

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة فرحات عباس – سطيف 1
Université Ferhat Abbas, Sétif 1

Thèse

Présentée à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision
Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Ecole Doctorale des Technologies et Des Applications Spatiales
Option : Optique Spatiale et Mécanique de Précision

Par

Mahdi RAHMANI

Thème

**Etude des principes d'acquisition et de traitement des images optiques pour
l'observation spatiale**

Soutenue, le 28/06/2025

Devant le jury composé de :

Bouزيد BELLOUI	Professeur	UFAS1	Président
Mohamed BOUAFIA	Professeur	UFAS1	Rapporteur
Belkacem BAKHOUCHE	Professeur	UFAS1	Examinateur
Assia GUESSOUM	MCA	USTHB	Examinateur
Sofiane HADDADI	MRA	UROP/CDTA	Examinateur

Dédicaces

A mes défunts parents Daoudi et Afifa

A ma mère Fouzia

A mon épouse Nour El Houda

A mes enfants Abderrahmène et Abdallah

A mes frères et ma sœur

A tous ceux qui me sont chers

Je dédie cette modeste thèse.

Remerciements

Je rends grâce à Allah, le tout puissant, le miséricordieux, qui m'a donné force et volonté et m'a guidé vers le droit chemin.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon Directeur de thèse, Prof. Mohamed Bouafia qui a su, par sa modestie, sa simplicité, l'étendue de sa science et ses conseils avisés, me mettre dans les meilleures dispositions afin de mener à bien ce travail. Je lui suis reconnaissant pour sa disponibilité et ses efforts continus, même après son départ à la retraite.

Les travaux de cette thèse ont été réalisés au sein du Laboratoire d'Optique Appliquée de l'Université Ferhat Abbas, Sétif 1, ainsi qu'à l'Unité de Recherche en Optique et Photonique et l'Unité de Recherche en Nanosciences et Nanotechnologies du Centre de Développement des Technologies Avancées dont je remercie tous les personnels et plus particulièrement Mr. Adib Nidhal Chettouh.

Mes remerciements vont aussi vers les membres du jury qui me font l'honneur d'accepter de donner de leur temps et de leur énergie pour expertiser ce modeste travail. Ainsi, je remercie Mr. Bouzid BELLOUI, professeur à l'UFAS pour avoir accepté de présider mon jury de soutenance. Également, je remercie les examinateurs : Mr. Belkacem BAKHOUCHE, professeur à l'UFAS, Mme. Assia Guessoum, Maître de Conférences A à l'USTHB, et Mr. Sofiane HADDADI, Maître de Recherche A à l'UROP/CDTA.

Cette thèse est le couronnement d'un long parcours scolaire et universitaire durant lequel j'ai été à plusieurs établissements dont je remercie tous les personnels avec une mention spéciale pour tous mes enseignants, de la maternelle, du primaire, du moyen, du secondaire et du supérieur.

Je remercie ma chère mère Fouzia, ma chère épouse Nour EL Houda, mes chers enfants Abderrahmène et Abdallah qui m'ont entouré d'affection durant les travaux de cette thèse et ont su par leur indulgence excuser mes absences prolongées.

Ma sœur Sarra, mes frères Mejdi, Ahmed et Yacine, je vous remercie. Mes oncles, mes tantes, toute ma famille et ma belle-famille, Merci.

Je remercie, aussi, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Table des matières	iii
Listes des figures.....	vi
Liste des tableaux	xiii
Liste des acronymes	xiv
Liste des publications	xv
Introduction générale.....	1
1. Contexte et fondamentaux de l'observation spatiale	5
1.1 Introduction	5
1.2 Résolution et sensibilité d'un télescope.....	5
1.2.1 Résolution d'un télescope	5
1.2.2 Sensibilité d'un télescope.....	6
1.2.3 Importance et problématique de l'ouverture	7
1.3 Architectures classiques des miroirs légers	7
1.3.1 Les miroirs contoured-back.....	8
1.3.2 Les miroirs à cœurs cellulaires en nid d'abeille	9
1.3.3 Les miroirs segmentés	12
1.4 Nouvelles architectures de miroirs légers à cœurs cellulaires	14
1.4.1 Les miroirs à cœurs cellulaires de type « Voronoi »	14
1.4.2 Les miroirs à cœurs cellulaires de type « truss lattice »	14
1.4.3 Les miroirs à cœurs cellulaires arborescents (tree-like).....	15
1.5 Comportement des miroirs légers des télescopes spatiaux face aux sollicitations mécaniques de l'environnement orbital	15
1.6 Evaluation des performances de miroirs légers des télescopes spatiaux sous l'effet des sollicitations mécaniques environnementales	16
1.6.1 Microgravité	16
1.6.2 Vibrations du lanceur	16
1.7 Conclusion.....	16
2. Amélioration des performances d'un miroir léger à cœur en nid d'abeille.....	18
2.1 Introduction	18

2.2	Conception et évaluation du miroir de référence.....	19
2.2.1	Conception du miroir de référence.....	19
2.2.2	Analyse du miroir de référence	20
2.2.2.1	Cas de chargement 1	20
2.2.2.2	Cas de chargement 2	21
2.2.2.3	Cas de chargement 3	22
2.2.2.4	Analyse de convergence du maillage.....	22
2.2.3	Résultats et discussions	23
2.3	Conception et évaluation des miroirs avec renforcements locaux	26
2.3.1	Conception du miroir RL1	26
2.3.2	Conception du miroir RL2	27
2.3.3	Conception du miroir RL3	28
2.3.4	Analyse des miroirs RL.....	29
2.3.5	Résultats et discussions	30
2.4	Conclusion	34
3.	Investigations sur l'emploi de cœurs en nid d'abeille hiérarchiques.....	35
3.1	Introduction	35
3.2	Conception des miroirs légers à cœurs en nid d'abeille classiques et hiérarchiques. 36	
3.2.1	Les miroirs à cœurs en nids d'abeille classiques.....	36
3.2.2	Les miroirs à cœurs en nids d'abeille hiérarchiques	37
3.2.2.1	Hiérarchie à motif hexa-chiral	37
3.2.2.2	Hiérarchie à motif en toile d'araignée.....	39
3.2.2.3	Hiérarchie à motif de losanges.....	39
3.2.2.4	Hiérarchie à motif triangulaire.....	40
3.3	Analyse des miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques et hiérarchiques par MEF . 42	
3.3.1	Cas de chargement 1 : gravité axiale.....	42
3.3.2	Cas de chargement 2 : gravité latérale	42
3.3.3	Cas de chargement 3 : analyse modale.....	43
3.3.4	Cas de chargement 4 : pression de polissage	43
3.3.5	Analyses de convergence du maillage.....	44
3.4	Résultats et discussions	47
3.4.1	Miroirs NA	51
3.4.2	Miroirs NAHC.....	54
3.4.3	Miroirs NATA.....	58
3.4.4	Miroirs NAL.....	61

3.4.5	Miroirs NAT.....	63
3.4.6	Comparaison des performances des différents types de miroirs	66
3.5	Conclusion.....	69
4.	Nouvelles configurations de cœurs pour les miroirs légers des télescopes embarqués	71
4.1	Introduction	71
4.2	Conception des miroirs à cœurs EMC	71
4.2.1	Les cœurs EMC uni-axiaux.....	72
4.2.1.1	Cœur EMC uni-axial bidirectionnel.....	73
4.2.1.2	Cœur EMC uni-axial tri-directionnel.....	74
4.2.1.3	Cœur EMC uni-axial quadri-directionnel	75
4.2.1.4	Cœur EMC uni-axial hexa-directionnel.....	76
4.2.2	Les cœurs EMC bi-axiaux.....	77
4.2.2.1	Cœur EMC bi-axial quadri-directionnel	77
4.2.2.2	Cœur EMC bi-axial hexa-directionnel.....	78
4.2.3	Les miroirs à cœurs EMC.....	79
4.3	Analyse des miroirs à cœurs EMC	80
4.3.1	Cas de chargement 1 : gravité axiale.....	80
4.3.2	Cas de chargement 2 : gravité latérale	80
4.3.3	Cas de chargement 3 : analyse modale.....	81
4.3.4	Cas de chargement 4 : pression de polissage	81
4.3.5	Analyses de convergence du maillage.....	82
4.4	Résultats et discussions	83
4.5	Conclusion.....	91
	Conclusion générale et perspectives	93
	Bibliographie.....	97

Listes des figures

Figure 1.1. Illustration de la résolution angulaire	6
Figure 1.2. Illustrations de la tâche d’Airy ou PSF produite par un télescope à la limite de diffraction, (a) distribution radiale d’intensité en 3D, (b) image de la PSF, et (c) distribution radiale d’intensité en 2D [2]......	6
Figure 1.3. Vue en coupe d’un miroir de télescope de base non allégé.	8
Figure 1.4. Vues en coupe des différentes architectures des miroirs légers de type contoured-back, (a) le miroir de base, (b) miroir dépouillé, (c) miroir ménisque avec des rayons de courbure égaux, (d) miroir ménisque avec le rayon de courbure de la surface arrière inférieur à celui de la surface avant, (e) miroir simple-arc, et (f) miroir double-arc.	8
Figure 1.5. Illustrations d’un miroir à cœur cellulaire en nid d’abeille, (a) vue éclatée montrant tous les constituants, et (b) vue en coupe.	9
Figure 1.6. Les géométries usuelles des cellules des cœurs en nid d’abeille, (a) hexagonales, (b) triangulaires, (c) carrées, et (d) circulaires.	10
Figure 1.7. Types des miroirs légers à cœur cellulaire en nid d’abeille selon que le cœur soit ou pas entouré d’anneaux, (a) avec anneaux extérieur et intérieur, et (b) sans anneaux.	10
Figure 1.8. types de miroirs légers à cœurs cellulaires en nid d’abeille selon l’existence et la nature de la plaque arrière, (a) sandwich, (b) semi open-back, et (c) open-back.....	11
Figure 1.9. Types de miroirs légers à cœurs cellulaires en nid d’abeille selon la configuration de la plaque avant, (a) plaque avant en forme de ménisque, (b) plaque avant plan-concave. .	11
Figure 1.10. Photographie du miroir primaire du télescope spatial HST pendant sa réalisation.	12
Figure 1.11. Illustrations de deux types de miroirs segmentés, (a) segments en pétales, et (b) segments hexagonaux.....	13
Figure 1.12. Illustrations du télescope spatial JWST [52].	13
Figure 1.13. Illustration du télescope spatial LUVOIR [55].	14
Figure 1.14. Photographie d’un miroir léger à cœur cellulaire de type Voronoi [43].	14
Figure 1.15. Illustration d’un miroir léger à cœur cellulaire de type truss lattice [18].	15
Figure 1.16. Photographie d’un miroir léger à cœur cellulaire arborescent [64].	15
Figure 2.1. Différentes vues illustrant l’architecture du miroir de référence, (a) vue isométrique avec la moitié de la face avant ôtée afin de laisser apparaître le cœur, (b) vue en coupe avec dimensions, (c) vue de dessous avec des dimensions, et (d) vue de détail avec des dimensions.	19

Figure 2.2. Illustration de la configuration de montage.	20
Figure 2.3. Illustrations des modèles MEF des différents cas de chargement, (a) cas de chargement 1, (b) cas de chargement 2, et (c) le modèle discrétisé.	22
Figure 2.4. Courbe de convergence du maillage pour le miroir de référence.	23
Figure 2.5. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique du miroir de référence après soustraction des MCR, (a) sous l'effet de la gravité axiale, et (b) sous l'effet de la gravité latérale.	24
Figure 2.6. Distribution des déplacements nodaux sur une ligne reliant la zone centrale à la zone périphérique, (a) représentation de la ligne sur la surface optique du miroir, (b) sous l'effet de la gravité axiale, et (c) sous l'effet de la gravité latérale.	26
Figure 2.7. Illustration du cœur du miroir RL1.	27
Figure 2.8. Illustration du cœur du miroir RL2 avec la distribution spatiale des tailles de cellules.	28
Figure 2.9. Illustrations du cœur du miroir RL3, (a) distribution spatiale de l'épaisseur des raidisseurs supplémentaires, (b) vue du cœur.	29
Figure 2.10. Courbe de convergence du maillage pour les différents miroirs RL, (a) RL1, (b) RL2, et (c) RL3.	30
Figure 2.11. Graphiques à barres des indicateurs de performances calculés pour tous les miroirs RL et le miroir de référence, (a) PV_Z , (b) RMS_Z , (c) PV_Y , (d) RMS_Y , et (e) Fréquences naturelles.	31
Figure 2.12. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs RL sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) RL1, (b) RL2, et (c) RL3. ..	33
Figure 2.13. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs RL sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) RL1, (b) RL2, et (c) RL3.	33
Figure 3.1. Vue en coupe de l'architecture des miroirs conçus mettant en exergue les différents constituants.	36
Figure 3.2. Illustrations du cœur en nid d'abeille classique des miroirs NA, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NA-50 est pris pour exemple.	37
Figure 3.3. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NA à la même échelle, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30 et (d) NA-20.	37
Figure 3.4. Illustrations du cœur en nid d'abeille hiérarchique à motif hexa-chiral des miroirs NAHC, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NAHC-2 est pris pour exemple.	38

Figure 3.5. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NAHC à la même échelle, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5 et (d) NAHC-3.	38
Figure 3.6. Illustrations du cœur en nid d'abeille hiérarchique à motif en toile d'araignée des miroirs NATA, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NATA-2 est pris pour exemple.	39
Figure 3.7. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NATA à la même échelle, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5 et (d) NATA-3.	39
Figure 3.8. Illustrations du cœur en nid d'abeille hiérarchique à motif en losanges des miroirs NAL, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NAL-2 est pris pour exemple.	40
Figure 3.9. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NAL à la même échelle, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5 et (d) NAL-3.....	40
Figure 3.10. Illustrations du cœur en nid d'abeille hiérarchique à motif triangulaire des miroirs NAT, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NAT-2 est pris pour exemple.	41
Figure 3.11. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NAT à la même échelle, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5 et (d) NAT-3.....	41
Figure 3.12. Illustration des cas de chargement, (a) cas de chargement 1, (b) cas de chargement 2, (c) pression de polissage du cas de chargement 4, (d) condition aux limites du cas de chargement 4 (NATA-2 est pris pour l'exemple), et (e) un modèle discrétisé.	44
Figure 3.13. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NA, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30, et (d) NA-20.....	45
Figure 3.14. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NAHC, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5, et (d) NAHC-3.	45
Figure 3.15. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NATA, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5, et (d) NATA-3.....	45
Figure 3.16. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NAL, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5, et (d) NAL-3.....	46
Figure 3.17. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NAT, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5, et (d) NAT-3.....	46
Figure 3.18. Graphiques à barres des indicateurs de performances calculés pour tous les miroirs, (a) PV_Z , (b) RMS_Z , (c) PV_Y , (d) RMS_Y , (e) Fréquences naturelles, et (f) U_{max}	48

Figure 3.19. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NA sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30, et (d) NA-20.	52
Figure 3.20. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NA sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30, et (d) NA-20.	53
Figure 3.21. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NA sous l'effet de la pression de polissage, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30, et (d) NA-20.....	54
Figure 3.22. Illustration de la SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NA.	54
Figure 3.23. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAHC sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5, et (d) NAHC-3.....	56
Figure 3.24. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAHC sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5, et (d) NAHC-3.	56
Figure 3.25. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAHC sous l'effet de la pression de polissage, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5, et (d) NAHC-3.....	57
Figure 3.26. Illustration des SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NAHC.....	57
Figure 3.27. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NATA sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5, et (d) NATA-3.	59
Figure 3.28. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NATA sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5, et (d) NATA-3.	59
Figure 3.29. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NATA sous l'effet de la pression de polissage, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5, et (d) NATA-3.....	60
Figure 3.30. Illustration des SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NATA.	60
Figure 3.31. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAL sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5, et (d) NAL-3.	62

Figure 3.32. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAL sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5, et (d) NAL-3.....	62
Figure 3.33. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAL sous l'effet de la pression de polissage, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5, et (d) NAL-3.	63
Figure 3.34. Illustration de la SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NATA.....	63
Figure 3.35. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAT sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5, et (d) NAT-3.	65
Figure 3.36. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAT sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5, et (d) NAT-3.....	65
Figure 3.37. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAT sous l'effet de la pression de polissage, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5, et (d) NAT-3.	66
Figure 3.38. Illustration des SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NAT.....	66
Figure 4.1. Architecture de base des miroirs conçus avec ses différents constituants et dimensions.....	72
Figure 4.2. Illustration de la plaque ondulée annulaire de base avec ses paramètres géométriques.	72
Figure 4.3. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC uni-axial bidirectionnel, (a) plaque ondulée de base ($\alpha_0 = 0^\circ$), (b) deuxième plaque ondulée ($\alpha_1 = 90^\circ$), (c) résultat de la superposition et la combinaison des deux plaques, (d) suppression des deux peaux, (e) cœur résultant, (f) vue de dessus d'un quart du cœur, (g) vue de dessous d'un quart du cœur, et (h) vue en coupe du cœur.....	74
Figure 4.4. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC uni-axial tri-directionnel, (a) plaque ondulée de base ($\alpha_0 = 0^\circ$), (b) deuxième plaque ondulée ($\alpha_1 = 60^\circ$), (c) troisième plaque ondulée ($\alpha_2 = 120^\circ$), (d) résultat de la superposition et la combinaison des trois plaques, (e) suppression des deux peaux, (f) cœur résultant, (g) vue de dessus d'un quart du cœur, (h) vue de dessous d'un quart du cœur, et (i) vue en coupe du cœur.	75
Figure 4.5. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC uni-axial quadri-directionnel, (a) plaque ondulée de base ($\alpha_0 = 0^\circ$), (b) deuxième plaque ondulée ($\alpha_1 = 45^\circ$), (c) troisième plaque ondulée ($\alpha_2 = 90^\circ$), (d) quatrième plaque ondulée ($\alpha_3 = 135^\circ$), (e) résultat de	

la superposition et la combinaison des quatre plaques, (f) suppression des deux peaux, (g) cœur résultant, (h) vue de dessus d'un quart du cœur, (i) vue de dessous d'un quart du cœur, et (j) vue en coupe du cœur.....	76
Figure 4.6. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC uni-axial hexa-directionnel, (a) plaque ondulée de base ($\alpha_0 = 0^\circ$), (b) deuxième plaque ondulée ($\alpha_1 = 30^\circ$), (c) troisième plaque ondulée ($\alpha_2 = 60^\circ$), (d) quatrième plaque ondulée ($\alpha_3 = 90^\circ$), (e) cinquième plaque ondulée ($\alpha_4 = 120^\circ$), (f) sixième plaque ondulée ($\alpha_5 = 150^\circ$), (g) résultat de la superposition et la combinaison des six plaques, (h) suppression des deux peaux, (i) cœur résultant, (j) vue de dessus d'un quart du cœur, (k) vue de dessous d'un quart du cœur, et (l) vue en coupe du cœur.	77
Figure 4.7. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC bi-axial quadri-directionnel, (a) cœur EMC uni-axial bidirectionnel, (b) deuxième cœur EMC uni-axial bidirectionnel renversé, (c) cœur résultant de la superposition et la combinaison des deux cœurs, (d) vue de dessus d'un quart du cœur, (e) vue en coupe du cœur.	78
Figure 4.8. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC bi-axial hexa-directionnel, (a) cœur EMC uni-axial tri-directionnel, (b) deuxième cœur EMC uni-axial tri-directionnel renversé, (c) cœur résultant de la superposition et la combinaison des deux cœurs, (d) vue de dessus d'un quart du cœur, (e) vue en coupe du cœur.	79
Figure 4.9. Illustration des cas de chargement, (a) cas de chargement 1, (b) cas de chargement 2, (c) pression de polissage du cas de chargement 4, (d) condition aux limites du cas de chargement 4 (avec U2 pris pour l'exemple), et (e) un modèle discrétisé.	82
Figure 4.10. Courbes de convergence du maillage pour tous les miroirs à cœurs EMC conçus, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.	83
Figure 4.11. Graphiques à barres des indicateurs de performances calculés pour tous les miroirs à cœurs EMC, (a) PV_Z , (b) RMS_Z , (c) PV_Y , (d) RMS_Y , (e) Fréquences naturelles, et (f) U_{max}	84
Figure 4.12. Illustrations des cellules enchâssées au sein des différents cœurs des miroirs à cœurs EMC avec l'emphase mise sur la LEC, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.	87
Figure 4.13. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs à cœurs EMC sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.	89

