligned} \int_a^b \tilde{u}(\zeta') \tilde{v}(\zeta') (\zeta' - a) \partial \zeta' &= \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \int_{-1}^1 u(\zeta) v(\zeta) (1+\zeta) \partial \zeta \\ &= \sum_{i=1}^{N+1} u(\zeta_i) v(\zeta_i) \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \omega_i \\ &= \sum_{i=1}^{N+1} \tilde{u}(\zeta'_i) \tilde{v}(\zeta'_i) \omega'_i \end{aligned}$$

d'où

$$\omega'_i = \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \omega_i.$$

2) Soit $\xi \in]-1, 1[$ et $\xi' \in]c, d[$. On pose $\xi' = (\frac{d-c}{2})\xi + (\frac{d+c}{2})$ et $\tilde{u}(\xi') = u(\xi)$. On alors

$$\begin{aligned} \int_c^d \tilde{u}(\xi') \tilde{v}(\xi') \partial \xi' &= \sum_{i=0}^N \tilde{u}(\xi'_i) \tilde{v}(\xi'_i) \rho'_i \\ &= \int_{-1}^1 u(\xi) v(\xi) \left(\frac{d-c}{2}\right) \partial \xi \\ &= \sum_{i=0}^N u(\xi_i) v(\xi_i) \left(\frac{d-c}{2}\right) \rho_i \end{aligned}$$

d'où

$$\rho'_i = \left(\frac{d-c}{2}\right) \rho_i.$$

■ On déduit du lemme précédent que les produits scalaires sur $[a, b]$ et $[c, d]$ s'écrivent respectivement

$$\begin{aligned} ((\tilde{u}_{c'}, \tilde{v}_{c'}))_N &= \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 ((u_\zeta, v_\zeta))_N \\ ((\tilde{u}_{\xi'}, \tilde{v}_{\xi'}))_N &= \left(\frac{d-c}{2}\right) ((u_\xi, v_\xi))_N. \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} ((\partial_{c'} \tilde{u}, \partial_{c'} \tilde{v}))_N &= ((\partial_\zeta u, \partial_\zeta v))_N \\ ((\partial_{\xi'} \tilde{u}, \partial_{\xi'} \tilde{v}))_N &= \frac{2}{d-c} ((\partial_\xi u, \partial_\xi v))_N. \end{aligned}$$

4.6 Mise en œuvre du Laplacien et du problème de Stokes

4.6.1 Calcul de la matrice A

Lemme 4.6.1 Pour tout $i \geq 2, p \leq N$ et $1 \leq j, q \leq N-1$, on a

$$\left(\left(\frac{l_p^{(2)} l_q}{r}, \frac{l_{p'}^{(2)} l_{q'}}{r}\right)\right)_N = \frac{1}{4} \frac{\delta_{qq'} \delta_{pp'}}{r_p^2} \omega_p \rho_{q'}.$$

Lemme 4.6.2 Pour tout $2 \leq i, p \leq N, 1 \leq j$ et $q \leq N-1$, on a

$$\left((\partial_z l_p^{(2)} l_q, \partial_z l_{p'}^{(2)} l_{q'})\right)_N = \frac{1}{4} \delta_{pp'} \omega_p \alpha_{qq'}.$$

où

$$\begin{cases} \alpha_{qq'} = \alpha_{q'q} = \frac{4}{N(N+1)L_N(\xi_q)L_N(\xi_{q'})}(\xi_q - \xi_{q'})^2 & 0 \leq q < q' \leq N \\ \alpha_{qq} = \frac{2}{3(1-\xi_q^2)L_N^2(\xi_q)} & 1 \leq q \leq N-1 \\ \alpha_{00} = \alpha_{NN} = \frac{N^2+N+1}{6} \end{cases}$$

Pour la preuve, voir [21].

Lemme 4.6.3 On a

$$((\partial_r l_p^{(2)} l_q, \partial_r l_{p'}^{(2)} l_{q'}))_N = \frac{1}{4} \delta_{qq'} \rho_q \beta_{pp'}$$

et trois cas se distinguent.

1) Si $2 \leq p, p' \leq N$ et $1 \leq q, q' \leq N-1$ on a

$$\beta_{pp'} = \begin{cases} \frac{8}{N(N+2)M_N(\zeta_p)M_N(\zeta_{p'})}(\zeta_p - \zeta_{p'})^2 & p \neq p' \\ \omega_p \left[\frac{N(N+2)}{3(1-\zeta_p^2)} - \frac{1}{2(1+\zeta_p)^2} \right] & p = p' \end{cases}$$

2) Si $p = 1$ et $2 \leq p' \leq N$ et $1 \leq q, q' \leq N-1$ on a

$$\beta_{1p'} = \frac{64}{N(N+2)M_N(\zeta_{p'})M_N(\zeta_1)(1+\zeta_{p'})^2}$$

3) Si $p = p'$ et $1 \leq q, q' \leq N-1$ on a

$$\beta_{11} = 2 + \frac{4}{M_N^2(-1)}(3 - N(N+2)).$$

Preuve La formule d'exactitude, donne pour 1) et 2)

$$((\partial_r l_p^{(2)} l_q, \partial_r l_{p'}^{(2)} l_{q'}))_N = -\frac{1}{4} \delta_{qq'} \omega_{p'} \rho_{q'} \left(l_{p'}^{(2)''}(r_{p'}) + \frac{l_{p'}^{(2)'}(r_{p'})}{r_{p'}} \right) \quad (4.6.1)$$

Pour 3) On a

$$((\partial_r l_1^{(2)} l_q, \partial_r l_1^{(2)} l_{q'}))_N = -\delta_{qq'} \rho_{q'} \left(\frac{1}{4} l_1^{(2)''}(r_1) + \left[\frac{l_1^{(2)}(r)}{2} \right]_0^1 \right)$$

On utilise (4.2.1) (4.4.1) (4.5.3) et (4.5.4) pour conclure. ■

4.6.2 Ecriture de a_N, a_N^k

On a

$$((\partial_\zeta \bar{l}_p^2 \bar{l}_q, \partial_\zeta \bar{l}_{p'}^2 \bar{l}_{q'}))_N = ((\partial_\zeta l_p^2, \partial_\zeta l_{p'}^2))_N \left(\frac{d-c}{2} \right) ((l_q, l_{q'}))_N$$

or on a

$$((l_q, l_{q'}))_N = \delta_{qq'} \rho_q, ((\partial_\xi l_q, \partial_\xi l_{q'}))_N = \alpha_{qq'}, ((l_p^2, l_{p'}^2))_N = \delta_{pp'} \omega_p \text{ et } ((\partial_\zeta l_p^2, \partial_\zeta l_{p'}^2))_N = \beta_{pp'}$$

On déduit alors que

$$((\partial_{\zeta'} \bar{l}_p^2 \bar{l}_q, \partial_{\zeta'} \bar{l}_{p'}^2 \bar{l}_{q'}))_N = \left(\frac{d-c}{2}\right) \delta_{qq'} \rho_q \beta_{pp'} \text{ et } ((\partial_{\xi'} \bar{l}_p^2 \bar{l}_q, \partial_{\xi'} \bar{l}_{p'}^2 \bar{l}_{q'}))_N = \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \left(\frac{2}{d-c}\right) \delta_{pp'} \omega_p \alpha_{qq'}.$$

De même on a

$$\left(\left(\frac{\bar{l}_p^2 \bar{l}_q}{\zeta' - a}, \frac{\bar{l}_{p'}^2 \bar{l}_{q'}}{\zeta' - a}\right)\right)_N = \left(\frac{d-c}{2}\right) \frac{\delta_{pp'} \delta_{qq'}}{(1+\zeta_p)^2} \omega_p \rho_q.$$

On peut écrire finalement dans le cas de l'équation de Laplace :

$$\begin{aligned} a_N^k (\bar{l}_p^2(\zeta') \bar{l}_q(\zeta'), \bar{l}_{p'}^2(\zeta') \bar{l}_{q'}(\zeta')) &= \left(\frac{d-c}{2}\right) \delta_{qq'} \rho_q \beta_{pp'} + \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \left(\frac{2}{d-c}\right) \delta_{pp'} \omega_p \alpha_{qq'} \\ &+ k^2 \left(\frac{d-c}{2}\right) \frac{\delta_{pp'} \delta_{qq'}}{(1+\zeta_p)^2} \omega_p \rho_q. \end{aligned}$$

et

$$a_N = a_N^0.$$

4.6.3 Calcul de la matrice B

La matrice B_{rk}

Lemme 4.6.4 Pour tout $2 \leq i, p \leq N$ et $1 \leq j, q \leq N-1$, on a

$$b_N(l_p^{(2)} l_q, 0; m_i^{(2)} m_j) = \frac{1}{4} \delta_{jq} \rho_q \omega_p \gamma_{ip},$$

où

$$\gamma_{ip} \begin{cases} 2 \frac{(1-\zeta_i^2)}{(1-\zeta_p^2)} \frac{M_N(\zeta_p)}{M_N(\zeta_i)(\zeta_p-\zeta_i)} & i \neq p, \\ \frac{2\zeta_p-1}{(1-\zeta_p^2)} & i = p. \end{cases}$$

Preuve On a

$$\begin{aligned} b_N(l_p^{(2)} l_q, 0; m_i^{(2)} m_j) &= - \left(\left(m_i^{(2)} m_j, \partial_r l_p^{(2)} l_q + \frac{l_p^{(2)} l_q}{r} \right) \right)_N \\ &= \frac{1}{4} \delta_{jq} \rho_q \omega_p \left(m_i^{(2)'}(r_p) + \frac{m_i^{(2)}(r_p)}{r_p} \right) + \frac{1}{4} \delta_{jq} \delta_{ip} \rho_q \omega_p. \end{aligned}$$

On utilise la proposition 4.5.5 pour conclure. ■

Lemme 4.6.5 1) Si $q = 0$, on a

$$b_N(l_p^{(2)} l_0, 0; m_i^{(2)} m_j) = \begin{cases} \rho_0 m_j (-1) \left(\frac{1}{2} m_i^{(2)'}(-1) \omega_1 + m_i^{(2)}(-1)\right) \text{ si } p = 1. \\ \rho_0 m_j (-1) \left(\frac{1}{2} m_i^{(2)'}(1) \omega_{N+1} - m_i^{(2)}(1)\right) \text{ si } p = N + 1. \\ \frac{1}{2} \rho_0 m_j (-1) m_i^{(2)'}(\zeta_p) \omega_p \text{ si } p \in [2, N]. \end{cases}$$

2) Si $q = N$, on a

$$b_N(l_p^{(2)}l_N, 0; m_i^{(2)}m_j) = \begin{cases} \rho_N m_j (1) (\frac{1}{2}m_i^{(2)'} (-1) \omega_1 + m_i^{(2)} (-1)) & \text{si } p = 1. \\ \rho_N m_j (1) (\frac{1}{2}m_i^{(2)'} (1) \omega_{N+1} - m_i^{(2)} (1)) & \text{si } p = N + 1. \\ \frac{1}{2}\rho_N m_j (1) m_i^{(2)'} (\zeta_p) \omega_p & \text{si } p \in [2, N]. \end{cases}$$