Figure 4.14. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs à cœurs EMC sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.....	90
Figure 4.15. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs à cœurs EMC sous l'effet de la pression de polissage, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.	91

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Données de l'analyse de convergence du miroir de référence.	23
Tableau 2.2 Les différentes tailles de cellules du cœur du miroir LR2.....	27
Tableau 2.3. Les différentes épaisseurs des raidisseurs supplémentaires.	28
Tableau 2.4. Nombres d'éléments et de nœuds du maillage à la convergence pour les miroirs RL.	30
Tableau 2.5. Indicateurs de performances des miroirs RL et du miroir de référence.	30
Tableau 3.1. Paramètres géométriques et masses des miroirs conçus.....	41
Tableau 3.2. Nombres d'éléments et de nœuds du maillage à la convergence pour tous les miroirs conçus.	46
Tableau 3.3. Indicateurs de performances calculés pour les différents miroirs conçus.	47
Tableau 3.4. Aires des SSP pour les miroirs NA.	54
Tableau 3.5. Aires des SSP pour les miroirs NAHC.....	57
Tableau 3.6. Aires des SSP pour les miroirs NATA.	60
Tableau 3.7. Aires des SSP pour les miroirs NAL.....	63
Tableau 3.8. Aires des SSP pour les miroirs NAT.....	66
Tableau 4.1. Nombres de plaques constituant, incréments angulaires et directions d'ondulations des plaques constituant pour tous les cœurs EMC uni-axiaux conçus.....	73
Tableau 4.2. Paramètres géométriques et masses de tous les miroirs à cœurs EMC conçus. ..	80
Tableau 4.3. Nombres d'éléments et de nœuds du maillage à la convergence pour tous les miroirs à cœurs EMC conçus.	83
Tableau 4.4. Indicateurs de performances calculés pour les différents miroirs à cœurs EMC conçus.....	84
Tableau 4.5. Nombre total de cellules et volume et nombre d'occurrences de la LEC pour tous les miroirs à cœurs EMC conçus.....	87

Liste des acronymes

A

Abrasive Water Jet Cutting
AWJC, 18, 36

C

Computer Numerical Control
CNC, 18, 36

Conception Assistée par Ordinateur
CAO, 35

E

Entangled Multidirectional Corrugated
EMC, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84,
85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 95

H

Hubble Space Telescope
HST, 11, 12, 13

J

James Webb Space Telescope
JWST, 13

L

Large UV/Optical/Infrared Surveyor
LUVOIR, 13

Largest Enclosed Cell
LEC, 87, 88, 90

M

Méthode des Elements Finis
MEF, 5, 16, 18, 20, 22, 23, 29, 30, 35, 42, 69, 71, 80,
83, 92, 93, 94, 95

Mouvements de Corps Rigides

MCR, 16, 21, 22, 24, 32, 33, 42, 43, 52, 53, 55, 56, 59,
62, 64, 65, 80, 88, 89, 90, 95

N

National Aeronotics and Space Administration
NASA, 13

Nid d'Abeille
NA, 37, 41, 44, 45, 46, 47, 51, 52, 53, 54, 55, 59, 66,
67, 68, 91, 92

Nid d'Abeille hiérarchique à motif de Losanges
NAL, 40, 42, 44, 46, 47, 48, 61, 62, 63, 67, 68

Nid d'Abeille hiérarchique à motif en Toile d'Araignée
NATA, 39, 41, 42, 44, 45, 47, 58, 59, 60, 63, 66, 67, 68

Nid d'Abeille hiérarchique à motif Hexa-Chiral
NAHC, 38, 41, 44, 45, 46, 47, 54, 55, 56, 57, 59, 60,
66, 67, 68

Nid d'Abeille hiérarchique à motif Triangulaire
NAT, 40, 41, 42, 44, 46, 47, 48, 63, 64, 65, 66, 67, 68

P

Peak-to-Valley
PV, 16, 21, 24, 42, 43, 69, 70, 71, 80, 85, 93, 94, 95

R

Root Mean Square
RMS, 16, 21, 24, 42, 43, 69, 70, 71, 80, 85, 93, 94, 95

S

Surface Supportée Projetée
SSP, 53, 54, 57, 60, 62, 63, 65, 66

Liste des publications

1. M. Rahmani and M. Bouafia, "Design and performance evaluation of lightweight mirror blanks for space-based telescopes based on various hierarchical honeycomb cores," J. Opt. (2025).
2. M. Rahmani and M. Bouafia, "Entangled multidirectional corrugated core lightweight mirror designs for space-based telescopes," Appl. Opt. **64**, 127–136 (2025).

Introduction générale

L'astronomie et l'astrophysique sont des disciplines scientifiques basées sur l'observation à distance des phénomènes cosmiques et des objets stellaires lointains de l'univers. Pendant longtemps, elles se sont contentées des observations à l'œil nu, limitant leur champ d'investigation. L'avènement des télescopes a ouvert de nouvelles perspectives encore insoupçonnées. Fortes de l'apport de ces instruments, l'astronomie et l'astrophysique ont élargi leur spectre d'intérêt à des objets stellaires de plus en plus lointains et à des phénomènes cosmiques remontant à des périodes de plus en plus lointaines dans le temps. Avec les enjeux grandissants, et le développement technologique, les télescopes n'ont cessé de grandir posant de plus en plus de problématiques de conception et de fabrication.

En effet, afin qu'un télescope puisse apercevoir un objet très lointain dont le flux lumineux parcourt de très longues distances en s'atténuant au fur et à mesure, il faudrait qu'il puisse en collecter le maximum, celui-ci étant déjà très faible. De même, afin de pouvoir sonder des phénomènes cosmiques très anciens tels que le Big Bang, dont le flux lumineux, parcourant l'univers depuis des millions voire des milliards d'années, s'atténuant au fur et à mesure, est d'autant plus faible que le télescope doit en collecter chaque photon disponible. Afin qu'un télescope puisse former des images aussi nettes que possible de ces objets et autres phénomènes, pour qu'on puisse discerner leur détails les plus fins, l'instrument doit disposer d'une résolution angulaire importante.

Or, pour remplir ces deux conditions, à savoir la collecte d'un maximum de flux lumineux et la haute résolution angulaire, le télescope doit avoir une grande ouverture. En effet, plus l'ouverture est grande, plus un télescope est sensible et peut collecter plus de flux lumineux. Mais aussi, plus cette ouverture est grande, meilleure est la résolution offerte par l'instrument.

De ces raisons est née une course acharnée vers le gigantisme des télescopes. Or, une grande ouverture implique un miroir primaire de grand diamètre. C'est ainsi que les miroirs primaires n'ont eu de cesse de grandir entraînant de plus en plus de challenges. En effet, les limitations technologiques pour leur production n'ont eu de cesse d'être repoussées. Mais encore, la masse conséquente de ces mastodontes implique l'utilisation de montures de plus en plus conséquentes et des mécanismes de pointage et de poursuite énergivores dans des endroits isolés, qui bien que propices à l'observation spatiale, posent des problèmes d'accessibilité et d'acheminement du matériel et de l'énergie.

De plus, afin qu'un miroir puisse remplir à bien sa fonction d'imagerie, il faut qu'il puisse maintenir une surface optique inaffectée par les perturbations environnementales. Des technologies de fabrication, des matériaux performants et des architectures innovantes ont été mis au point pour alléger les miroirs primaires et permettre l'avancement de l'astronomie et l'astrophysique. Toutefois, ces architectures, bien que permettant cet allègement, affectent négativement la rigidité des miroirs et leur capacité à maintenir une surface optique inchangée face aux différentes sollicitations. Des efforts perpétuels ont été et continuent à être consentis pour trouver, encore et toujours, le compromis optimal entre la taille, la masse et la rigidité des miroirs primaires.

Longtemps cantonnés au sol, les télescopes y souffrent des effets néfastes de l'atmosphère terrestre tels que la turbulence atmosphérique qui déforme le front d'onde de la lumière la traversant causant des pertes en résolution, la pollution, les lumières parasites des agglomérations urbaines, et l'absorption de la lumière par les molécules de l'atmosphère rendant inenvisageables les observations astronomiques dans certaines portions du spectre électromagnétique.

Avec l'avènement de la conquête spatiale, des télescopes ont été mis en orbite pour les affranchir des limitations inhérentes à l'atmosphère terrestre. Cependant, ces télescopes restent assujettis à la nécessité d'avoir de grandes ouvertures. Or, leurs miroirs primaires, contrairement à ceux de leurs homologues terrestres -limités principalement par la technologie et le coût-, sont sujets à davantage de limitations relatives aux véhicules de lancement qui les acheminent jusqu'en orbite. En effet, ces véhicules sont limités en termes de capacité de transport tant en masse qu'en volume, ce qui implique davantage d'efforts d'allègement.

En plus de ces limitations, les miroirs primaires des télescopes spatiaux opèrent dans un environnement orbital très rude avec des sollicitations thermiques, mécaniques et autres, beaucoup plus sévère que sur terre. Pour y faire face, ils ont besoin d'une grande rigidité.

Ainsi, parmi les architectures employées pour résoudre ces problématiques, on cite, les miroirs à cœurs cellulaires en nid d'abeille, les miroirs de type contoured-back et les miroirs segmentés. Ces architectures ont permis un avancement considérable des télescopes tant terrestres que spatiaux. Toutefois pour aller encore plus loin, de nouvelles architectures alliant légèreté et rigidité doivent être mises au point.

Dans cette thèse, nous étudions le design des miroirs légers des télescopes spatiaux. Nous nous intéressons plus particulièrement à leurs architectures et à l'amélioration du compromis entre

la masse et les performances optomécaniques. Dans cette optique, nous proposons différentes architectures innovantes et inédites permettant une amélioration des performances optomécaniques pour un poids équivalent par rapport aux architectures à cœurs en nid d'abeille classiques.

Cette thèse s'articule autour du plan suivant :

Le premier chapitre présente le contexte de cette étude. Nous y abordons en premier, la résolution et la sensibilité des télescopes, et y montrons comment celles-ci dépendent de l'ouverture et donc du diamètre des miroirs primaires pour poser la problématique de leur allègement et les conséquences qu'il entraîne sur leurs performances optomécaniques. Nous y survolons, ensuite, les architectures de miroirs légers qui ont permis jusqu'ici à la discipline d'avancer ainsi que les nouvelles tendances y afférent. Nous discutons aussi les différentes sollicitations mécaniques de l'environnement orbital et la manière dont elles affectent leurs performances, ainsi que les pratiques courantes de prédiction des performances opérationnelles en phase de conception.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons différentes approches de renforcements locaux d'un miroir à cœur en nid d'abeille basées sur la configuration de montage pour en améliorer les performances optomécaniques. Pour ce faire, nous avons conçu un miroir léger à cœur en nid d'abeille, ensuite, nous l'avons analysé afin d'en révéler les vulnérabilités et d'identifier les performances à améliorer, pour tenter d'y remédier en renforçant les zones vulnérables identifiées. C'est ainsi que nous avons mis au point diverses conceptions en gardant à l'esprit le fait que celles-ci doivent pouvoir être fabriquées en utilisant les mêmes procédés utilisés pour les miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques, et qu'elle ne doivent engendrer aucune complexité ni challenge technologies supplémentaires. Elles doivent aussi garder des masses égales à celle de la conception initiale. Les approches d'optimisation proposées ont permis des améliorations de performances allant jusqu' à 22.07 % simplement par l'ajout de matière au cœur au niveau des zones vulnérables.

Le troisième chapitre explore l'emploi des cœurs en nid d'abeille hiérarchiques pour la conception des miroirs légers des télescopes spatiaux et la manière dont ils pourraient en améliorer les performances par rapport aux architectures à cœurs en nid d'abeille classiques. Ces cœurs sont dérivés des cœurs en nid d'abeille classiques mais incorporent des structures hiérarchiques spécifiques au sein des cellules du nid d'abeille afin de leur prodiguer davantage de rigidité. C'est ainsi que plusieurs séries de miroirs ont été conçues, incorporant des cœurs en

nid d'abeille classiques et hiérarchiques avec différents types de hiérarchie. Ces architectures, aussi, ont été choisies en adéquation avec les procédés de fabrication classiques utilisés pour les miroirs à cœur en nid d'abeille. Les paramètres géométriques de tous les miroirs conçus ont été finement ajustés afin qu'ils aient tous des masses comparables de $10 \text{ kg} \pm 1\%$. La supériorité des architectures à cœurs en nid d'abeille hiérarchiques a été démontrée avec des améliorations de performances de l'ordre de 33.60% permises par la configuration à cœurs ne nid d'abeille hiérarchiques à motif triangulaire.

Le quatrième chapitre introduit de nouvelles architectures innovantes basées sur les cœurs ondulés multidirectionnels enchevêtrés (Entangled Multidirectional Corrugated cores) que nous avons mis au point. Ces cœurs sont dérivés des cœurs ondulés très employés dans divers domaines de l'ingénierie. En manipulant et superposant de plusieurs manières différentes des cœurs ondulés, on a pu mettre au point de nouvelles configurations que nous avons baptisées Entangled Multidirectional Corrugated cores. Ces nouvelles configurations sont extrêmement complexes et ne peuvent être réalisées que par la fabrication additive qui commence à être employée pour la fabrication des miroirs légers pour les télescopes spatiaux. Plusieurs miroirs légers ont été conçus et analysés, chacun incorporant une architecture distincte de cœur ondulé multidirectionnel enchevêtré. Cette nouvelle approche de conception a aussi démontré une supériorité, à masse comparable, dans les performances optomécaniques par rapport à la catégorie des miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques. Mais, faut-il le mentionner, ces nouvelles architectures introduisent de nouveaux challenges pour leur mise en place pratique par rapport aux designs classiques. Toutefois, avec la marche à pas forcés de la technologie de fabrication additive et sa maturation en cours, ces architectures pourraient jouer un rôle clé dans les décennies à venir.

Enfin, cette thèse est clôturée par une conclusion où nous résumons les résultats obtenus et dressons les perspectives pour des travaux futurs.

1. Contexte et fondamentaux de l'observation spatiale

1.1 Introduction

Dans ce chapitre introductif, nous évoquons, en premier lieu, la résolution et la sensibilité des télescopes afin de mettre en évidence l'importance de l'ouverture de ces derniers et la problématique y afférant, en l'occurrence la taille, la masse et la rigidité des miroirs primaires.

Ensuite, nous abordons les différentes architectures permettant l'allègement des miroirs primaires que nous divisons en deux catégories qui sont les classiques et les nouvelles.

Enfin, nous abordons quelques sollicitations environnementales orbitales et la façon dont elles affectent les performances des miroirs légers des télescopes spatiaux. En outre, nous discutons l'évaluation de conception optomécanique de ces miroirs par la Méthode des Eléments Finis MEF avec les différents cas de chargements et les indicateurs de performances communément utilisés dans la littérature.

1.2 Résolution et sensibilité d'un télescope

Un télescope a trois fonctions principales : l'imagerie, le pointage, et la poursuite [1].

Avec l'évolution de l'astronomie et l'astrophysique, les télescopes modernes ont pour mission de regarder de plus en plus loin dans l'espace et dans le temps. Pour ce faire, ceux-ci doivent avoir de très bonnes résolutions et sensibilités ce qui n'est pas sans poser des problématiques que l'on discutera dans ce qui suit.

1.2.1 Résolution d'un télescope

La résolution, ou pouvoir séparateur, d'un instrument optique tel qu'un télescope se définit par sa capacité à former une image où deux points objets rapprochés peuvent être distingués. Rapportée à la distance, on parle alors de résolution angulaire qui se définit par l'angle minimal sous-tendu par deux objets proches et résolus au plan focal. La Figure 1.1 illustre l'angle en question.

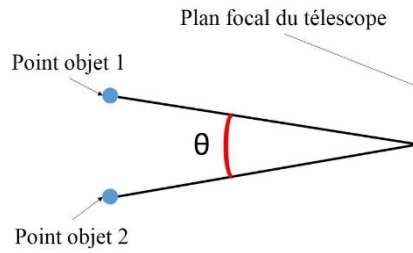


Figure 1.1. Illustration de la résolution angulaire

Un instrument optique imageur avec une ouverture à symétrie de révolution (circulaire ou annulaire) forme, dans son plan focal, une image étendue d'un objet ponctuel. Ceci est dû à la diffraction de la lumière par l'ouverture ainsi qu'aux différentes aberrations optiques. On parle, alors, de la fonction d'étalement du point ou PSF (pour Point Spread Function) [2–8]. Dans le cas idéal, c'est-à-dire en l'absence d'aberrations, la PSF est une tâche d'Airy avec une distribution radiale d'intensité obéissant à la fonction de Bessel du premier ordre comme illustré dans la Figure 1.2 [2].