3) Si $q \in [1, N - 1]$, et $p \in [1, N + 1]$ on a

$$b_N(l_p^{(2)}l_q, 0; m_i^{(2)}m_j) = \begin{cases} \rho_q \delta_{jq} (\frac{1}{2}m_i^{(2)'} (-1) \omega_1 + m_i^{(2)} (-1)) & \text{si } p = 1. \\ \rho_q \delta_{jq} (\frac{1}{2}m_i^{(2)'} (1) \omega_{N+1} - m_i^{(2)} (1)) & \text{si } p = N + 1. \end{cases}$$

Preuve On utilise la propriété d'exactitude.

$$\begin{aligned} b_N(l_p^{(2)}l_q, 0; m_i^{(2)}m_j) &= -((m_i^{(2)}m_j, \partial_r l_p^{(2)}l_q + \frac{l_p^{(2)}l_q}{r})_N \\ &= \delta_{jq} \rho_q \left(\int m_i^{(2)'}(r) l_p^{(2)}(r) r dr - [m_i^{(2)}(r) l_p^{(2)}(r)]_0^1 \right), \end{aligned}$$

ensuite on utilise le fait que $\tilde{m}_i^{(2)'}(r) = 2m_i^{(2)'}(\zeta)$ et $\int m_i^{(2)'}(r) l_p^{(2)}(r) r dr = \frac{1}{2}m_i^{(2)'}(\zeta_p) \omega_p$ et la proposition 4.5.5 pour conclure. ■

La matrice $B_{\theta k}$

Lemme 4.6.6 Pour tout $2 \leq i, p \leq N$ et $1 \leq j, q \leq N - 1$, on a

$$((m_i^{(2)}m_j, \frac{l_p^{(2)}l_q}{r})_N = \frac{1}{4} \frac{\delta_{ip} \delta_{jq}}{r_p} \omega_p \rho_q.$$

La matrice B_{zk}

Lemme 4.6.7 1) Pour tout $2 \leq i, p \leq N$ et $1 \leq j, q \leq N - 1$, on a

$$b_N(0, l_p^N l_q, m_i^{(2)}m_j) = \frac{1}{4} \delta_{iq} \rho_q \omega_p \gamma_{jq}$$

où

$$\gamma_{jq} = \begin{cases} \frac{(1-\xi_j^2)}{(1-\xi_q^2)} \frac{L_N(\xi_q)}{L_N(\xi_j)(\xi_q-\xi_j)} & j \neq q, \\ \frac{2\xi_q}{(1-\xi_q^2)} & j = q. \end{cases}$$

2) Pour tout $2 \leq i \leq N$ et $1 \leq j, q \leq N - 1$, on a

$$b_N(0, l_1^{(2)}l_q, m_i^{(2)}m_j) = \frac{1}{4} m_i^{(2)}(\zeta_1) \rho_q \omega_1 \gamma_{jq},$$

où

$$\gamma_{jq} = \begin{cases} \frac{(1-\xi_j^2)}{(1-\xi_q^2)} \frac{L_N(\xi_q)}{L_N(\xi_j)(\xi_q-\xi_j)} & j \neq q, \\ \frac{2\xi_q}{(1-\xi_q^2)} & j = q, \end{cases}$$

Preuve Pour la preuve du lemme 4.6.7, on a la propriété d'exactitude

$$b_N(0, l_p^{(2)} l_q, m_i^{(2)} m_j) = \frac{1}{4} \delta_{ip} \rho_q \omega_p m_j'(\xi_q).$$

et

$$b_N(0, l_1^{(2)} l_q, m_i^{(2)} m_j) = \frac{1}{4} \rho_q \omega_1 \gamma_{jq} m_i^{(2)}(\zeta_1)$$

où $\gamma_{jq} = m_j'(\xi_q)$. Enfin pour calculer $m_j'(\xi_q)$ et $m_i^{(2)}(\zeta_1)$ on utilise les propositions 4.5.4 et 4.5.5. ■

Lemme 4.6.8 1) Si $q = 0$, on a

$$b_N(0, l_p^N l_0, m_i^{(2)} m_j) = \begin{cases} \frac{1}{4} m_i^{(2)}(\zeta_p) \omega_p (\rho_0 m_j'(-1) + m_j(-1)) & \text{si } p = 1 \text{ ou } p = N + 1 \\ \frac{1}{4} \delta_{ip} \omega_p (\rho_0 m_j'(-1) + m_j(-1)) & \text{si } p \in [2, N]. \end{cases}$$

1) Si $q = N$

$$b_N(0, l_p^N l_N, m_i^{(2)} m_j) = \begin{cases} \frac{1}{4} m_i^{(2)}(\zeta_p) \omega_p (\rho_N m_j'(1) - m_j(1)) & \text{si } p = 1 \text{ ou } p = N + 1. \\ \frac{1}{4} \delta_{ip} \omega_p (\rho_N m_j'(1) - m_j(1)) & \text{si } p \in [2, N]. \end{cases}$$

1) Si $q \in [1, N - 1]$

$$b_N(0, l_p^N l_q, m_i^{(2)} m_j) = \frac{1}{4} m_i^{(2)}(\zeta_p) \omega_p \rho_q \gamma_{jq} \text{ si } p = 1 \text{ ou } p = N + 1.$$

Preuve On utilise la propriété d'exactitude.

$$-((m_j, \partial_z l_q))_N = \int_{-1}^1 m_j'(\xi) l_q(\xi) \partial \xi - [m_j(\xi) l_q(\xi)]_{-1}^1.$$

donc

$$-((m_j, \partial_z l_q))_N = \begin{cases} m_j'(\xi_q) & \text{si } q \in [1, N - 1]. \\ m_j'(\xi_q) \pm m_j(\mp 1) & \text{si } q = 0 \text{ ou } N. \end{cases}$$