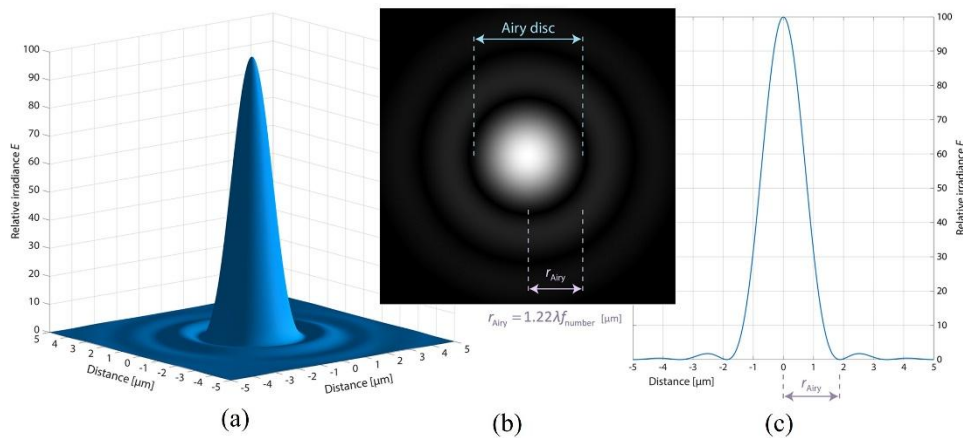


Figure 1.2. Illustrations de la tâche d'Airy ou PSF produite par un télescope à la limite de diffraction, (a) distribution radiale d'intensité en 3D, (b) image de la PSF, et (c) distribution radiale d'intensité en 2D [2].

Le critère de Rayleigh (équation (1.1)) définit la résolution angulaire à la limite de diffraction, i.e dans le cas où il n'y a pas d'aberrations [1–3,5,6,9–13].

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (1.1)$$

Où λ est la longueur d'onde et D est le diamètre d'ouverture du télescope.

1.2.2 Sensibilité d'un télescope

La sensibilité, ou pouvoir collecteur, d'un télescope est définie par son pouvoir à observer des objets de faible luminosité [14]. Pour qu'un télescope puisse observer un tel objet, il doit en

collecter le maximum de flux lumineux. En observation astronomique, la quantité de lumière collectée par un télescope observant un objet céleste, en fonction du temps, peut être exprimée par l'équation (1.2) [14]:

$$N(t) = Q \times A \times t \times \Delta\lambda \times n_p \quad (1.2)$$

Où Q représente l'efficacité quantique du détecteur, A est l'aire d'ouverture du télescope, t est le temps, $\Delta\lambda$ la bande passante, n_p est le nombre de photons incidents par unité de temps.

1.2.3 Importance et problématique de l'ouverture

Comme on a pu le voir, pour la résolution à travers le critère de Rayleigh (équation 1.1), et la sensibilité (équation 1.2), ces deux paramètres, d'importance capitale pour les télescopes, dépendent de l'ouverture. Or, l'ouverture d'un télescope est directement liée au diamètre de son miroir primaire.

Ainsi, pour améliorer la résolution et la sensibilité d'un télescope, il faut en augmenter l'ouverture, donc le diamètre du miroir primaire ce qui entraîne l'augmentation de sa masse.

Pour les télescopes spatiaux, cette condition pose une problématique des plus inextricables. En effet, les télescopes spatiaux sont acheminés en orbite par des véhicules de lancement limités dans la taille et la masse des objets qu'ils transportent. Par conséquent, si l'on souhaite augmenter la taille des miroirs des télescopes spatiaux, dans les limites de ce que peuvent transporter les lanceurs en termes de taille, on doit les alléger. Cependant, l'allègement s'accompagne, inévitablement, d'une perte de rigidité qui affecte négativement les performances des miroirs dans l'environnement d'opération orbital sévère qui est le leur. De plus, les coûts de lancement augmentent avec l'augmentation du poids des objets à mettre en orbite, mettant parfois en péril les missions des télescopes spatiaux pour des raisons budgétaires [15–17].

Pour ces raisons, et pour aller de l'avant, des efforts doivent être consentis pour concevoir des miroirs primaires pour les télescopes spatiaux avec un meilleur compromis entre la taille, la masse, la rigidité, et le coût [15–17].

1.3 Architectures classiques des miroirs légers

Un miroir de télescope de base, illustré dans la Figure 1.3, est plein et possède une première surface réfléchissante qui peut être plane, concave ou convexe avec une forme qui peut être

parabolique, hyperbolique ou sphérique. Cependant, la forme concave est la plus répandue et nous allons nous concentrer dessus. La deuxième surface (arrière) est plane.

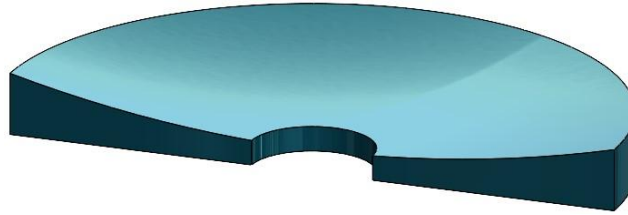


Figure 1.3. Vue en coupe d'un miroir de télescope de base non allégé.

Les architectures des miroirs légers sont obtenues par enlèvement de matière par l'arrière. La première approche d'allègement qui vient à l'esprit, est celle de la réduction de l'épaisseur. Toutefois, cette méthode réduit considérablement la rigidité et s'avère être inefficace [18].

Des techniques plus avancées et plus efficaces sont discutées dans ce qui suit.

1.3.1 Les miroirs contoured-back

Pour ce type d'architecture, l'allègement est obtenu par enlèvement de matière par façonnage de la surface arrière [18–21]. Cette approche permet d'obtenir plusieurs variantes telles que celles illustrées dans la Figure 1.4 avec l'architecture du miroir de base.

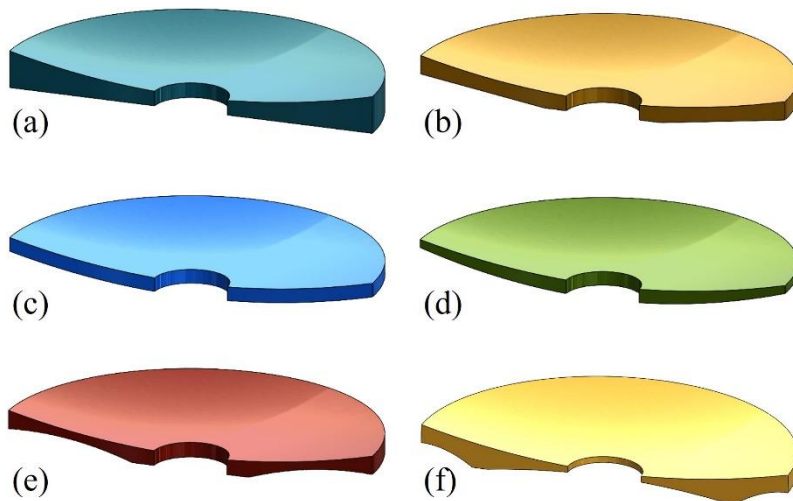


Figure 1.4. Vues en coupe des différentes architectures des miroirs légers de type contoured-back, (a) le miroir de base, (b) miroir dépouillé, (c) miroir ménisque avec des rayons de courbure égaux, (d) miroir ménisque avec le rayon de courbure de la surface arrière inférieur à celui de la surface avant, (e) miroir simple-arc, et (f) miroir double-arc.

Le façonnage le plus simple de la surface arrière consiste à la dépouiller comme illustré dans la Figure 1.4(b). La deuxième et la troisième méthodes de façonnage produisent des miroirs en forme de ménisque tel que l'on peut voir dans la Figure 1.4(c) où les rayons de courbure des

deux surfaces sont égaux, et la Figure 1.4(d) où le rayon de courbure de la surface arrière est inférieur à celui de la surface optique. La Figure 1.4(e) montre une autre approche dite « simple arc » où la surface arrière a un contour parabolique. Enfin, la Figure 1.4(f) illustre la dernière configuration dite « double arc » où la surface arrière est constituée de deux contours paraboliques.

1.3.2 Les miroirs à cœurs cellulaires en nid d'abeille

Cette architecture de miroirs se constitue d'une plaque avant mince supportée par un cœur cellulaire en nid d'abeille [14,18–22]. La Figure 1.5 illustre les différentes parties d'un miroir à cœur cellulaire en nid d'abeille. Les cellules du cœur peuvent être hexagonales, triangulaires, carrés ou circulaires. La Figure 1.6 illustre les différentes géométries courantes de ces cellules.

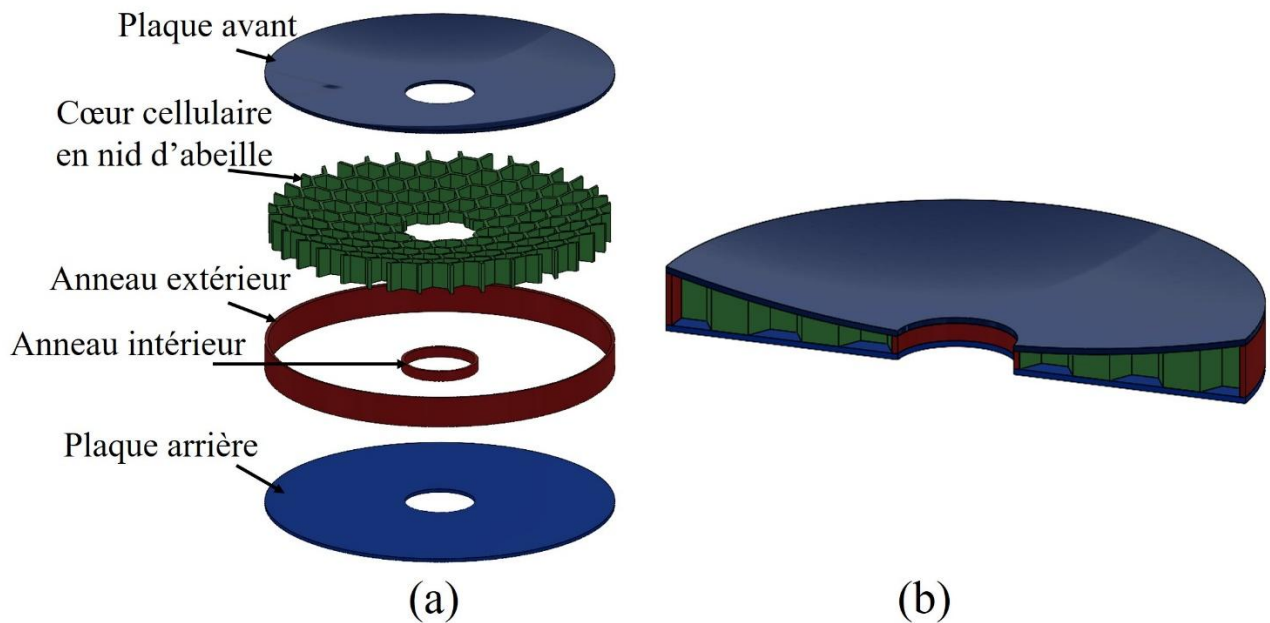


Figure 1.5. Illustrations d'un miroir à cœur cellulaire en nid d'abeille, (a) vue éclatée montrant tous les constituants, et (b) vue en coupe.

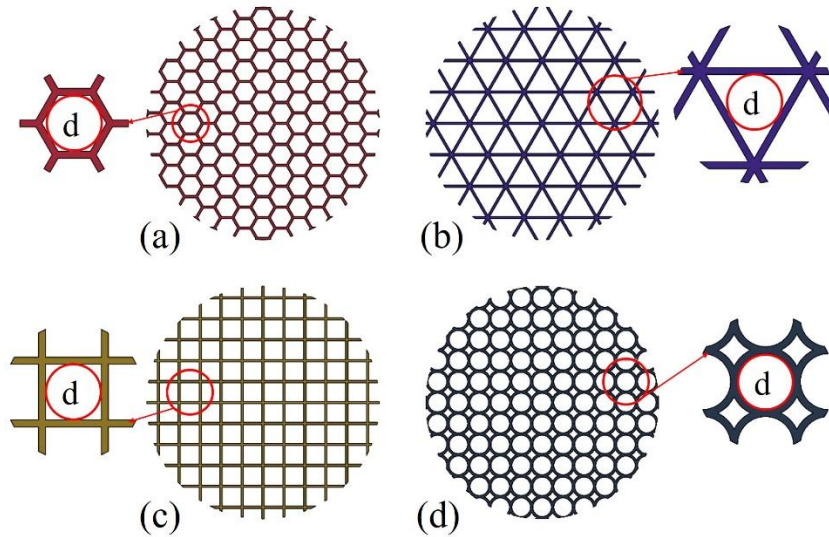


Figure 1.6. Les géométries usuelles des cellules des cœurs en nid d'abeille, (a) hexagonales, (b) triangulaires, (c) carrées, et (d) circulaires.

Comme on peut le voir dans la Figure 1.7, certaines variantes de cette architecture de miroirs possèdent des anneaux qui entourent le cœur, et d'autres en sont dépourvues.

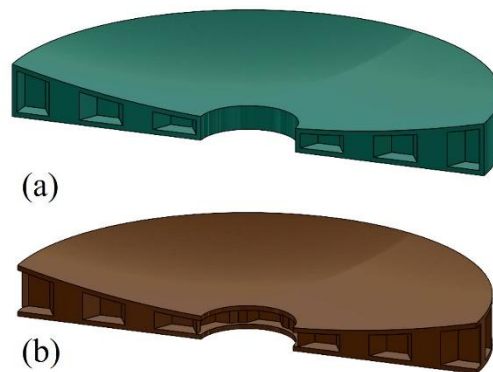


Figure 1.7. Types des miroirs légers à cœur cellulaire en nid d'abeille selon que le cœur soit ou pas entouré d'anneaux, (a) avec anneaux extérieur et intérieur, et (b) sans anneaux.

Selon l'existence ou pas d'une plaque mince à l'arrière et sa configuration, les trois variantes de la Figure 1.8 se déclinent : sandwich avec une plaque arrière pleine, semi open-back avec une plaque arrière trouée, et open-back sans plaque arrière.

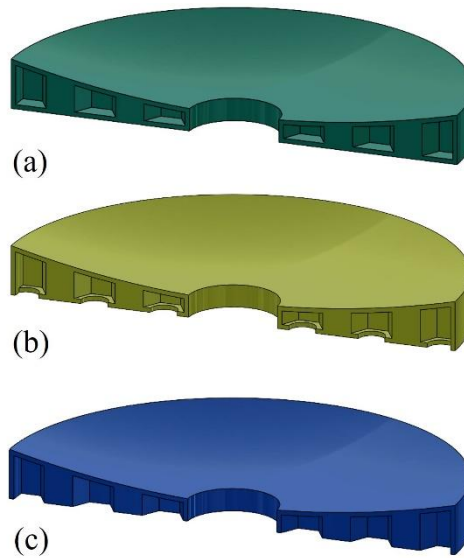


Figure 1.8. types de miroirs légers à cœurs cellulaires en nid d'abeille selon l'existence et la nature de la plaque arrière, (a) sandwich, (b) semi open-back, et (c) open-back.

Enfin, selon la configuration de la plaque avant, on trouve des variantes où elle a une forme de ménisque et d'autre où elle est plan-concave. Ces deux variantes sont illustrées dans la Figure 1.9.

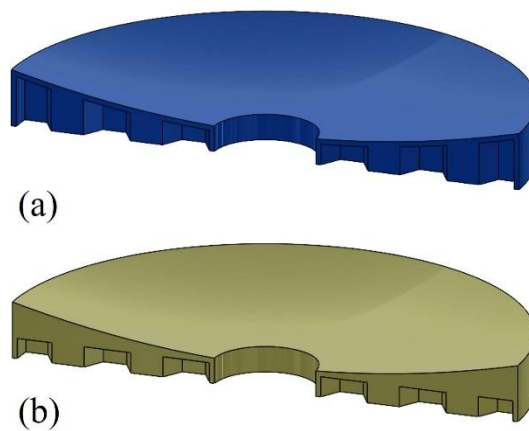


Figure 1.9. Types de miroirs légers à cœurs cellulaires en nid d'abeille selon la configuration de la plaque avant, (a) plaque avant en forme de ménisque, (b) plaque avant plan-concave.

Le miroir primaire du télescope spatial Hubble Space Telescope (HST), illustré dans la Figure 1.10 possède un cœur en nid d'abeille à cellules carrées en configuration sandwich [23,24].

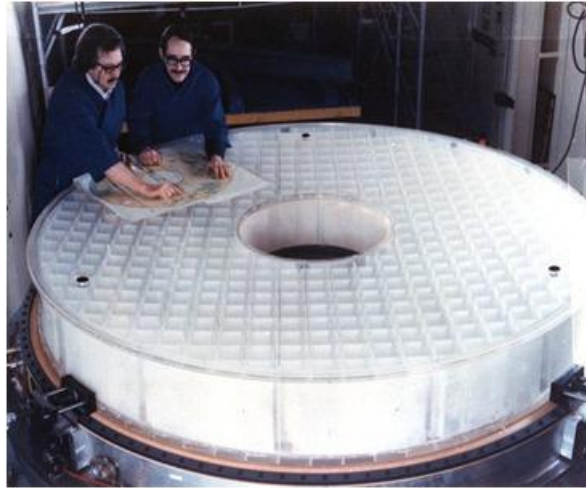


Figure 1.10. Photographie du miroir primaire du télescope spatial HST pendant sa réalisation.

Ce type de miroirs, dans ses différentes déclinaisons citées ci-dessus, offrant un très bon compromis entre allègement et rigidité, a bénéficié d'un grand intérêt de la communauté scientifique et a permis un grand avancement de la conception des miroirs légers [21–47].

1.3.3 Les miroirs segmentés

Les miroirs segmentés, utilisés tant pour les télescopes terrestres que les télescopes spatiaux, sont des miroirs constitués par l'assemblage de plusieurs segments afin d'aboutir à l'ouverture finale. Ils permettent d'atteindre des ouvertures plus grandes que les miroirs monolithiques en s'affranchissant de plusieurs contraintes rencontrés par ces derniers. En effet :

- Le transport jusqu'en orbite des très grands miroirs monolithiques est impossible avec les technologies actuelles, tandis que le lancement de miroirs segmentés en configuration pliée qui se déploient une fois en orbite est possible.
- La rigidité de plusieurs segments assemblés est meilleure que celle d'un grand miroir monolithique pour la même ouverture.
- Il est plus facile de fabriquer des segments de tailles modérées que des miroirs de très grande taille dont la réalisation est parfois impossible avec les technologies disponibles.