Enfin on utilise la proposition 4.5.4 pour conclure. ■

4.6.4 Calcul de p

On sait que $p_N(r, z) = \sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} p_{ij} m_i^{(2)}(r) m_j(z)$, on en déduit que

$$\int_{\Omega} p_N(r, z) r dr dz = \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{N-1} p_{ij} \left(\int m_i^{(2)}(r) r dr \right) \left(\int m_j(z) dz \right).$$

On prend la solution $p_\delta = p_N - \frac{1}{mes\Omega} \int_{\Omega} p_N(r, z) r dr dz$ pour que

$$\frac{1}{mes\Omega} \int_{\Omega} p_\delta(r, z) r dr dz = 0.$$



Annexe 2 : Calcul de la matrice des joints

Sommaire

5.1 Cas de la figure 1	194
5.2 Cas de la figure 2	196
5.3 Cas de la figure 3	198
5.3.1 Polynôme t_j^{2N-2}	200
5.3.2 Polynôme t_j^{N-2}	200

Pour traiter les trois domaines Ω_1 , Ω_2 et Ω_3 , on est contraint d'étudier quatre cas possibles de joints.

5.1 Cas de la figure 1

On considère l'inconnue \tilde{v}_1 appartenant à $\mathbb{P}_{N_1}(\Omega_1)$, $\tilde{\Phi}$ la fonction joint appartenant à $\mathbb{P}_{N_2}(\Omega_2)$, et la fonction test $\tilde{\Psi}$ appartenant à $\mathbb{P}_{N_1-2}(\Gamma^{1,2})$.

La relation de joint s'écrit sur Γ .

$$\int_a^b \tilde{v}_1(\zeta', e) \tilde{\Psi}(\zeta') (\zeta' - a) \partial \zeta' = \int_a^b \tilde{\Phi}(\zeta', e) \tilde{\Psi}(\zeta') (\zeta' - a) \partial \zeta' \quad (5.1.1)$$

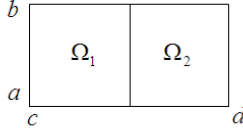


FIGURE 5.1 – 1^{er} cas du joint

Ceci donne :

$$\frac{(b-a)^2}{4} \sum_{i=1}^{N_1+1} \tilde{v}_1(\zeta_i^1, e) \tilde{\Psi}(\zeta_i^1) \omega_i^1 = \frac{(b-a)^2}{4} \sum_{i=1}^{N_2+1} \tilde{\Phi}(\zeta_i^2, e) \tilde{\Psi}(\zeta_i^2) \omega_i^2, \quad (5.1.2)$$

où

ω_i^1 resp ω_i^2 sont les poids associés aux polynômes de degré N_1 resp N_2 pour le segment de référence $[-1, 1]$,
 ζ_i^1 resp ζ_i^2 sont les nœuds associés à $(1 - \zeta^2)M'_{N_1}$ resp $(1 - \zeta^2)M'_{N_2}$ pour le segment $[a, b]$.

Puisque $\tilde{v}_1(b, e) = \tilde{\Phi}(b, e)$ et $\tilde{v}_1(a, e) = \tilde{\Phi}(a, e)$, on a

$$\sum_{i=2}^{N_1} \tilde{v}_1(\zeta_i^1, e) \tilde{\Psi}(\zeta_i^1) \omega_i^1 = \sum_{i=1}^{N_2+1} \tilde{\Phi}(\zeta_i^2, e) \tilde{\Psi}(\zeta_i^2) \omega_i^2$$

où $\tilde{\omega}_i^2 = \omega_i^2$ si $2 \leq i \leq N$, $\tilde{\omega}_1^2 = \omega_1^2 - \omega_1^1$ et $\tilde{\omega}_{N_2+1}^2 = \omega_{N_2+1}^2 - \omega_{N_1+1}^1$.

On écrit (5.1.1) avec la fonction de base $\tilde{\Psi} = l_j^{2, N_1-2}$ définie par $l_j^{2, N_1-2}(\zeta_i^1) = \delta_{ij}$, $i, j \in \{2, \dots, N_1\}$. On note $\tilde{v}_1(\zeta_i^1, e) = \tilde{v}_1^{i, N_1}$, on a alors

$$\sum_{i=2}^{N_1} \tilde{v}_1(\zeta_i^1, e) \tilde{\Psi}(\zeta_i^1) \omega_i^1 = \tilde{v}_1^{j, N_1} \omega_j = \sum_{i=2}^{N_1} B_{ji} \tilde{v}_1^{i, N_1},$$

avec $B_{ji} = \delta_{ij} \omega_j$ et $j \in \{2, \dots, N_1\}$.

De même, en notant $\tilde{\Phi}(\zeta_i^2, e) = \tilde{\Phi}^{1i}$ on obtient

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^{N_2} \tilde{\Phi}(\zeta_i^2, e) \tilde{\Psi}(\zeta_i^2) \omega_i^2 &= \sum_{i=1}^{N_2+1} \tilde{\Phi}^{1i} l_j^{2, N_1-2}(\zeta_i^2) \omega_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^{N_2+1} P_{ji} \tilde{\Phi}^{1i}. \end{aligned}$$

avec

$$P_{ji} = l_j^{2, N_1 - 2} (\zeta_i^2) \bar{\omega}_i^2.$$

On a ainsi $B\bar{v} = P\bar{\Phi}$ et puisque B est inversible, on peut écrire :

$$\bar{v}_1 = B^{-1}P\bar{\Phi}.$$

En posant $\tilde{Q} = B^{-1}P$ on a finalement :

$$\begin{pmatrix} \tilde{v}_1^{ij} \text{ intérieurs} \\ \tilde{v}_1^{iN_1} \text{ extérieurs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & \tilde{Q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{v}_1^{ij} \text{ intérieurs} \\ \bar{\Phi}^{i0} \end{pmatrix}$$

La matrice du problème s'écrit :

$$Q^T A_1 Q = Q^T F_1.$$

5.2 Cas de la figure 2

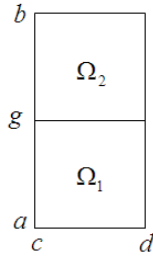


FIGURE 5.2 – 2^{ème} cas du joint

On considère l'inconnue \bar{v}_1 appartenant à $\mathbb{P}_{N_1}(\Omega_1)$, $\bar{\Phi}$ la fonction joint appartenant à $\mathbb{P}_{N_2}(\Omega_2)$ et fonction test $\bar{\Psi}$ appartenant à $\mathbb{P}_{N_1-2}(\Gamma^{1,2})$.