Toutefois, ces miroirs posent quelques problématiques, notamment celle de leur montage qui doit assurer un alignement parfait des segments [17,48–52].

Différentes configurations de segmentation existent, nous citons : les segments hexagonaux et les segments en pétales, illustrées dans la Figure 1.11.

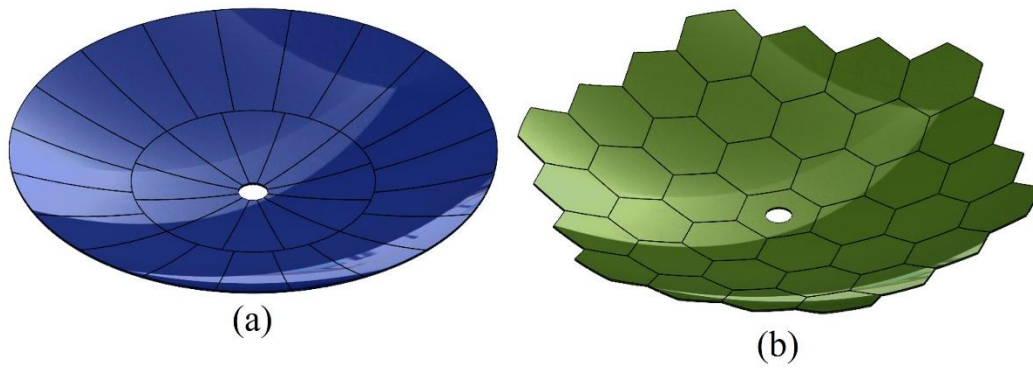


Figure 1.11. Illustrations de deux types de miroirs segmentés, (a) segments en pétales, et (b) segments hexagonaux.

Le fameux télescope spatial James Webb Space Telescope (JWST) emploie un miroir primaire à segments hexagonaux. La Figure 1.12 [53] en illustre les versions pliée déployée en orbite. Les segments hexagonaux ont une architecture en nid d'abeille à cellules triangulaires en configuration open-back [53–55].

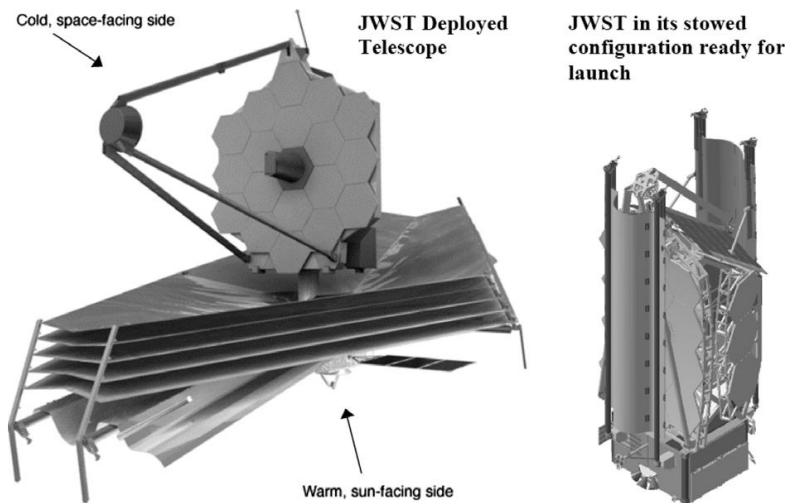


Figure 1.12. Illustrations du télescope spatial JWST [52].

Des télescopes spatiaux tels que The Large UV/Optical/Infrared Surveyor (LUVOIR), illustré dans la Figure 1.13 [56], en phase d'étude par la NASA pour succéder à HST et JWST, prévoit d'employer un miroir segmenté de 8 m ou 15 m de diamètre avec des segments hexagonaux [56].

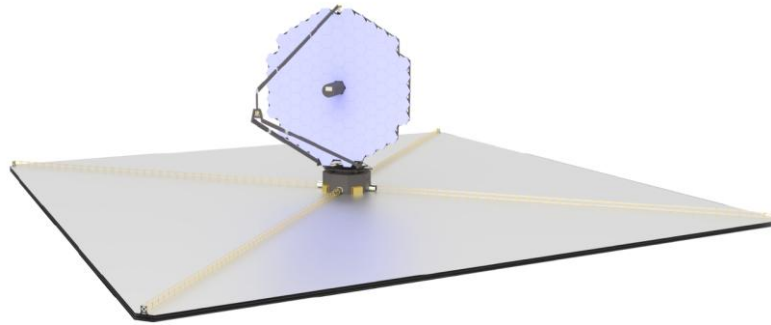


Figure 1.13. Illustration du télescope spatial LUVUOIR [55].

1.4 Nouvelles architectures de miroirs légers à cœurs cellulaires

Avec le développement des procédés de fabrication ainsi que celui des outils de conception et d'optimisation, de nouvelles architectures de cœurs cellulaires voient le jour pour l'allègement des miroirs de télescopes [19]. Nous en citons quelques-unes :

1.4.1 Les miroirs à cœurs cellulaires de type « Voronoi »

Ces cœurs, dont un exemple est illustré dans la Figure 1.14 [43], basés sur une répartition irrégulière des cellules dérivée de la tessellation de Voronoi, et permis par l'avènement de la fabrication additive, ont été envisagés par plusieurs auteurs [43,57–60].

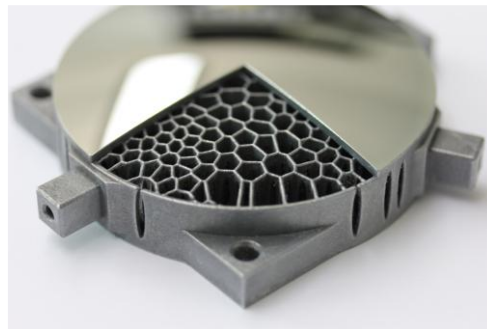


Figure 1.14. Photographie d'un miroir léger à cœur cellulaire de type Voronoi [43].

1.4.2 Les miroirs à cœurs cellulaires de type « truss lattice »

Il s'agit de cœurs constitués d'un maillage de treillis en 3D arrangées de manières spécifiques pour maintenir une bonne rigidité du miroir. La Figure 1.15 illustre un exemple de miroir avec un cœur « truss lattice » [19]. Les miroirs incorporant ce type de cœurs sont généralement conçus en configuration sandwich. Ils ont été rendus possibles grâce à la fabrication additive et bénéficient d'un grand intérêt qui se manifeste par le nombre d'études qui en traitent [61–63].

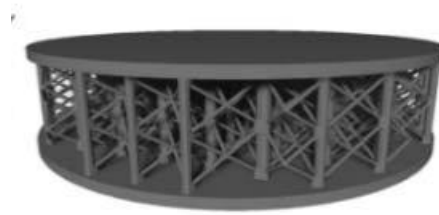


Figure 1.15. Illustration d'un miroir léger à cœur cellulaire de type truss lattice [18].

1.4.3 Les miroirs à cœurs cellulaires arborescents (tree-like)

Comme leur nom l'indique, ces cœurs ont une structure arborescente. Ils sont constitués de raidisseurs principaux et des ramifications avec plusieurs épaisseurs et profondeurs formant une structure ramifiée qui ressemble à un arbre comme illustré dans la Figure 1.16 [64]. Plusieurs études s'y sont intéressées [64–68].

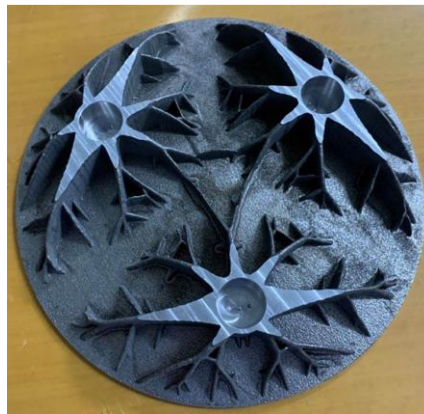


Figure 1.16. Photographie d'un miroir léger à cœur cellulaire arborescent [64].

1.5 Comportement des miroirs légers des télescopes spatiaux face aux sollicitations mécaniques de l'environnement orbital

Les miroirs légers des télescopes spatiaux sont conçus, façonnés, testés et validés sur terre où ils subissent constamment les effets de la gravité terrestre. Ces mêmes miroirs opèrent en orbite, en apesanteur ou en microgravité, dans un environnement où ces effets cessent de s'exercer sur eux. Cette relaxation des effets de la gravité terrestre engendre des déformations de la surface optique par rapport à sa forme nominale occasionnant des aberrations de front d'onde et une altération de la résolution.

De plus, les télescopes spatiaux sont acheminés en orbite au moyen de véhicules de lancement où leurs miroirs primaires subissent un environnement très sévère de vibrations, accélérations et autres pressions auxquelles ils doivent survivre et atteindre leur orbite sans dommages majeurs.

1.6 Evaluation des performances de miroirs légers des télescopes spatiaux sous l'effet des sollicitations mécaniques environnementales

Les ingénieurs et concepteurs des miroirs légers pour les télescopes spatiaux prédisent leurs performances face aux sollicitations environnementales en les analysant par MEF. Ils les soumettent à différents types d'analyse avec différents chargements et conditions aux limites pour simuler leurs configurations de montage.

1.6.1 Microgravité

Afin d'évaluer les distorsions des surfaces optiques des miroirs légers en microgravité, les concepteurs calculent par MEF leurs déplacements sous l'effet de chargements de type accélération de la gravité terrestre de magnitude 1-g appliquées dans les directions parallèle et perpendiculaire à l'axe optique. Comme indicateurs de performances, ils calculent les valeurs Peak-to-Valley (PV), Root Mean Square (RMS) après soustraction des Mouvements de Corps Rigides (MCR) [26,29,47,67–87].

1.6.2 Vibrations du lanceur

Afin d'évaluer les chances de survie au lancement, les designers des miroirs légers pour les télescopes spatiaux analysent leur comportement modal de vibration. Ainsi, ils calculent leurs fréquences naturelles du premier mode de vibration comme indicateur de performance [26,29,67,69,70,73,74,78–82,84,86].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons dressé le contexte des travaux de cette thèse et défini quelques principes fondamentaux. Ainsi, nous avons défini la résolution et la sensibilité d'un télescope et leur dépendance de l'ouverture de celui-ci afin d'y mettre l'accent et poser la problématique de la taille et de la masse des miroirs primaires qui en sont responsables. Nous avons, ensuite, abordé les architectures employées dans les miroirs primaires afin de les alléger. En outre, nous avons parlé des architectures classiques telles que les miroirs légers à cœurs en nid d'abeille, ceux à contours arrière, et des miroirs segmentés, ainsi que de quelques tendances nouvelles.

Nous avons, aussi, énuméré quelques contraintes mécaniques de l'environnement orbital où les miroirs légers des télescopes spatiaux opèrent et la manière dont elles en affectent les

performances. Nous avons, en outre, évoqué les pratiques de modélisation pour la prédiction des performances de ces miroirs face à ces sollicitations mécaniques environnementales employées par les concepteurs ainsi que les indicateurs de performances qu'ils calculent.

2. Amélioration des performances d'un miroir léger à cœur en nid d'abeille

2.1 Introduction

Dans les dernières décennies, plusieurs techniques ont été employées pour l'optimisation des miroirs légers, telles que l'optimisation paramétrique [42,80,88], l'optimisation de topologie [64,67,88–90], les réseaux de neurones [25,91], et les algorithmes génétiques [92]. Ces techniques, coûteuses, nécessitant une grande puissance de calcul et beaucoup de temps ont été utilisées pour optimiser l'architecture des miroirs légers pour en améliorer les performances.

Dans ce chapitre, nous présentons des méthodes simples et efficaces visant à améliorer les performances d'un miroir léger de télescope embarqué à cœur en nid d'abeille. Ces méthodes consistent en l'insertion de renforcements locaux dans la structure du cœur.

A cet effet, nous avons conçu un miroir de référence et nous l'avons analysé par MEF sous différents cas de chargement. Les résultats nous ont permis d'identifier les performances à améliorer ainsi que les zones vulnérables à renforcer. Sur la base de ces résultats, trois nouveaux miroirs ont été développés incorporant différents types de renforcement locaux stratégiques afin d'améliorer les performances par rapport au miroir de référence.

Les stratégies de renforcements locaux employées sont :

- 1- le remplissage des cellules dans les zones identifiées comme vulnérables,
- 2- l'utilisation de cellules de petites tailles au niveau des zones vulnérables et plus grandes ailleurs, et
- 3- l'insertion de raidisseurs de différentes épaisseurs au sein des cellules des zones vulnérables.

Ces stratégies de renforcement respectent la contrainte de fabrication par les procédés traditionnels utilisés pour les miroirs à cœur en nid d'abeille, tels que l'usinage CNC [93,94] ou le découpage par jet d'eau abrasif AWJC (Abrasive Water Jet Cutting) [95,96]. Aussi, le miroir de référence et les miroirs à renforcements locaux doivent obéir à une contrainte de masse de $10 \text{ kg} \pm 1\%$.

Les résultats obtenus confirment que les stratégies de renforcements locaux employées permettent effectivement d'améliorer les performances ciblées, avec des gains variables selon la stratégie employée.

2.2 Conception et évaluation du miroir de référence

2.2.1 Conception du miroir de référence

Le miroir de référence conçu est plan-concave en configuration open-back et doté d'un trou central conformément aux configurations de télescopes de type Cassegrain. La surface optique, de forme parabolique concave, possède une distance focale de 2500 mm. Elle est intégrée à une face avant de type ménisque. Cette surface est soutenue par un cœur en nid d'abeille, lui-même encadré par deux anneaux, intérieur et extérieur. La Figure 2.1 illustre cette architecture.

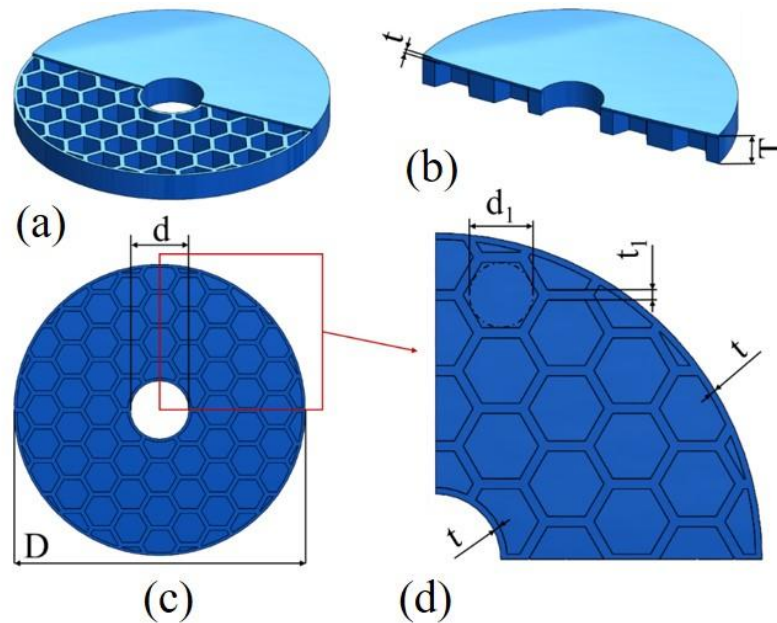


Figure 2.1. Différentes vues illustrant l'architecture du miroir de référence, (a) vue isométrique avec la moitié de la face avant ôtée afin de laisser apparaître le cœur, (b) vue en coupe avec dimensions, (c) vue de dessous avec des dimensions, et (d) vue de détail avec des dimensions.

Le diamètre du miroir (D) est de 500 mm, celui du trou central (d) est de 100 mm. L'épaisseur du miroir à la périphérie (T) est de 50 mm. La face avant et les deux anneaux partagent une épaisseur (t) de 5 mm.

La taille de cellule hexagonale du cœur en nid d'abeille, définie par le diamètre du cercle inscrit en son intérieur et tangent à ces six côtés, (d_1) est de 50 mm, et, afin que le miroir ait une masse de $10 \text{ kg} \pm 1\%$, l'épaisseur de paroi du cœur (t_1) est de 7.8 mm. Le matériau choisi

pour cette étude est le carbure de silicium SiC, un excellent candidat qui suscite beaucoup d'engouement auprès des concepteurs de miroirs légers pour les télescopes spatiaux [35,46, 68,73, 81,86,90, 97–116]. La masse totale du miroir, calculée sur la base de la densité ρ de 3100 kg/m^3 [116], est de 10.05 kg.

La configuration de montage adoptée pour cette étude est illustrée dans la Figure 2.2. Le miroir y est monté latéralement par le moyen de trois supports de type « bipod flexure », Une configuration couramment employée pour les miroirs légers des télescopes spatiaux [29,69,74,78,79,85,117–121]. Toutefois, afin d'évaluer les performances intrinsèques du miroir et de les comparer à celles des autres miroirs, ces supports sont modélisés par des conditions aux limites de type 'support fixe' dans les modèles MEF.

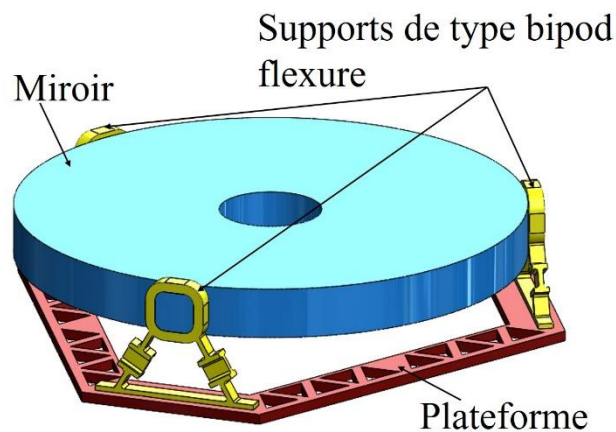


Figure 2.2. Illustration de la configuration de montage.

2.2.2 Analyse du miroir de référence

Le miroir de référence a été analysé par MEF en utilisant le logiciel ANSYS afin d'identifier les régions vulnérables et les performances à améliorer. A cet effet, trois cas de chargement ont été considérés. Les propriétés mécaniques du carbure de silicium SiC sont : densité $\rho = 3100 \text{ kg/m}^3$, module d'Young $E = 406 \text{ GPa}$ et coefficient de Poisson $\nu = 0.17$ [116].