La relation de joint s'écrit :

$$\int_c^d \bar{v}_1(g, \xi) \bar{\Psi}(\xi) \partial \xi = \int_c^d \bar{\Phi}(g, \xi) \bar{\Psi}(\xi) \partial \xi. \quad (5.2.1)$$

En simplifiant les constantes, on obtient :

$$\frac{(d-c)}{2} \sum_{i=0}^{N_1} \bar{v}_1(g, \xi_i^1) \bar{\Psi}(\xi_i^1) \rho_i^1 = \frac{(d-c)}{2} \sum_{i=0}^{N_2} \bar{\Phi}(g, \xi_i^2) \bar{\Psi}(\xi_i^2) \rho_i^2, \quad (5.2.2)$$

où

ρ_i^1 resp ρ_i^2 sont les poids associés aux polynômes de degré N_1 resp N_2 pour le segment de référence $[-1, 1]$.
 ξ_i^1 resp ξ_i^2 sont les noeuds associés aux polynômes de degré N_1 resp N_2 pour le segment de référence $[c, d]$.

On a alors

$$\sum_{i=1}^{N_1-1} \tilde{v}_1(g, \xi_i^1) \tilde{\Psi}(\xi_i^1) \rho_i^1 = \sum_{i=0}^{N_2} \tilde{\Phi}(g, \xi_i^2) \tilde{\Psi}(\xi_i^2) \tilde{\rho}_i^2,$$

où

$$\tilde{\rho}_i^2 = \rho_i^1 \text{ si } i \in \{1, 2, \dots, N_2 - 1\}, \tilde{\rho}_{N_2}^2 = \rho_{N_2}^2 - \rho_{N_1}^1 \text{ et } \tilde{\rho}_0^2 = \rho_0^2 - \rho_0^1.$$

On écrit (5.2.1) avec les fonctions de base $l_j^{N_1-2}$ définies par $l_j^{N_1-2}(\xi_i^1) = \delta_{ij}$, $i, j \in \{1, \dots, N_1 - 1\}$. On a $\tilde{v}_1(g, \xi_i^1) = \tilde{v}_1^{N_1+1i}$, et

$$\sum_{i=1}^{N_1-1} \tilde{v}_1(g, \xi_i^1) \tilde{\Psi}(\xi_i^1) \rho_i^1 = \tilde{v}_1^{N_1+1i} \rho_j^1 = \sum_{i=1}^{N_1-1} B_{ji} \tilde{v}_1(g, \xi_i^1)$$

avec

$$B_{ji} = \delta_{ij} \rho_j^1.$$

En notant $\tilde{\Phi}(g, \xi_i^2) = \tilde{\Phi}^{2i}$ on obtient

$$\sum_{i=1}^{N_2} \tilde{\Phi}(g, \xi_i^2) \tilde{\Psi}(\xi_i^2) \tilde{\rho}_i^2 = \sum_{i=1}^{N_2} \tilde{\Phi}^{2i} l_j^{N_1-2}(\xi_i^2) \tilde{\rho}_i^2$$

avec

$$P_{ji} = l_j^{N_1-2}(\xi_i^2) \tilde{\rho}_i^2.$$

On déduit que $B\tilde{v} = P\tilde{\Phi}$, et puisque B est diagonale non nulle, alors on a écrire :

$$\tilde{v} = B^{-1}P\tilde{\Phi}.$$

On pose $\tilde{Q} = B^{-1}P$ et on a finalement :

$$\begin{pmatrix} \tilde{v}^{ij} \text{ intérieurs} \\ \tilde{v}_1^{N_1+1i} \text{ extérieurs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & \tilde{Q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{v}^{ij} \text{ intérieurs} \\ \tilde{\Phi}^{1i} \end{pmatrix}$$

La Matrice du problème s'écrit :

$$Q^T A_1 Q = Q^T F_1.$$

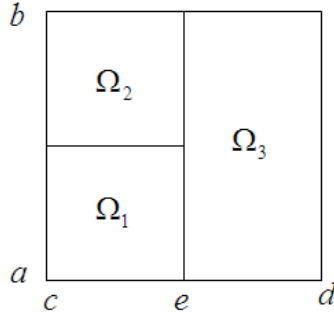


FIGURE 5.3 – 3^{2me} cas du joint

5.3 Cas de la figure 3

On considère l'inconnue \tilde{v}_1 appartenant à $\mathbb{P}_{N_1}(\Omega_1)$, deux fonctions joints $\tilde{\Phi}_2 \in \mathbb{P}_{N_2}(\Omega_2)$ et $\tilde{\Phi}_3 \in \mathbb{P}_{N_3}(\Omega_3)$, et la fonction test $\tilde{\Psi}$ appartenant à $\mathbb{P}_{N_1-2}(\Gamma)$. On suppose que $N_1 \leq \inf(N_2, N_3)$, on a

$$\int_a^b \tilde{v}_1(\zeta', e) \tilde{\Psi}(\zeta') (\zeta' - a) \partial \zeta' = \int_a^c \tilde{\Phi}_2(\zeta', e) \tilde{\Psi}(\zeta') (\zeta' - a) \partial \zeta' + \int_c^d \tilde{\Phi}_3(\zeta', e) \tilde{\Psi}(\zeta') (\zeta' - a) \partial \zeta'$$

Ceci donne :

$$\begin{aligned} \frac{(b-a)^2}{4} \sum_{i=1}^{N_1+1} \tilde{v}_1(\zeta_i^1, e) \tilde{\Psi}(\zeta_i^1) \omega_i^1 &= \frac{(c-a)^2}{4} \sum_{i=1}^{N_2+1} \tilde{\Phi}_2(\zeta_i^2, e) \tilde{\Psi}(\zeta_i^2) \omega_i^2 \\ &+ \frac{(b-c)}{2} \sum_{i=1}^{N_3+1} \tilde{\Phi}_3(\xi_i^3, e) \tilde{\Psi}(\xi_i^3) (\xi_i^3 - a) \rho_i^3, \end{aligned} \quad (5.3.1)$$

ζ_i^1 resp ζ_i^2 sont les noeuds associés aux polynômes de degré N_1 resp N_2 pour le segment $[a, b]$.

d'où

$$\sum_{i=2}^{N_1} \bar{v}_1(\zeta_i^1, e) \bar{\Psi}(\zeta_i^1) \omega_i^1 = \left(\frac{c-a}{b-a} \right)^2 \sum_{i=1}^{N_2+1} \bar{\Phi}_2(\zeta_i^2, e) \bar{\Psi}(\zeta_i^2) \bar{\omega}_i^2 + \frac{2(b-c)}{(b-a)^2} \sum_{i=0}^{N_3} \bar{\Phi}_3(\xi_i^3, e) \bar{\Psi}(\xi_i^3) (\xi_i^3 - a) \bar{\rho}_i^3, \quad (5.3.2)$$

où

$$\bar{\omega}_i^2 = \omega_i^2 \text{ si } 2 \leq i \leq N_2 + 1 \quad \text{et} \quad \bar{\omega}_1^2 = \omega_1^2 - \left(\frac{b-a}{c-a} \right)^2 \omega_1^1 \\ \bar{\rho}_i^3 = \rho_i^3 \text{ si } 0 \leq i \leq N_3 - 1 \quad \text{et} \quad \bar{\rho}_{N_3}^3 = \rho_{N_3}^3 - \frac{(b-a)}{2(b-c)} \omega_{N_1+1}^1.$$

On écrit (5.3.2) avec la fonction de base l_j^{2, N_1-2} définie par $l_j^{2, N_1-2}(\zeta_i^1) = \delta_{ij}$, $j \in \{2, \dots, N_1\}$. On a $\bar{v}_1(\zeta_i^1, e) = \bar{v}_1^{i N_1}$, et on a

$$\sum_{i=2}^{N_1} \bar{v}_1(\zeta_i^1, e) \bar{\Psi}(\zeta_i^1) \omega_i^1 = \bar{v}_1^{j N_1} \omega_j = \sum_{i=2}^{N_1} B_{ji} \bar{v}_1(\zeta_i^1, e) \\ \text{avec } j \in \{2, \dots, N_1\}.$$

avec

$$B_{ji} = \delta_{ij} \omega_i.$$

On a aussi

$$\sum_{i=2}^{N_1} \bar{v}_1(\zeta_i^1, e) \bar{\Psi}(\zeta_i^1) \omega_i^1 = \left(\frac{c-a}{b-a} \right)^2 \sum_{i=1}^{N_2+1} \bar{\Phi}_2(\zeta_i^2, e) \bar{\Psi}(\zeta_i^2) \bar{\omega}_i^2 + \frac{2(b-c)}{(b-a)^2} \sum_{i=0}^{N_3} \bar{\Phi}_3(\xi_i^3, e) \bar{\Psi}(\xi_i^3) (\xi_i^3 - a) \bar{\rho}_i^3, \quad (5.3.3)$$

Ensuite, on note $\bar{\Phi}_2(\zeta_i^2, e) = \bar{\Phi}^{2i}$ et $\bar{\Phi}_3(\xi_i^3, e) = \bar{\Phi}^{3i}$. On conclut alors que $P_j = \begin{pmatrix} P_j^2 & P_j^3 \end{pmatrix}$, $2 \leq j \leq N_1$, avec

$$\begin{cases} P_j^2 = \left(\frac{c-a}{b-a} \right)^2 l_j^{2, N_1-2}(\zeta_i^2) \bar{\omega}_i^2 \\ P_j^3 = \frac{2(b-c)}{(b-a)^2} l_j^{2, N_1-2}(\xi_i^3) (\xi_i^3 - a) \bar{\rho}_i^3. \end{cases}$$

On peut déduire alors que $B\bar{v} = P\bar{\Phi}$ où $\bar{\Phi} = \begin{pmatrix} \bar{\Phi}^2 \\ \bar{\Phi}^3 \end{pmatrix}$, et puisque B est diagonale non nulle, alors on peut écrire $\bar{v}_1 = B^{-1}P\bar{\Phi}$. En posant $\bar{Q} = B^{-1}P$ on a finalement :

$$\begin{pmatrix} \bar{v}_1^{ij} \text{ intérieurs} \\ \bar{v}_1 \text{ extérieurs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & \bar{Q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{v}_1^{ij} \text{ intérieurs} \\ \bar{\Phi} \end{pmatrix}$$

La Matrice du problème s'écrit alors

$$Q^T A_1 Q = Q^T F_1.$$

[Polynômes associés aux joints] Polynômes associés à la matrice de raccord

5.3.1 Polynôme $l_j^{2,N-2}$

Soit $l_j^{2,N-2} \in \mathbb{P}_{N-2}(\Omega)$ le polynôme de Lagrange associés aux zéros de M'_N . Dans la proposition suivante on va écrire $l_j^{2,N-2}$ explicitement :