2.2.2.1 Cas de chargement 1

- Type d'étude : structure statique.
- Charge appliquée : accélération de la gravité terrestre de magnitude 1-g parallèle à l'axe optique (direction z) tel qu'illustré dans la Figure 2.3(a).

- Conditions aux limites : une condition aux limites de type ‘support fixe’ est appliquée au niveau de trois emplacements à la périphérie du miroir comme on peut le voir dans la Figure 2.3(a).
- Indicateurs de performance : les valeurs PV et RMS de l’erreur de la surface optique, après soustraction des MCR, notées PV_Z et RMS_Z (équations 2.1 et 2.2, respectivement).

$$PV_Z = U_{Zmax} - U_{Zmin} \quad (2.1)$$

$$RMS_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_S} (U_{Zi})^2}{N_S}} \quad (2.2)$$

Où :

- U_{Zmax} est le déplacement nodal maximal de la surface optique, sous l’effet de la gravité axiale, et après soustraction des MCR.
- U_{Zmin} est le déplacement nodal minimal de la surface optique, sous l’effet de la gravité axiale, et après soustraction des MCR.
- U_{Zi} est le déplacement correspondant au nœud i de la surface optique, sous l’effet de la gravité axiale, et après soustraction des MCR.
- N_S est le nombre de nœuds de la surface optique.

2.2.2.2 Cas de chargement 2

- Type d’étude : structure statique.
- Charge appliquée : accélération de la gravité terrestre de magnitude 1-g perpendiculaire à l’axe optique du miroir (direction y) tel qu’illustré dans la Figure 2.3(b).
- Conditions aux limites : la même condition aux limites de type ‘support fixe’ du cas de chargement 1 est appliquée aux mêmes localisations (Figure 2.3(b)).
- Indicateurs de performance : les valeurs PV et RMS de l’erreur de la surface optique, après soustraction des MCR, notées PV_Y et RMS_Y (équations 2.3 et 2.4, respectivement).

$$PV_Y = U_{Ymax} - U_{Ymin} \quad (2.3)$$

$$RMS_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_S} (U_{Yi})^2}{N_S}} \quad (2.4)$$

Où :

- $U_{Y_{\max}}$ est le déplacement nodal maximal de la surface optique, sous l'effet de la gravité latérale, et après soustraction des MCR.
- $U_{Y_{\min}}$ est le déplacement nodal minimal de la surface optique, sous l'effet de la gravité latérale, et après soustraction des MCR.
- U_{Y_i} est le déplacement correspondant au nœud i de la surface optique, sous l'effet de la gravité latérale, et après soustraction des MCR.
- N_S est le nombre de nœuds de la surface optique.

2.2.2.3 Cas de chargement 3

- Type d'étude : modale
- Conditions aux limites : la même condition aux limites de type 'support fixe' des cas de chargement 1 et 2 est appliquée aux mêmes localisations.
- L'indicateur de performance calculé est la fréquence naturelle du premier mode de vibration.

La Figure 2.3(c) illustre le modèle discrétisé.

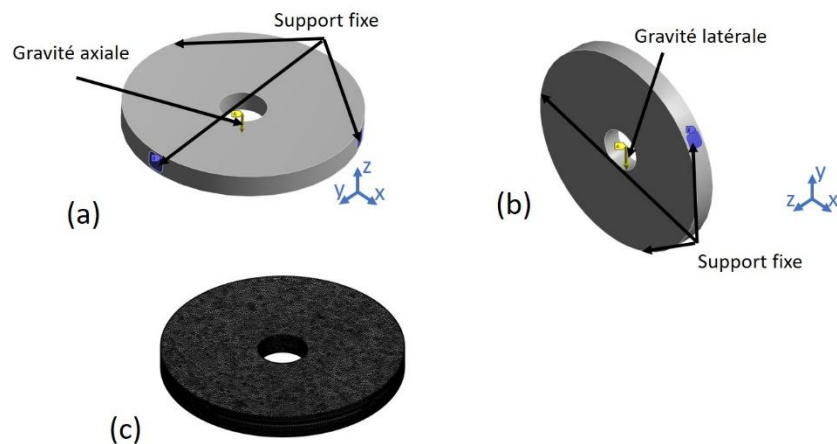


Figure 2.3. Illustrations des modèles MEF des différents cas de chargement, (a) cas de chargement 1, (b) cas de chargement 2, et (c) le modèle discrétisé.

2.2.2.4 Analyse de convergence du maillage

Une étude de convergence du maillage a été menée pour le miroir de référence. Des tailles d'éléments de 20 mm, 10 mm, 5 mm, 4mm, 3mm, 2.5 mm, 2.25 mm et 2 mm ont été considérées. Le critère de convergence retenu est le déplacement nodal maximal de la surface optique sous l'effet de la gravité axiale. La convergence est atteinte lorsque la différence entre deux itérations successives est inférieure à 1 %. Le modèle a convergé pour une taille d'élément

de 2.5 mm. Le nombre d'éléments et de nœuds du maillage à la convergence sont, respectivement de 352307 et 621331. Le Tableau 2.1 dresse les données de convergence, et la Figure 2.4 illustre la courbe de convergence pour le miroir de référence.

Tableau 2.1. Données de l'analyse de convergence du miroir de référence.

Taille d'éléments (mm)	Nombre d'éléments	Déplacement Max de la surface optique (nm)	Différence entre deux itérations successives (%)
20	13332	157,72	
10	26762	174,17	10,43
5	94414	183,43	5,32
4	146713	185,46	1,11
3	247336	189,15	1,99
2.5	352307	189,82	0,35
2.25	423301	190,35	0,28
2	734217	191,18	0,44

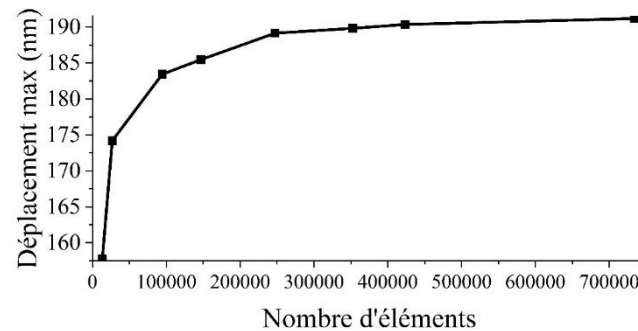


Figure 2.4. Courbe de convergence du maillage pour le miroir de référence.

2.2.3 Résultats et discussions

Les résultats des modèles MEF du miroir de référence sont comme suit :

- $PV_Z = 182.34$ nm.
- $RMS_Z = 44.16$ nm.
- $PV_Y = 20.45$ nm.
- $RMS_Y = 3.74$ nm.
- Une fréquence naturelle de 1338.1 Hz.

Il est à noter que les performances sous l'effet de la gravité latérale PV_Y et RMS_Y se révèlent nettement supérieures à celles sous l'effet de la gravité axiale PV_Z et RMS_Z , une tendance déjà observée dans plusieurs études [68,78–81,86,87,122,123].

Les tolérances sur l'erreur de la surface optique en termes de valeurs PV pratiquées par les concepteurs sont de $\lambda/10$ [45,75]. Celles en termes de RMS varient entre $\lambda/10$ [82,86], $\lambda/40$ [45,75], et $\lambda/50$ [81,124]. Tandis que celles sur les fréquences naturelles, elles sont de 180 Hz [82], 800 Hz [74], ou encore 1000 Hz [124].

Compte tenu des plus sévères de ces tolérances, à savoir $\lambda/10$ pour PV, $\lambda/50$ pour RMS et 1000 Hz pour la fréquence naturelle, le miroir de référence serait qualifié pour opérer à des longueurs d'onde autour de 2200 nm pour le cas de la gravité axiale, et autour de 185 nm pour le cas de la gravité latérale, et devrait survivre au lancement.

Etant donné le fait que les performances sous l'effet de la gravité latérale sont meilleures, et respectent les tolérances les plus strictes, que celles sous l'effet de la gravité axiale, et que la fréquence naturelle respecte les tolérances les plus sévères, notre effort d'amélioration de performances doit se focaliser sur l'amélioration de celles sous l'effet de la gravité axiale, en l'occurrence PV_Z et RMS_Z .

La Figure 2.5 illustre les tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique du miroir de référence sous l'effet de la gravité axiale dans (a) et la gravité latérale dans (b), après soustraction des MCR.

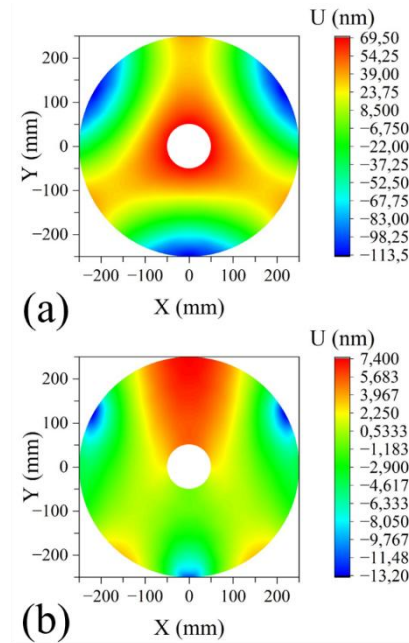


Figure 2.5. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique du miroir de référence après soustraction des MCR, (a) sous l'effet de la gravité axiale, et (b) sous l'effet de la gravité latérale.

Sous l'effet de la gravité axiale, on note que la déformée de la surface optique est marquée par un affaissement assez prononcé au niveau de la zone centrale dû à son éloignement des points

de support. Cet affaissement se prolonge et s'atténue progressivement en s'éloignant du centre pour s'amplifier ensuite et constituer trois autres affaissements moins prononcés au niveau de trois zones périphériques situées entre les points de support. Au niveau des points de support, les minimas de déplacement sont enregistrés. Cette allure de déformation est typiques des miroirs légers montés latéralement au niveau de trois localisations périphériques sous l'effet de la gravité axiale [78,79,87,125–127].

Nous identifions, ainsi, la zone centrale avec l'affaissement le plus prononcé, et les trois zones périphériques qui s'affaissent de façon tout aussi considérable bien que moindre, comme les zones vulnérables à renforcer dans ce qui suit.

Sous l'effet de la gravité latérale, la déformée est caractérisée par un affaissement de la surface optique dans la direction y avec la portion supérieure présentant l'amplitude la plus importante. Le reste de la surface présente un affaissement assez uniforme avec deux zones assez marquées situées dans le bas de la surface de part et d'autre du point de fixation inférieur. Cette tendance de déformation a été décrite précédemment pour des miroirs légers montés de la même manière que celle étudiée ici [69,128].

Afin de mieux mettre en évidence la différence d'affaissement des différentes zones vulnérables, la Figure 2.6 montre la distribution des déplacements nodaux sur une ligne reliant la zone centrale à la zone périphérique.

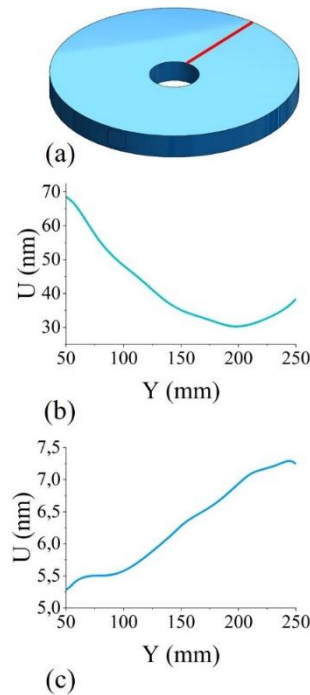


Figure 2.6. Distribution des déplacements nodaux sur une ligne reliant la zone centrale à la zone périphérique, (a) représentation de la ligne sur la surface optique du miroir, (b) sous l'effet de la gravité axiale, et (c) sous l'effet de la gravité latérale.

Cette évolution démontre qu'en effet, l'affaissement sous l'effet de la gravité axiale a tendance à s'atténuer en s'éloignant de la zone centrale pour se ré amplifier à l'approche de la périphérie. Sous l'effet de la gravité latérale, en revanche, il a tendance à croître à mesure que l'on s'éloigne du centre pour atteindre son maximum à la périphérie.

2.3 Conception et évaluation des miroirs avec renforcements locaux

Trois miroirs avec trois stratégies de renforcements locaux ont été conçus. Nous leur assignons les désignations RL1, RL2, et RL3.

2.3.1 Conception du miroir RL1

La stratégie de renforcements locaux employée pour ce miroir consiste à remplir les cellules du cœur en nid d'abeille correspondant aux zones vulnérables, tandis que le reste du cœur reste sans modifications sauf l'épaisseur de paroi qui passe à 4.3 mm afin de compenser la matière ajoutée et demeurer dans la contrainte de masse de $10 \text{ kg} \pm 1\%$ avec 9.99 kg. La Figure 2.7 illustre une vue du cœur de ce miroir.

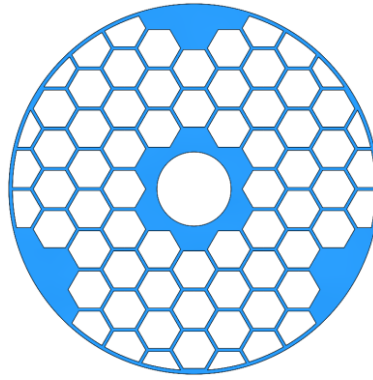


Figure 2.7. Illustration du cœur du miroir RL1.

2.3.2 Conception du miroir RL2

La stratégie de renforcement employée pour ce miroir repose sur la gradation de la taille des cellules. Ceci consiste à implémenter des cellules de petite taille aux endroits vulnérables et des plus grandes à mesure que l'on s'en éloigne avec des épaisseurs de parois ajustées en conséquence. Les tailles de cellules utilisées varient de 45 mm à 51 mm avec un incrément de 1 mm. Le Tableau 2.2 détaille les différentes tailles de cellules employées. Le cœur du miroir résultant est illustré dans la Figure 2.8 montrant la distribution des cellules par taille. Le miroir LR2 pèse 9.99 kg.

Tableau 2.2 Les différentes tailles de cellules du cœur du miroir LR2.

Désignation	Taille (mm)
d₁	45
d₂	46
d₃	47
d₄	48
d₅	49
d₆	50
d₇	51

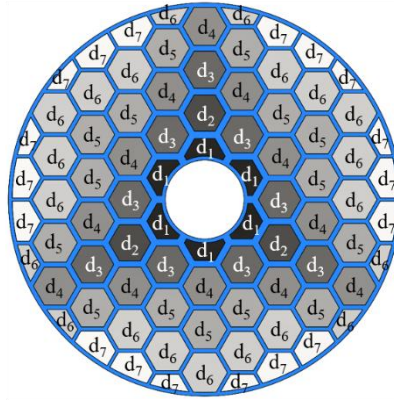


Figure 2.8. Illustration du cœur du miroir RL2 avec la distribution spatiale des tailles de cellules.

2.3.3 Conception du miroir RL3

La stratégie de renforcement de **RL3** consiste à subdiviser les cellules hexagonales situées dans les zones vulnérables en six cellules triangulaires à l'aide de raidisseurs. Ces raidisseurs présentent des épaisseurs variables en fonction de leur emplacement : $t_1 = 4,8$ mm pour les zones les plus vulnérables tandis que les autres épaisseurs t_i décroissent selon l'équation 2.5. Les différentes épaisseurs t_i sont listées dans le Tableau 2.3. La Figure 2.9(a) illustre la distribution de l'épaisseur des raidisseurs sur les cellules du cœur et la Figure 2.9(b) montre le cœur obtenu. Ce miroir présente une masse de 10.01 kg.

$$t_i = \frac{t_{i-1}}{1.5} \quad (2.5)$$

Tableau 2.3. Les différentes épaisseurs des raidisseurs supplémentaires.

Désignation	Epaisseur (mm)
t_1	4.8
t_2	3.2
t_3	2.13
t_4	1.42

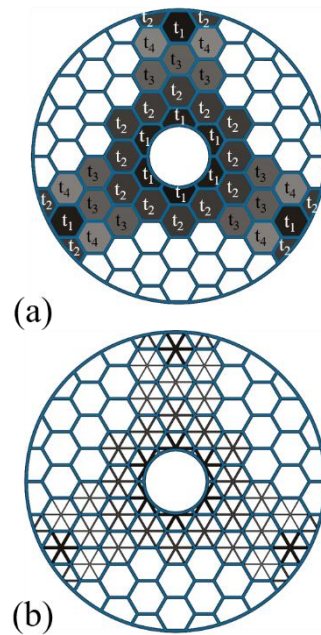


Figure 2.9. Illustrations du cœur du miroir RL3, (a) distribution spatiale de l'épaisseur des raidisseurs supplémentaires, (b) vue du cœur.

2.3.4 Analyse des miroirs RL

Afin d'évaluer les stratégies de renforcements locaux utilisées dans la conception des différents miroirs RL, ces derniers ont été analysés par MEF en utilisant le software ANSYS avec les mêmes cas de chargement que pour le miroir de référence. Les mêmes indicateurs de performances ont été calculés pour chacun des miroirs RL.

Une analyse de convergence du maillage a été menée pour chaque miroir RL selon la même approche employée pour le miroir de référence. Tous les modèles ont convergé à une taille d'élément de 2.5 mm. La Figure 2.10 présente les courbes de convergences du maillage pour les différents miroirs RL. Le Tableau 2.4 récapitule les nombres d'éléments et de nœuds à la convergence pour chaque miroir RL.

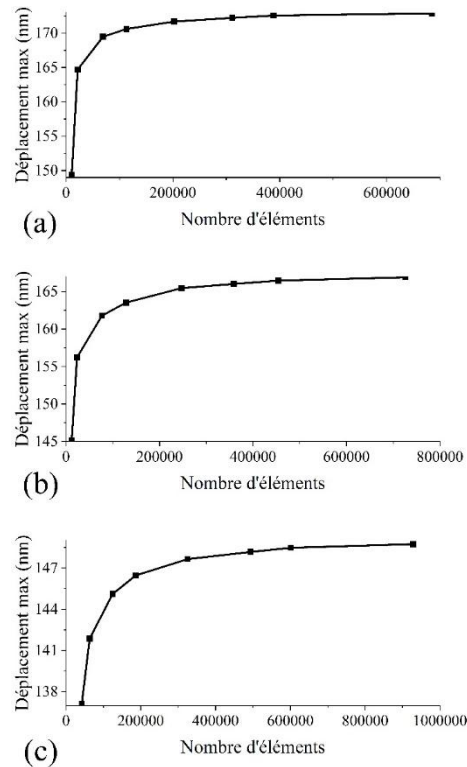


Figure 2.10. Courbe de convergence du maillage pour les différents miroirs RL, (a) RL1, (b) RL2, et (c) RL3.

Tableau 2.4. Nombres d'éléments et de nœuds du maillage à la convergence pour les miroirs RL.

Désignation	Nombre d'éléments	Nombre de nœuds
RL1	311435	554502
RL2	358863	631293
RL3	493711	870339

2.3.5 Résultats et discussions

Après l'exécution des modèles MEF des miroirs à renforcements locaux, les résultats obtenus sont listés dans le Tableau 2.5 avec ceux du miroir de référence. La Figure 2.11 illustre des graphiques à barres de ces résultats.

Tableau 2.5. Indicateurs de performances des miroirs RL et du miroir de référence.

Désignation	PV _Z (nm)	RMS _Z (nm)	PV _Y (nm)	RMS _Y (nm)	Fréquence naturelle (Hz)
Référence	182.34	44.16	20.45	3.74	1338.1
RL1	167.87	41.53	28.83	4.80	1314.8
RL2	159.72	40.89	22.39	3.91	1382.9
RL3	142.08	35.75	23.34	3.99	1436.2

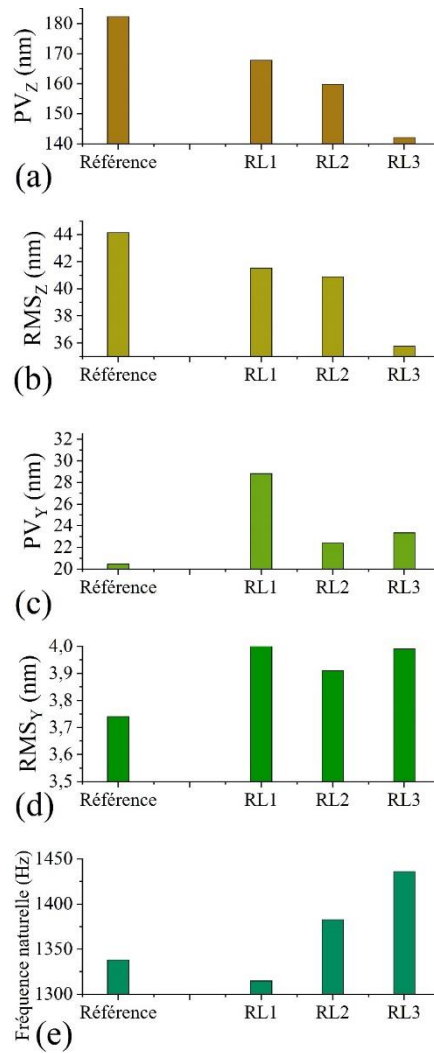


Figure 2.11. Graphiques à barres des indicateurs de performances calculés pour tous les miroirs RL et le miroir de référence, (a) PV_Z , (b) RMS_Z , (c) PV_Y , (d) RMS_Y , et (e) Fréquences naturelles.

L'analyse de ces résultats et leur comparaison avec ceux du miroir de référence permettent de noter les remarques suivantes :

- RL1 offre des performances meilleures que le miroir de référence en ce qui concerne la gravité axiale. PV_Z s'est améliorée de 182.34 nm à 167.87 nm soit une amélioration de 7.93 %. RMS_Z affiche une amélioration de 5.95 % avec des valeurs de 44.16 pour le miroir de référence et 41.53 pour RL1. Cependant, les performances sous l'effet de la gravité latérale, ainsi que la fréquence naturelle se sont détériorées.
- RL2, aussi permet une amélioration des performances sous l'effet de la gravité axiale par rapport au miroir de référence. En effet, PV_Z enregistre une progression de 12.40 % passant de 182.34 nm à 159.72 nm, et RMS_Z , une amélioration de 7.40 %, évoluant de 44.16 nm à 40.89 nm. Une légère amélioration de la fréquence

naturelle de 3.23 % est observée, progressant de 1338.1 Hz à 1382.9 Hz. Toutefois, les performances sous l'effet de la gravité latérale se sont détériorées.

- Concernant RL3, il permet aussi une amélioration des performances sous l'effet de la gravité axiale, PV_z passant 182.34 nm à 142.08 nm enregistrant une amélioration de 22.07 %, et RMS_z passant de 44.16 nm à 35.75 nm enregistrant une amélioration de 19.04 %. La fréquence naturelle, quant à elle, enregistre une amélioration de 7.33 % évoluant de 1338.1 Hz à 1436.2 Hz. Les performances sous l'effet de la gravité latérale se sont détériorées.
- Si l'on venait à classer les performances des miroirs de référence et RL sous l'effet de la gravité axiale, des meilleures aux pires, RL3 vient en tête suivi par RL2 et RL1, et en queue du classement, on trouve le miroir de référence.
- Pour les performances sous l'effet de la gravité latérale le miroir de référence vient en tête offrant les meilleures performances, suivi par RL2, RL3, puis RL1.
- Concernant les fréquences naturelles, RL3 affiche la meilleure performance suivi par RL2, puis le miroir de référence et enfin RL1.

La Figure 2.12 et la Figure 2.13 montrent les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des trois miroirs RL sous l'effet de gravité axiale et latérale, respectivement, après la soustraction des MCR.

Il est à noter que les tendances de déplacements dans les deux cas sont assez similaires à celles du miroir de référence sauf pour RL1. En effet, sous l'effet de la gravité axiale, ce dernier montre des maximums de déplacement aux zones périphériques entre les points de support alors que pour le miroir de référence, RL2, et RL3, le maximum se situe au niveau de la zone centrale.

Sous l'effet de la gravité latérale, aussi, RL1 se distingue par sa tendance de déformée par rapport aux autres miroirs. Avec un affaissement qui s'atténue d'une manière plus abrupte en allant de la périphérie vers le centre.

Ces constatations nous laissent croire que le renforcement par remplissage des cellules est plus efficace au centre qu'en périphérie.

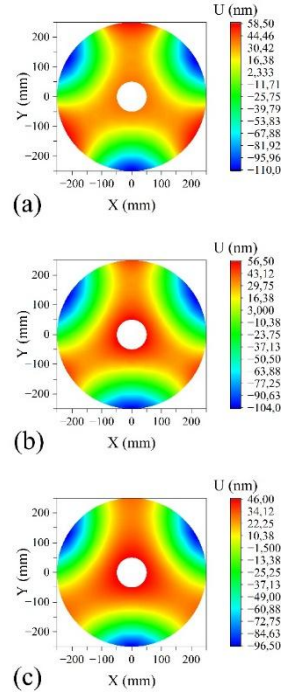


Figure 2.12. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs RL sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) RL1, (b) RL2, et (c) RL3.

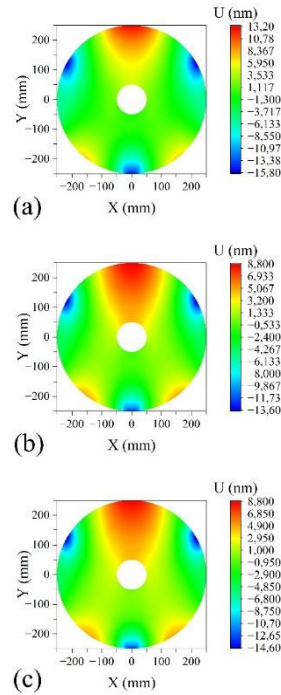


Figure 2.13. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs RL sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) RL1, (b) RL2, et (c) RL3.

L'objectif de ce travail étant d'améliorer les performances sous l'effet de la gravité axiale, on pourrait dire que les trois miroirs RL sont à même de remplir l'objectif assigné avec RL3 étant le plus émérite. Mais cela se fait au détriment du comportement sous l'effet de la gravité latérale gouverné principalement par l'épaisseur de paroi du cœur cellulaire. En effet, le meilleur

performeur de ce point de vue est le miroir de référence avec une épaisseur de paroi de 7.8 mm tandis que les trois miroirs RL ont des parois plus minces.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé des stratégies d'amélioration des performances d'un miroir léger à cœur en nid d'abeille par le moyen de l'insertion de renforcements locaux au niveau du cœur. Un miroir de référence à cœur en nid d'abeille a été conçu et analysé pour en identifier les vulnérabilités et les performances à améliorer. Il en est sorti que, premièrement, les performances sous l'effet de la gravité latérale surpassaient nettement celles sous l'effet de la gravité axiale, deuxièmement, quatre zones vulnérables ont été identifiées sous l'effet de la gravité axiale. Il a été donc décidé de focaliser l'effort de conception sur l'amélioration des performances sous l'effet de la gravité axiale en employant des renforcements locaux du cœur au niveau zones de vulnérabilité identifiées.

Trois miroirs avec trois différentes stratégies de renforcements locaux, appliqués aux cellules du cœur se situant au niveau des zones vulnérables, ont été conçus. Le premier se basant sur le remplissage de ces cellules, le deuxième sur la gradation de la taille des cellules, et le troisième sur l'insertion de raidisseurs au sein de ces cellules.

Les stratégies de renforcements locaux se sont avérées efficaces pour l'amélioration des performances sous l'effet de la gravité axiale avec des améliorations allant jusqu'à 22.07 % pour PV_z et 19.04 % pour RMS_z , avec un gain de 7.33 % en termes de fréquences naturelles, offerts par le troisième miroir (RL3). Cependant, ces stratégies ont détérioré les performances sous l'effet de la gravité latérale à cause de la réduction de l'épaisseur de paroi du cœur en nid d'abeille imposée par l'ajout de matière et la contrainte de masse.

3. Investigations sur l'emploi de cœurs en nid d'abeille hiérarchiques

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une approche innovante pour la conception des miroirs légers destinés aux télescopes spatiaux. Comme évoqué au chapitre 1, les miroirs à cœurs cellulaires en nid d'abeille ont largement contribué à l'essor des missions de télescopes spatiaux, tandis que de nouvelles architectures cellulaires émergent grâce aux avancées des procédés de fabrication, des outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et des méthodes d'optimisation.

Les cœurs cellulaires ne sont pas l'apanage des miroirs de télescopes et trouvent des applications dans de nombreux domaines de l'ingénierie. Une catégorie particulière, les cœurs en nid d'abeille hiérarchiques, suscite un intérêt croissant [129–138]. Ces structures, dérivées des cœurs en nid d'abeille classiques, intègrent des structures hiérarchiques à l'intérieur des cellules hexagonales afin d'en augmenter la rigidité.

Nous explorons, ici, l'utilisation de ces cœurs en nid d'abeille hiérarchiques pour la conception de miroirs légers de télescopes spatiaux. Notre approche consiste à insérer des raidisseurs supplémentaires, moins épais que la paroi du nid d'abeille classique et disposés de manière spécifique, au sein des cellules du cœur en nid d'abeille classique.

Notre objectif est d'évaluer le potentiel d'amélioration des performances optomécaniques des miroirs légers par l'insertion de structures hiérarchiques au sein des cellules d'un cœur en nid d'abeille. Pour ce faire, nous comparons deux stratégies d'amélioration : la réduction de la taille des cellules dans les cœurs en nid d'abeille classiques et l'insertion de structures hiérarchiques au sein de ces cellules sans en modifier la taille.

A cet effet, plusieurs séries de miroirs incorporant des cœurs en nid d'abeille classiques et hiérarchiques, de même diamètre de 500 mm et de masses comparables de $10 \text{ kg} \pm 1\%$, ont été conçus et analysés par MEF en utilisant le software ANSYS. Des hiérarchies à motifs hexachiral, en toile d'araignée, en losanges, et triangulaire ont été étudiées.

Enfin, il est important de souligner que les structures hiérarchiques retenues, l'ont été en tenant compte de la possibilité de les réaliser par les procédés de fabrication utilisés pour les cœurs en

nid d'abeille classiques, tels que l'usinage CNC [93,94] ou la découpe par jet d'eau abrasif (AWJC) [95,96], afin de ne pas introduire de défis technologiques supplémentaires.

Une partie des résultats présentés dans ce chapitre a été publiée dans [139].

3.2 Conception des miroirs légers à cœurs en nid d'abeille classiques et hiérarchiques

Plusieurs configurations de miroirs ont été développées pour cette étude. La Figure 3.1 présente une vue en coupe des miroirs légers conçus. Tous sont de type plan-concave en configuration open-back avec une surface optique parabolique. La plaque avant, un ménisque uniforme de 5 mm d'épaisseur (t), intègre la surface optique et est soutenue par un cœur cellulaire enchâssé entre deux anneaux. L'arrière du miroir reste ouvert. Chaque miroir a un diamètre (D) de 500 mm, des anneaux de 5 mm d'épaisseur (t), et un trou central de 100 mm de diamètre (d). L'épaisseur totale du miroir au bord (T) est de 50 mm.

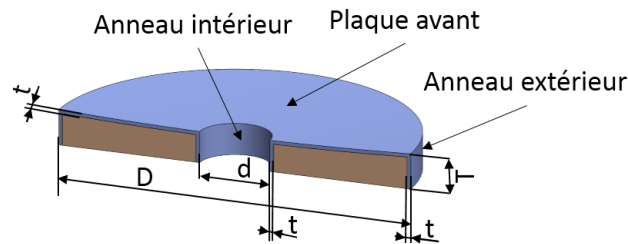


Figure 3.1. Vue en coupe de l'architecture des miroirs conçus mettant en exergue les différents constituants.

Les miroirs se distinguent les uns des autres par la structure de leur cœur cellulaire, répartie en deux catégories : les cœurs en nid d'abeille classiques et les cœurs en nid d'abeille hiérarchiques. Ces différentes configurations sont détaillées ci-après.

3.2.1 Les miroirs à cœurs en nids d'abeille classiques

Quatre miroirs ont été conçus avec des cœurs en nid d'abeille à cellules hexagonales. La Figure 3.2 illustre la cellule représentative avec ses paramètres géométriques ainsi qu'une vue du cœur. Le miroir de référence, est semblable à celui du chapitre 2 (décrit dans 2.2.1), et possède les paramètres : $d_1 = 50$ mm et $t_1 = 7,8$ mm.

Trois autres variantes ont été conçues en réduisant progressivement la taille des cellules en vue d'améliorer les performances. Pour respecter la contrainte de masse fixée à $10 \text{ kg} \pm 1 \%$, l'épaisseur des parois a été ajustée en fonction de la diminution de la taille de cellule. Des tailles

de cellule ($d_1 = 40 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 20 \text{ mm}$) sont considérées. La Figure 3.3 illustre, à titre comparatif, les cellules représentatives à la même échelle pour les quatre miroirs de cette catégorie.

Cette catégorie de miroirs est désignée par NA faisant référence à cœur en Nid d'Abeille, et chaque miroir est désigné par NA- d_1 .

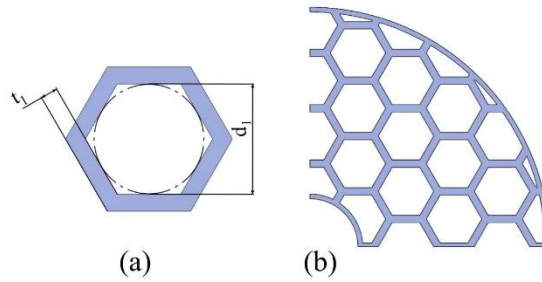


Figure 3.2. Illustrations du cœur en nid d'abeille classique des miroirs NA, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NA-50 est pris pour exemple.

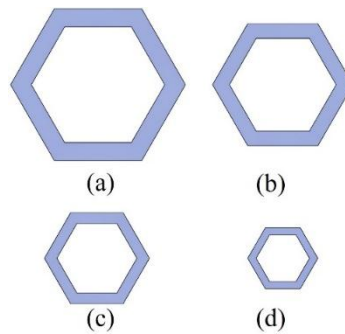


Figure 3.3. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NA à la même échelle, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30 et (d) NA-20.

3.2.2 Les miroirs à cœurs en nids d'abeille hiérarchiques

Les cœurs de ces miroirs intègrent des structures hiérarchiques au sein des cellules hexagonales du nid d'abeille classique sans en modifier la taille. Quatre motifs de hiérarchie ont été explorés : hexa-chiral, en toile d'araignée, en losanges, et triangulaire. Dans ce qui suit, ces configurations sont discutées plus en détail.

3.2.2.1 Hiérarchie à motif hexa-chiral

Dans ce type de cœurs, une cellule circulaire est insérée au centre de la cellule hexagonale originale et lui est concentrique. Elle a un diamètre d_2 inférieur et relié à d_1 par le rapport de

hiérarchie r , tel que décrit par l'équation 3.1. Les cellules circulaires correspondant à deux cellules hexagonales adjacentes sont reliées par des raidisseurs rectilignes qui leur sont tangents. La cellule circulaire insérée ainsi que les raidisseurs additionnels ont une épaisseur de paroi t_2 inférieure et relié à t_1 par le même rapport de hiérarchie r , tel que décrit par l'équation 3.2. La Figure 3.4 illustre la cellule représentative avec ses paramètres géométriques et une vue du cœur incorporant ce type de hiérarchie. La Figure 3.5 illustre, à titre comparatif, les cellules représentatives à la même échelle pour les quatre miroirs de cette catégorie.

Cette catégorie de miroirs est désignée par NAHC, pour Nid d'Abeille hiérarchique à motif Hexa-Chiral et chaque miroir est désigné par NAHC- r .

$$r = \frac{d_1}{d_2} \quad (3.1)$$

$$r = \frac{t_1}{t_2} \quad (3.2)$$

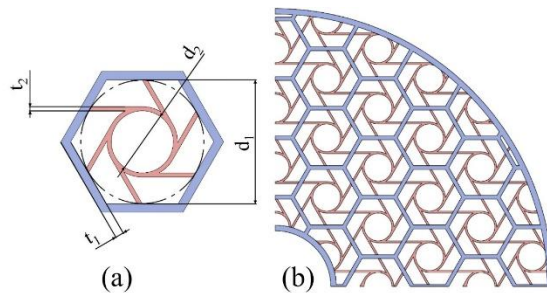


Figure 3.4. Illustrations du cœur en nid d'abeille hiérarchique à motif hexa-chiral des miroirs NAHC, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NAHC-2 est pris pour exemple.

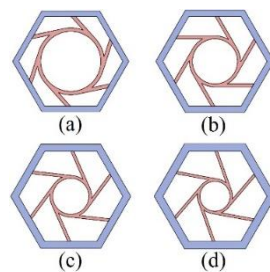


Figure 3.5. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NAHC à la même échelle, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5 et (d) NAHC-3.