Proposition 5.3.1 Soit $l_j^{2,N-2}$ les polynômes de Lagrange associés aux zéros de M'_N . On a

$$l_j^{2,N-2}(\zeta) = -\frac{(1-\zeta_j^2)M'_N(\zeta)}{N(N+2)M_N(\zeta_j)(\zeta-\zeta_j)} \text{ si } \zeta \neq \zeta_j \text{ et 1 sinon.}$$

Preuve Si $2 \leq j \leq N$, on écrit $l_j^{2,N-2}$ de la forme suivante :

$$l_j^{2,N-2}(\zeta) = \alpha \frac{M'_N(\zeta)}{(\zeta - \zeta_j)}.$$

Si $\zeta \rightarrow \zeta_j$, on a

$$l_j^{2,N-2}(\zeta_j) = 1 = \alpha \lim_{\zeta \rightarrow \zeta_j} \frac{M'_N(\zeta)}{(\zeta - \zeta_j)}$$

Comme on a

$$\lim_{\zeta \rightarrow \zeta_j} \frac{M'_N(\zeta)}{(\zeta - \zeta_j)} = M''_N(\zeta_j)$$

et

$$M''_N(\zeta_j) = -\frac{N(N+2)M_N(\zeta_j)}{(1-\zeta_j^2)}, \quad 2 \leq j \leq N$$

on déduit que

$$\alpha = -\frac{(1-\zeta_j^2)}{N(N+2)M_N(\zeta_j)}$$

■

5.3.2 Polynôme l_j^{N-2}

Soit l_j^{N-2} les polynômes de Lagrange associés aux zéros de L'_N . Pour expliciter ce polynôme, on utilise la proposition suivante :

Proposition 5.3.2 Soit l_j^{N-2} le polynômes de Lagrange associés aux zéros de L'_N . Alors on a :

$$l_j^{N-2}(\xi) = -\frac{(1-\xi_j^2)L'_N(\xi)}{N(N+1)L_N(\xi_j)(\xi-\xi_j)} \text{ si } \xi \neq \xi_j \text{ et 1 sinon.} \quad (5.3.4)$$

Preuve Pour $2 \leq j \leq N$, on écrit l_j^{N-2} de la forme suivante :

$$l_j^{N-2}(\xi) = \alpha \frac{L'_N(\xi)}{(\xi - \xi_j)}$$

Si $\xi \rightarrow \xi_j$

$$l_j^{N-2}(\xi_j) = 1 = \alpha \lim_{\zeta \rightarrow \zeta_j} \frac{L'_N(\zeta)}{(\xi - \xi_j)}$$

or

$$\lim_{\zeta \rightarrow \zeta_j} \frac{L'_N(\zeta)}{(\zeta - \zeta_j)} = L''_N(\zeta_j)$$

et

$$L''_N(\zeta_j) = -\frac{N(N+1)L_N(\zeta_j)}{(1-\xi_j^2)} \quad 2 \leq j \leq N$$

d'où

$$\alpha = -\frac{(1-\xi_j^2)}{N(N+1)L_N(\xi_j)}.$$

On en déduit (5.3.4). ■

Bibliographie

- [1] **N. Abdellatif** — *Méthodes spectrales et d'éléments spectraux pour les équations de Navier-Stokes axisymétriques*, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris (1997).
- [2] **M. Abramowitz, I.A. Stegun** — *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications (1965).
- [3] **Y. Achdou, Yu.A. Kuznetsov** — *Algorithms for a non conforming domain decomposition method*, Rapport de l'école polytechnique (1994).
- [4] **Y. Achdou, O. Pironneau** — *A fast solver for Navier-Stokes equations in the laminar regime using mortar element method and boundary element method*, Rapport de l'école polytechnique, (1993).
- [5] **S. Agmon, A. Douglis, L. Nirenberg** — *Estimates near the boundary for solutions of elliptic partial differential equations satisfying general boundary conditions II*, Com. Pure Appl. Math. 17 (1964), 35-92.
- [6] **M. Amara, M.A Moussaoui** — *Approximation de coefficients de singularité*, C.R. Acad. Sciences Paris, 313, série 1 (1991), 335-338.
- [7] **O. Axelsson** — *Iterative Solution Methods*, Cambridge University Press (1994).
- [8] **M.Azaïez, C. Bernardi, M. Dauge, Y. Maday** — *Spectral Methods for Axisymmetric Domains*, "Series in Applied Mathematics". 3, GauthierVillars et North-Holland (1999).
- [9] **I. Babuška** — *The finite element method with Lagrangian multipliers*, Numer. Math. 20 (1973), 179-192.
- [10] **K. Bellalouna** — *Résolution d'E.D.P par la méthode spectrale sur un réseau de cylindres*, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI (2007).
- [11] **Z. Belhachmi** — *Méthodes d'éléments spectraux avec joints pour la résolution de problèmes d'ordre quatre*. Thèse de l'université Pierre et Marie Curie, Paris VI (1994).
- [12] **F. Ben Belgacem** — *The Mortar finite element method with lagrangian multiplier*, Numer. Math. 84 (1999), 173-197.
- [13] **F. Ben Belgacem** — *Discrétisation 3D non conformes par méthode de décomposition de domaine des éléments avec joints : analyse mathématique et mise en oeuvre pour le problème de Poisson*, Thèse de l'université Pierre et Marie Curie, Paris 6, (1993).