3.2.2.2 Hiérarchie à motif en toile d'araignée

Une cellule hexagonale, de taille d_2 inférieure et reliée à d_1 par r (équation 3.1), est insérée au centre de chaque cellule originale. Des raidisseurs, d'épaisseur t_2 inférieure et reliée à t_1 par r (équation 3.2) relient ces deux cellules par les sommets diamétralement opposées. La cellule représentative avec ses paramètres ainsi qu'une vue du cœur incorporant ce type de hiérarchie sont illustrées dans la Figure 3.6. La Figure 3.7 illustre, à titre comparatif, les cellules représentatives à la même échelle pour les quatre miroirs de cette catégorie.

Cette catégorie de miroir est désignée par NATA pour Nid d'Abeille hiérarchique à motif en Toile d'Araignée. Chaque miroir est désigné par NATA-r.

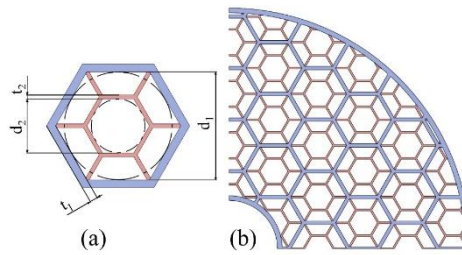


Figure 3.6. Illustrations du cœur en nid d'abeille hiérarchique à motif en toile d'araignée des miroirs NATA, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NATA-2 est pris pour exemple.

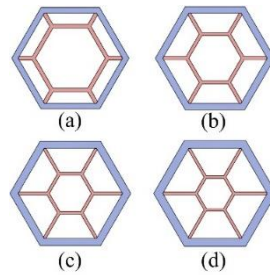


Figure 3.7. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NATA à la même échelle, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5 et (d) NATA-3.

3.2.2.3 Hiérarchie à motif de losanges

Ce type de hiérarchie consiste à diviser la cellule hexagonale originale en trois cellules losangées identiques, par l'insertion de raidisseur d'épaisseur t_2 inférieure et reliée à t_1 par r (équation 3.2), tel qu'illustré dans la Figure 3.8 où l'on peut voir la cellule représentative avec ses paramètres ainsi qu'une vue du cœur incorporant ce type de hiérarchie. La Figure 3.9 illustre, à titre comparatif, les cellules représentatives à la même échelle pour les quatre miroirs de cette catégorie.

Cette catégorie de miroirs est désignée par NAL, pour Nid d'Abeille hiérarchique à motif en Losanges. Chaque miroir est désigné par NAL-r.

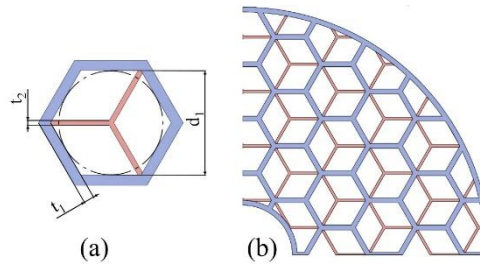


Figure 3.8. Illustrations du cœur en nid d'abeille hiérarchique à motif en losanges des miroirs NAL, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NAL-2 est pris pour exemple.

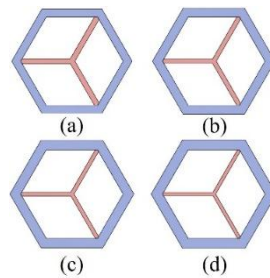


Figure 3.9. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NAL à la même échelle, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5 et (d) NAL-3.

3.2.2.4 Hiérarchie à motif triangulaire

Dans ce type de hiérarchie, la cellule hexagonale originale est divisée en six cellules triangulaires identiques par le moyen de l'insertion de raidisseurs d'épaisseur t_2 inférieure et reliée à t_1 par r (équation 3.2). La Figure 3.10 illustre la cellule représentative avec ses paramètres géométriques additionnée d'une vue du cœur ayant ce type de hiérarchie. La Figure 3.11 illustre, à titre comparatif, les cellules représentatives à la même échelle pour les quatre miroirs de cette catégorie.

Cette catégorie de miroirs est désignée par NAT pour Nid d'Abeille hiérarchique à motif Triangulaire et chacun de ses miroirs par NAT-r.

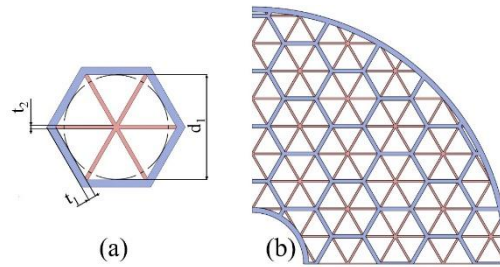


Figure 3.10. Illustrations du cœur en nid d'abeille hiérarchique à motif triangulaire des miroirs NAT, (a) la cellule représentative avec ses paramètres géométriques, et (b) un quart du cœur. NAT-2 est pris pour exemple.

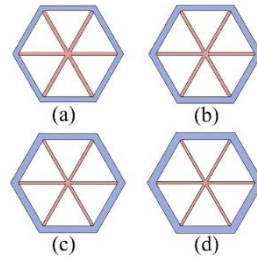


Figure 3.11. Illustrations des cellules représentatives des cœurs pour chacun des miroirs NAT à la même échelle, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5 et (d) NAT-3.

Les paramètres géométriques des différents miroirs conçus ont été affinés de telle sorte qu'ils aient tous une masse comprise dans l'intervalle $10\text{kg} \pm 1\%$. Le Tableau 3.1 dresse les paramètres des différents miroirs conçus ainsi que leurs masses calculées sur la base de la géométrie de chaque miroir et la densité du matériau choisi pour cette étude, en l'occurrence le carbure de silicium SiC ($\rho = 3100 \text{ kg/m}^3$) [116].

Tableau 3.1. Paramètres géométriques et masses des miroirs conçus.

Désignation	r	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	Masse (kg)
Miroirs NA						
NA-50	--	50	--	7.8	--	10.051
NA-40	--	40	--	6.35	--	10.039
NA-30	--	30	--	4.7	--	10.038
NA-20	--	20	--	3.15	--	10.076
Miroirs NAHC						
NAHC-1.5	1.5	50	33.33	2.95	1.96	10.04
NAHC-2	2	50	25	3.45	1.725	10.011
NAHC-2.5	2.5	50	20	3.9	1.56	10.013
NAHC-3	3	50	16.66	4.25	1.41	9.986
Miroirs à cœurs NATA						
NATA-1.5	1.5	50	33.33	3.1	2.06	10.042
NATA-2	2	50	25	3.6	1.8	10.032
NATA-2.5	2.5	50	20	4	1.6	10.018

NATA-3	3	50	16.66	4.4	1.46	10.028
Miroirs NAL						
NAL-1.5	1.5	50	--	4.4	2.93	10.035
NAL-2	2	50	--	4.95	2.475	10.039
NAL-2.5	2.5	50	--	5.3	2.12	10.024
NAL-3	3	50	--	5.6	1.86	10.05
Miroirs NAT						
NAT-1.5	1.5	50	--	3	2	9.955
NAT-2	2	50	--	3.6	1.8	10.052
NAT-2.5	2.5	50	--	4	1.6	10.002
NAT-3	3	50	--	4.4	1.46	10.019

3.3 Analyse des miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques et hiérarchiques par MEF

Tous les miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques et hiérarchiques conçus ont été analysés par MEF avec le software ANSYS. Les propriétés mécaniques du carbure de silicium SiC sont : densité $\rho = 3100 \text{ kg/m}^3$, module d'Young $E = 406 \text{ GPa}$ et coefficient de Poisson $\nu = 0.17$ [116]. Les différents cas de chargement auxquels ils ont été soumis sont :

3.3.1 Cas de chargement 1 : gravité axiale

- Type d'étude : structure statique.
- Charge appliquée : accélération de la gravité terrestre de magnitude 1-g parallèle à l'axe optique (direction z) tel qu'illustré dans la Figure 3.12(a).
- Conditions aux limites : une condition aux limites de type 'support fixe' est appliquée au niveau de trois emplacements à la périphérie du miroir comme on peut le voir dans la Figure 3.12(a).
- Indicateurs de performance : les valeurs PV et RMS de l'erreur de la surface optique, après soustraction des MCR, notées PV_z et RMS_z (équations 2.1 et 2.2, respectivement).

3.3.2 Cas de chargement 2 : gravité latérale

- Type d'étude : structure statique.
- Charge appliquée : accélération de la gravité terrestre de magnitude 1-g perpendiculaire à l'axe optique du miroir (direction y) tel qu'illustré dans la Figure 3.12(b).
- Conditions aux limites : la même condition aux limites de type 'support fixe' du cas de chargement 1 est appliquée aux mêmes localisations (Figure 3.12(b)).

- Indicateurs de performance : les valeurs PV et RMS de l'erreur de la surface optique, après soustraction des MCR, notées PV_Y et RMS_Y (équations 2.3 et 2.4, respectivement).

3.3.3 Cas de chargement 3 : analyse modale

- Type d'étude : modale
- Conditions aux limites : la même condition aux limites de type 'support fixe' des cas de chargement 1 et 2 est appliquée aux mêmes localisations.
- L'indicateur de performance calculé est la fréquence naturelle du premier mode de vibration.

3.3.4 Cas de chargement 4 : pression de polissage

- Type d'étude : structure statique.
- Charge appliquée : pression uniforme de 5 kPa sur la surface optique tel que l'on peut voir dans la Figure 3.12(c).
- Conditions aux limites : Une condition aux limites de type 'support fixe' est appliquée à la surface arrière du miroir comme on peut l'apercevoir dans la Figure 3.12(d).
- L'indicateur de performance pour ce cas de chargement est le déplacement modal maximal de la surface optique, sous l'effet de la pression de polissage, noté U_{max} .

La Figure 3.12(e) illustre un modèle discrétisé.

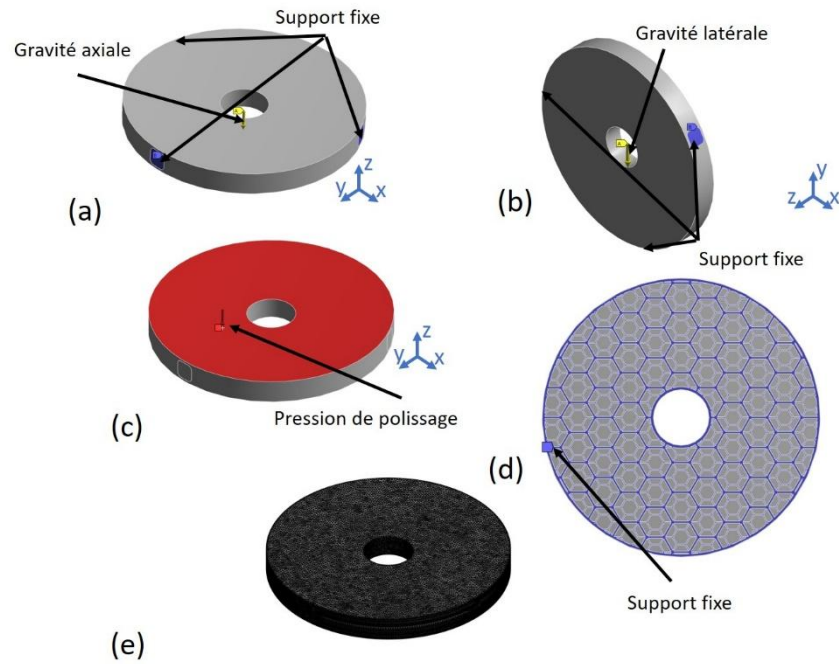


Figure 3.12. Illustration des cas de chargement, (a) cas de chargement 1, (b) cas de chargement 2, (c) pression de polissage du cas de chargement 4, (d) condition aux limites du cas de chargement 4 (NATA-2 est pris pour l'exemple), et (e) un modèle discrétisé.

3.3.5 Analyses de convergence du maillage

Des études de convergence du maillage ont été effectuées pour tous les miroirs en suivant la même procédure décrite dans la section 2.2.2.4. Les modèles de tous les miroirs ont convergé à une taille d'éléments de 2.5 mm. Les nombres d'éléments et de nœuds à la convergence pour chaque miroir sont listés dans le Tableau 3.2. Les figures : Figure 3.13 à Figure 3.17 illustrent les courbes de convergence de maillage respectivement pour les catégories NA, NAHC, NATA, NAL et NAT.

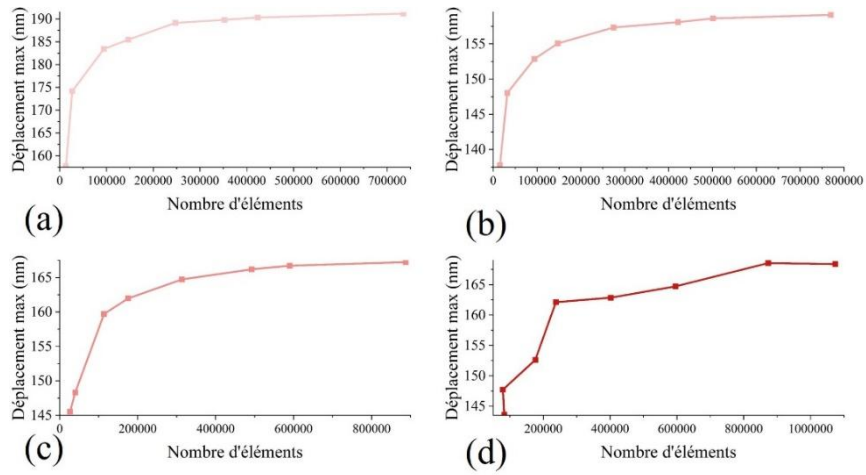


Figure 3.13. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NA, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30, et (d) NA-20.

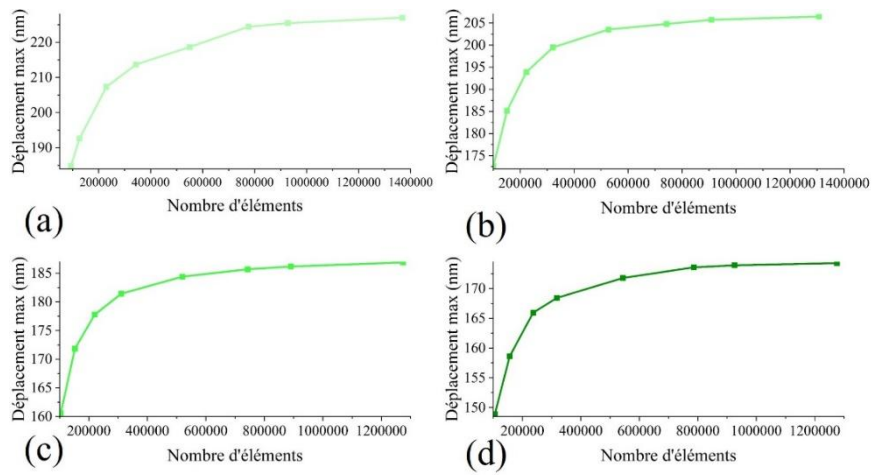


Figure 3.14. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NAHC, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5, et (d) NAHC-3.

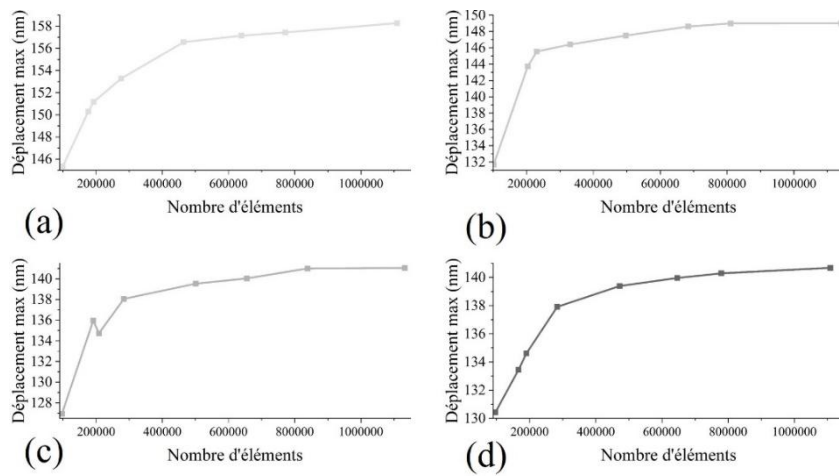


Figure 3.15. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NATA, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5, et (d) NATA-3.

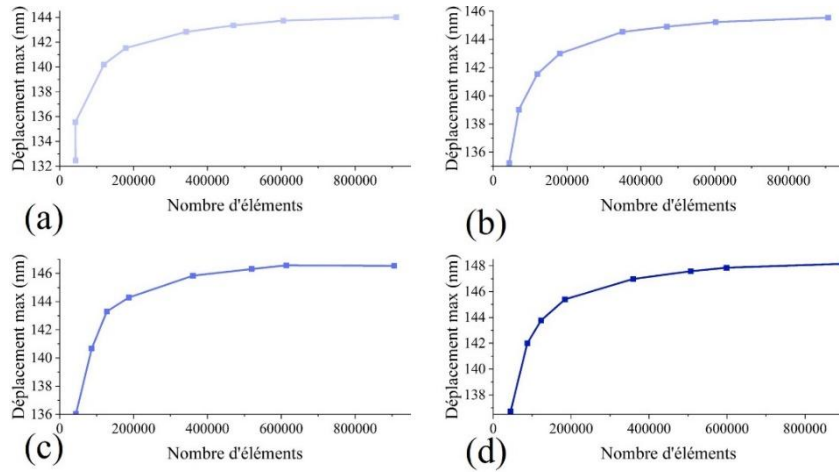


Figure 3.16. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NAL, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5, et (d) NAL-3.