-
- [14] **Z. Belhachmi, C. Bernardi, S. Deparis** — *Weighted element operator and application to the finite element discretization of the axisymmetric Stokes problem*, Numer.Math. 105 (2006), 217–247.
- [15] **Z. Belhachmi, C. Bernardi, S. Deparis, F. Hecht** — *A truncated Fourier/finite element discretization of the Stokes equations in an axisymmetric domain*, Math. Models and Methods in Applied Sciences 16 (2006), 233–263.
- [16] **C. Bernardi, M. Dauge, M. Azaïez** — *Numerical Analysis and Spectral Methods in Axisymmetric Problems*. Laboratoire d'Analyse Numérique, Université Pierre et Marie Curie.
- [17] **C. Bernardi, M. Dauge, Y. Maday** — *Polynomials in Sobolev Spaces and Application to the Mortar Spectral Element Method*, in preparation.
- [18] **C. Bernardi, M. Dauge, Y. Maday** — *Polynomials in weighted Sobolev spaces : basics and trace liftings*, Internal Report 92039, Laboratoire d'Analyse Numérique, Université Pierre et Marie Curie, Paris (1992).
- [19] **C. Bernardi, N. Debit, Y. Maday** — *Couplage de méthodes spectrales et d'éléments finis : premiers résultats*, C.R. Acad. Sc. Paris 305 série 1 (1987), 353–356.
- [20] **C. Bernardi, Y. Maday, A.T. Patera** — *A new non conforming approach to domain decomposition : the mortar element method Non linear Partial Differential Equations and their Applications*, Collège de France Seminar XI, H. Brézis & J.-L. Lions eds (1992).
- [21] **C. Bernardi, Y. Maday, F. Rapetti** — *Discrétisations variationnelles de problèmes aux limites elliptiques*. Collection " Mathématiques et Applications 45, Springer-Verlag (2004).
- [22] **C. Bernardi, Y. Maday** — *Spectral Methods, Handbook of Numerical Analysis*, Vol. V, P.G Ciarlet and J.-L. Lions eds., Pitman (1994), 13–51.
- [23] **C. Bernardi, Y. Maday** — *Spectral Methods, Handbook of Numerical Analysis*, Vol. V, P.G. Ciarlet and J.L. Lions eds., North-Holland (1996), 209–485.
- [24] **C. Bernardi, Y. Maday** — *Polynomial approximation of some singular functions*, Applicable Analysis : an International Journal 42 (1991), 769–829.
- [25] **C. Bernardi, Y. Maday** — *Properties of some weighted Sobolev spaces, and application to spectral approximations*, SIAM J. Numer. Anal. 26 (1989), 769–829.
- [26] **S. Bertoluzza, S. Falletta, V. Perrier** — *The Mortar method in the wavelet context*, Model. Math. et Anal. Numer. 35 (2001), 647–673.
- [27] **C. Bernardi, Y. Maday, F. Rapetti** — *Basics and some applications of the mortar element method*, GAMM – Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik 28 (2005), 97–123.
- [28] **J. Boland, R. Nicolaides** — *Stability of finite elements under divergence constraints*, SIAM J. Numer. Anal. 20 (1983), 722–731.
- [29] **H. Brezis** — *Analyse fonctionnelle, Théorie et applications*, Masson, Paris (1983).
- [30] **F. Brezzi** — *On the existence, uniqueness and approximation of saddle-point problems arising from Lagrange multipliers*, R.A.I.R.O. Anal. Numer. 8 R2 (1974), 129–151.

-
- [31] N. Chorfi — *Traitement de singularités géométriques par méthode d'éléments spectraux avec joints*. Thèse de l'université Pierre et Marie Curie, Paris VI (1998).
- [32] P. Ciarlet — *The finite element method for elliptic problems*, North Holland (1978).
- [33] M. Costabel, M. Dauge — *Construction of corner singularities for Agmon-Douglis-Nirenberg elliptic Systems*, *Math. Nachr.* **162** (1993), 209–237.
- [34] N. Debit — *La méthode des éléments à joints dans le cas du couplage des méthodes spectrales et méthodes éléments finis : Résolution des équations de Navier-Stokes*, Thèse de l'université Pierre et Marie Curie, Paris 6 (1992).
- [35] V. Girault, P.-A. Raviart — *Finite Element Methods for the Navier-Stokes Equations, Theory and Algorithms*, Springer-Verlag (1986).
- [36] P. Grisvard — *Elliptic Problems in Nonsmooth Domains* (1985).
- [37] V. A. Kozlov, V.G. Maz'ya, C. Schwab — *On singularities of solutions of the Dirichlet problem of hydrodynamics near the vertex of a cône*, *J. Reine Angew. Math.* **456** (1994), 65–97.
- [38] J.-L. Lions, E. Magenes — *Problèmes aux limites non homogènes et applications*, Dunod (1968).
- [39] C.A. Mavriplis, Y. Maday, A.T. Patera — *Non conforming mortar element method : Application to spectral discretisations*, *Proceedings of the second international symposium on domain decomposition methods for P.D.E.*, SIAM, Philadelphia (1988).
- [40] G.J. Fix, G. Strang, — *An analysis of the finite element*, Prentice-Hall Engelwood, New Jersey (1973).
- [41] R. Temam — *Theory and Numerical Analysis of the Navier-Stokes Equations*, North-Holland (1977).

**More
Books!** 

yes
I want morebooks!

Oui, je veux morebooks!

Buy your books fast and straightforward online - at one of the world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at

www.get-morebooks.com

Achetez vos livres en ligne, vite et bien, sur l'une des librairies en ligne les plus performantes au monde!

En protégeant nos ressources et notre environnement grâce à l'impression à la demande.

La librairie en ligne pour acheter plus vite

www.morebooks.fr

OmniScriptum Marketing DEU GmbH
Bahnhofstr. 28
D - 66111 Saarbrücken
Telefax: +49 681 93 81 567-9

info@omniscrptum.com
www.omniscrptum.com

OMNIScriptum 