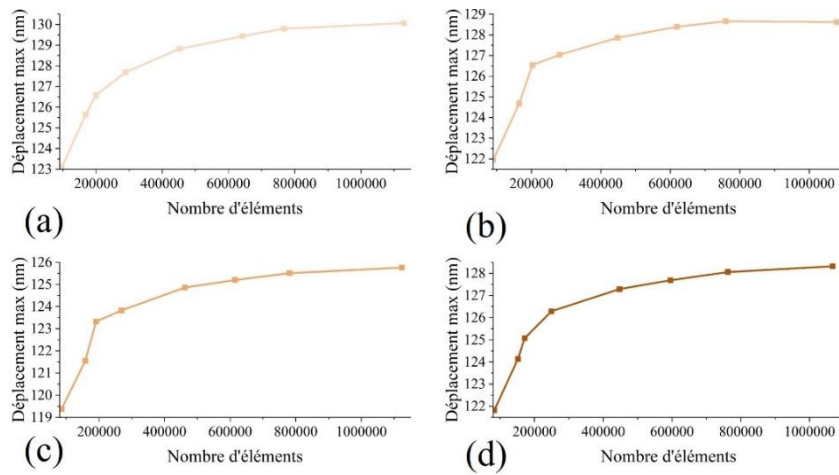


Figure 3.17. Courbes de convergence du maillage pour les miroirs NAT, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5, et (d) NAT-3.

Tableau 3.2. Nombres d'éléments et de nœuds du maillage à la convergence pour tous les miroirs conçus.

Désignation	Nombre d'éléments	Nombre de nœuds
Miroirs NA		
NA-50	352307	621331
NA-40	421700	738708
NA-30	492374	853268
NA-20	595784	1055496
Miroirs NAHC		
NAHC-1.5	775911	1426291
NAHC-2	743781	1364628
NAHC-2.5	744642	1344836
NAHC-3	785176	1403277

Miroirs NATA		
NATA-1.5	639637	1152156
NATA-2	684356	1223128
NATA-2.5	658834	1175812
NATA-3	648199	1157271
Miroirs NAL		
NAL-1.5	470055	837438
NAL-2	470436	836277
NAL-2.5	519927	919381
NAL-3	506727	897493
Miroirs NAT		
NAT-1.5	643896	1154637
NAT-2	621021	1111521
NAT-2.5	616733	1101405
NAT-3	595982	1063826

3.4 Résultats et discussions

Après avoir exécuté tous les modèles éléments finis décrits ci-dessus, les résultats obtenus sont listés dans le Tableau 3.3. La Figure 3.18 illustre ces résultats sous forme de graphiques à barres.

Tableau 3.3. Indicateurs de performances calculés pour les différents miroirs conçus.

Désignation	PV _z (nm)	RMS _z (nm)	PV _y (nm)	RMS _y (nm)	Fréquence naturelle (Hz)	U _{max} (nm)
Miroirs NA						
NA-50	182.34	44.16	20.45	3.74	1338.1	20.78
NA-40	151.56	38.85	21.47	3.93	1431.3	10.79
NA-30	159.18	40.90	21.71	3.91	1387.7	4.09
NA-20	158.02	41.06	21.36	3.82	1378.4	2.62
Miroirs NAHC						
NAHC-1.5	216.37	53.85	23.26	4.12	1216.20	5.97
NAHC-2	197.20	49.71	22.77	4.06	1265.20	3.85
NAHC-2.5	178.60	45.49	22.17	3.96	1324.60	3.16
NAHC-3	166.76	42.81	21.60	3.87	1368.00	2.93
Miroirs NATA						
NATA-1.5	151.30	38.65	25.43	4.51	1439.1	6.43
NATA-2	142.86	36.98	23.62	4.21	1464.9	4.10
NATA-2.5	135.90	35.38	22.05	3.97	1501.8	3.39
NATA-3	135.23	35.41	21.20	3.86	1498.3	3.15
Miroirs NAL						

NAL-1.5	138.56	36.06	21.94	3.96	1484.7	3.41
NAL-2	138.91	36.44	21.54	3.92	1476	3.65
NAL-2.5	140.13	36.59	21.38	3.89	1472.7	3.77
NAL-3	141.48	36.72	21.23	3.87	1470.2	3.94
Miroirs NAT						
NAT-1.5	123.72	30.47	14.19	2.66	1600.9	2.61
NAT-2	122.84	30.31	14.40	2.72	1605.2	2.66
NAT-2.5	121.07	29.89	14.62	2.76	1622	2.78
NAT-3	123.02	30.38	15.04	2.83	1607.3	2.86

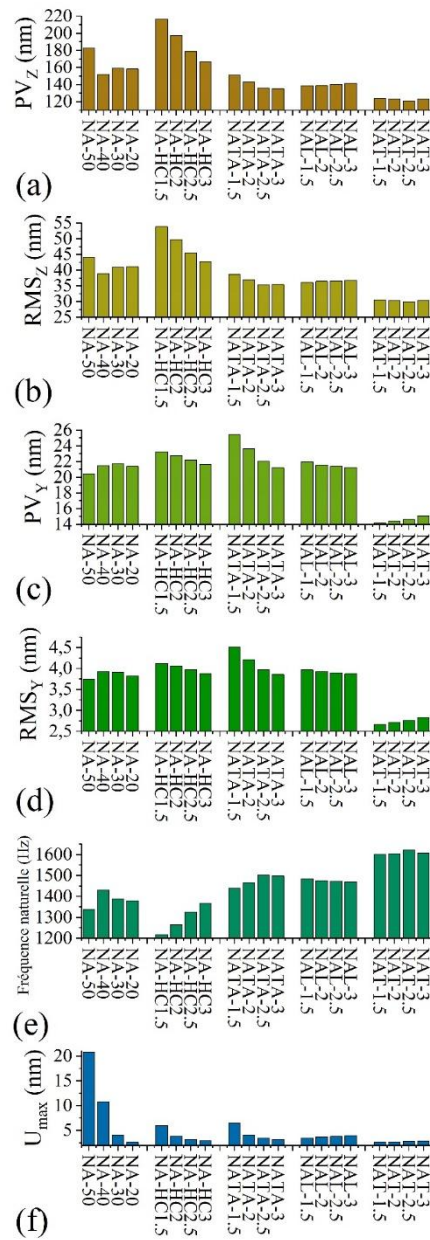


Figure 3.18. Graphiques à barres des indicateurs de performances calculés pour tous les miroirs, (a) PV_z , (b) RMS_z , (c) PV_y , (d) RMS_y , (e) Fréquences naturelles, et (f) U_{max} .

Nous pouvons noter que :

- PV_Z varie entre 121.07 nm et 216.37 nm.
- RMS_Z varie entre 29.89 nm et 53.85 nm.
- PV_Y varie entre 14.19 nm et 25.43 nm.
- RMS_Y varie entre 2.66 nm et 4.51 nm.
- La fréquence naturelle varie entre 1216.2 Hz et 1622 Hz.
- U_{max} varie entre 2.61 nm et 20.78 nm.

Il est à noter que les performances sous l'effet de la gravité latérale PV_Y et RMS_Y sont de loin meilleures que celles sous l'effet de la gravité axiale, en l'occurrence PV_Z et RMS_Z . Ceci a été observé par plusieurs études précédentes [68,78–81,86,87,122,123].

En tenant compte des tolérances de conception les plus sévères (voir 2.2.3), nos miroirs seraient bons pour un fonctionnement dans l'infrarouge moyen, dans des longueurs d'onde autour de 2700 nm pour le moins performant, et 1500 nm pour le meilleur, si l'on considère leurs performances sous l'effet de la gravité axiale. Sous l'effet de la gravité latérale, tous les miroirs sont à même d'opérer dans des longueurs d'onde autour de 225 nm. S'agissant des fréquences naturelles, tous les miroirs étudiés répondent aux tolérances même les plus strictes.

De ce fait, nous allons, dans ce qui suit, privilégier l'amélioration des performances sous l'effet de la gravité axiale plutôt que celles sous l'effet de la gravité latérale.

Pour comparer nos résultats à ceux de la littérature, nous nous référons à des études antérieures traitant de conceptions comparables aux nôtres :

- Chen et al. (2016) [74] décrivent la conception d'un miroir en SiC de 566 mm diamètre avec un cœur en nid d'abeille à cellules triangulaires en configuration semi open-back. Ils rapportent des valeurs de PV_Y passant de 33 nm à 21 nm, et des fréquences naturelles passant de 842.4 Hz à 873.97 Hz, respectivement pour une version initiale du miroir pesant 16.41 kg, et une version optimisée pesant 12.58 kg.
- Dong et al. (2023) [26] rapportent des valeurs de RMS_Z de 39.56 nm et 33.395 nm et des fréquences naturelles de 1169.7 Hz et 1387.7 Hz, respectivement pour la version initiale pesant 15.871 kg, et la version optimisée pesant 15.855 kg, d'un miroir en SiC de 672 mm avec un cœur en nid d'abeille à cellules triangulaires en configuration semi open-back.

- Dong et al. (2025) [140] présentent trois version d'un miroir en SiC de 672 mm à cœur en nid d'abeille à cellules triangulaires. La première a une configuration semi open-back et pèse 15.84 kg, la seconde est de type sandwich et pèse 18.06 kg, et la troisième, optimisée, de géométrie complexe pèse 11.03 kg. Ils rapportent des performances en termes de RMS_Z de 39.6 nm, 117.67 nm, et 30.65 nm, respectivement pour ces trois versions. Ainsi qu'une fréquence naturelle de 716.84 Hz, pour la version optimisée.
- Notons, toutefois, que Dong et al. (2023) [26] et Dong et al. (2025) [140], utilisent dans leurs études une configuration de montage différentes de celle que nous utilisons. Leurs miroirs sont montés axialement par l'arrière en trois points.

Plus concrètement, si l'on rapporte les masses de ces miroirs à leurs diamètres en calculant leurs densités surfaciques DS donnée par l'équation 3.3 :

$$DS = \frac{m}{A} \quad (3.3)$$

où m est la masse et A est l'aire de l'ouverture du miroir, l'on obtient

- Chen et al. (2016) [74] :
 - Version initiale : $DS = 65.25 \text{ kg/m}^2$, $PV_Y = 33 \text{ nm}$, fréquence naturelle 842.4 Hz.
 - Version optimisée : $DS = 50.02 \text{ kg/m}^2$, $PV_Y = 21 \text{ nm}$, fréquence naturelle 873.97 Hz.
- Dong et al. (2023) [26] :
 - Version initiale : $DS = 44.77 \text{ kg/m}^2$, $RMS_Z = 39.56 \text{ nm}$, fréquence naturelle 1169.7Hz.
 - Version optimisée : $DS = 44.72 \text{ kg/m}^2$, $RMS_Z = 33.395 \text{ nm}$, fréquence naturelle 1387.7.
- Dong et al. (2025) [140] :
 - Version 1 : $DS = 44.68 \text{ kg/m}^2$, $RMS_Z = 39.6 \text{ nm}$.
 - Version 2 : $DS = 44.72 \text{ kg/m}^2$, $RMS_Z = 117.67 \text{ nm}$.
 - Version 3 : $DS = 31.11 \text{ kg/m}^2$, $RMS_Z = 30.65 \text{ nm}$ fréquence naturelle 716.84 Hz.
- Nos résultats :
 - $DS = 50.95 \text{ kg/m}^2$, PV_Y varie entre 14.19 nm et 25.43 nm, RMS_Z varie entre 29.89 nm et 53.85 nm, et les fréquences naturelle varient 1216.2 Hz et 1622 Hz.

Dans ce qui suit, une analyse plus approfondie des résultats par catégorie de miroirs est dressée.

3.4.1 Miroirs NA

L'analyse des performances des miroirs à cœurs en nid d'abeille permet de noter ce qui suit, avec la réduction de la taille de cellule :

- PV_Z s'améliore avec NA-40 affichant 151.56 nm par rapport à NA-50 qui affiche 182.34 nm puis régresse pour NA-30 et NA-20 qui affichent, respectivement, 159.18 nm et 158.02 nm mais qui performant, néanmoins, mieux que NA-50. Notons, toutefois, que NA-20 est supérieur à NA-30.
- La même tendance est observée pour RMS_Z avec NA-40 affichant la meilleure performance de 38.85 nm contre 44.16 nm pour NA-50, 40.90 nm pour NA-30 et 41.06 nm pour NA-20. Tout comme pour PV_Z , NA-30 et NA-20 performant mieux que NA-50 mais cette fois-ci NA-30 surpassant NA-20.
- Pour PV_Y , la meilleure performance est enregistrée par NA-50 avec 20.45 nm. Les valeurs régressent pour NA-40 et NA-30 avec, respectivement, 21.47 nm et 21.76 nm. NA-20 surpasse NA-40 et NA-30 avec une performance de 21.36 nm.
- Concernant RMS_Y , la meilleure performance est aussi enregistrée par NA-50 avec 3.74 nm. Pour le reste, de NA-40 à NA-20, en passant par NA-30, les performances s'améliorent, elles sont, respectivement, de 3.93 nm, 3.91 nm et 3.82 nm.
- Les fréquences naturelles ont la même tendance que RMS_Z , NA-40 affichant une amélioration comparativement à NA-50 avec 1431.3 Hz contre 1338.1 Hz. NA-30 et NA-20, aussi, surpassent NA-50 mais pas NA-40, NA-30 surpassant NA-20 avec, respectivement 1387.7 Hz et 1378.4 Hz.
- Les valeurs de U_{max} , quant à elles, s'améliorent avec la réduction de la taille de cellule avec des valeurs respectives de 20.78 nm, 10.79 nm, 4.09 nm et 2.62 nm pour NA-50, NA-40, NA-30 et NA-20.

Si l'on considère les performances sous l'effet de la gravité axiale, en l'occurrence PV_Z et RMS_Z , les fréquences naturelles et le déplacement maximal sous l'effet de la pression de polissage, on constate que la réduction de la taille de cellule permet une amélioration des performances. En effet, dans ces cas de figure, NA-40, NA-30 et NA-20 surpassent NA-50. Toutefois, la réduction de la taille de cellule entre NA-40 d'une part, et NA-30 et NA-20 d'autre part, ne permet pas cette amélioration. Par ailleurs, dans l'ensemble, NA-20 affiche de

meilleures performances que NA-30 vérifiant cette affirmation. En ce qui concerne $U_{\max}$, la performance est gouvernée par la taille de cellule.

De ces observations, nous pouvons conclure que, pour les miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques, la taille de cellule et l'épaisseur de paroi sont tous les deux importants pour le comportement sous l'effet de la gravité axiale et le comportement modal. Un équilibre a été atteint par NA-40 parmi les miroirs étudiés.

Si, en revanche, l'on considère les performances sous l'effet de la gravité latérale, en l'occurrence PV_Y et RMS_Y , la réduction de la taille de cellule ne permet aucune amélioration des performances. Au contraire, celles-ci empirent avec la réduction de la taille de cellule pour tous les miroirs. Ceci est dû à la réduction de l'épaisseur de paroi, or, c'est celle-ci qui gouverne ces performances.

Etant donné l'importance que nous accordons à l'amélioration des performances sous l'effet de la gravité axiale, le miroir offrant les meilleures performances de cette catégorie et NA-40.

La Figure 3.19 et la Figure 3.20 illustrent, respectivement, les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des quatre miroirs NA sous l'effet de la gravité axiale et latérale, après soustraction des MCR. Les tendances des déformées sont assez similaire et conformes à celles du miroir de référence du chapitre 2 (2.2.3).

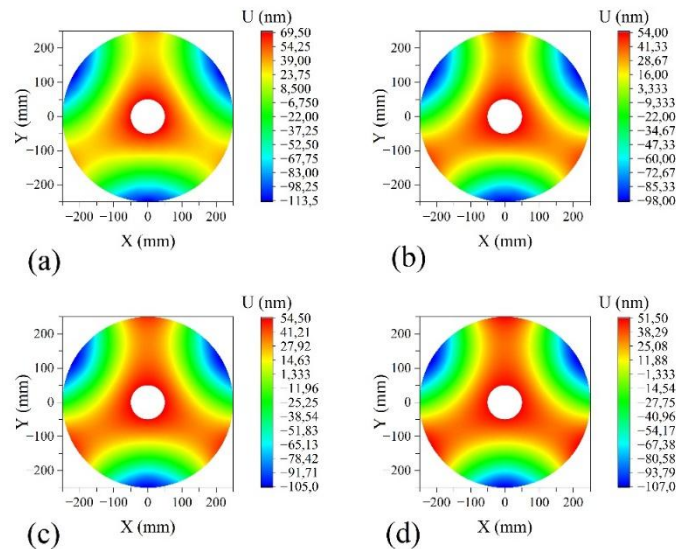


Figure 3.19. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NA sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30, et (d) NA-20.

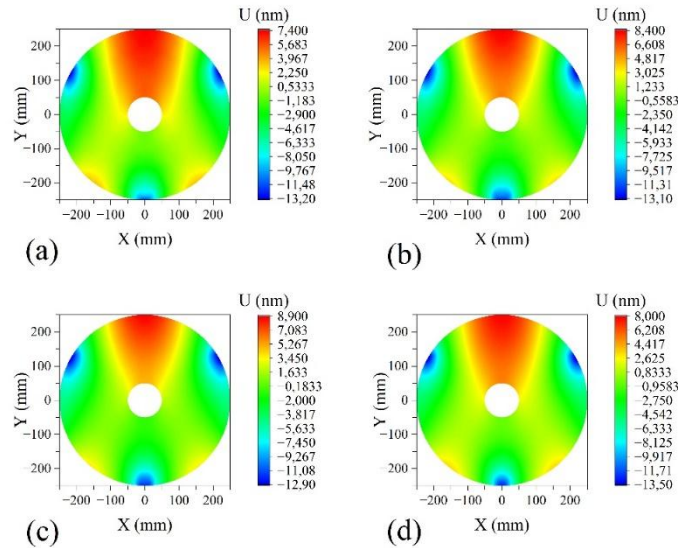


Figure 3.20. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NA sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30, et (d) NA-20.

Dans la Figure 3.21, on peut apercevoir des tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs à cœurs en nid d'abeille sous l'effet de la pression de polissage. On remarque que la surface s'affaisse au niveau du centre de chaque cellule hexagonale de manière assez similaire pour tous les miroirs NA. Avec, toutefois des différences d'étendue et de magnitude qui s'expliquent par les différences de la Surface Supportée Projetée (SSP) de chaque cœur qui se définit par la projection sur un plan de la portion de la surface optique supportée par les paroi d'une cellule normale du cœur. La Figure 3.22 illustre la SSP pour les miroirs NA. Et le Tableau 3.4 récapitule les aires des SSP des différents miroirs NA. Notons que l'étendue et la magnitude de l'affaissement de la surface sous l'effet de la pression de polissage sont corrélées à S_1 . Par exemple NA-50 possède une aire de SSP, S_1 de 2165.06 mm² et affiche des affaissements étendus et de grandes magnitudes, tandis que NA-20, avec $S_1 = 346.21$ mm², montre des affaissements nettement moins étendus et de plus faible magnitude.

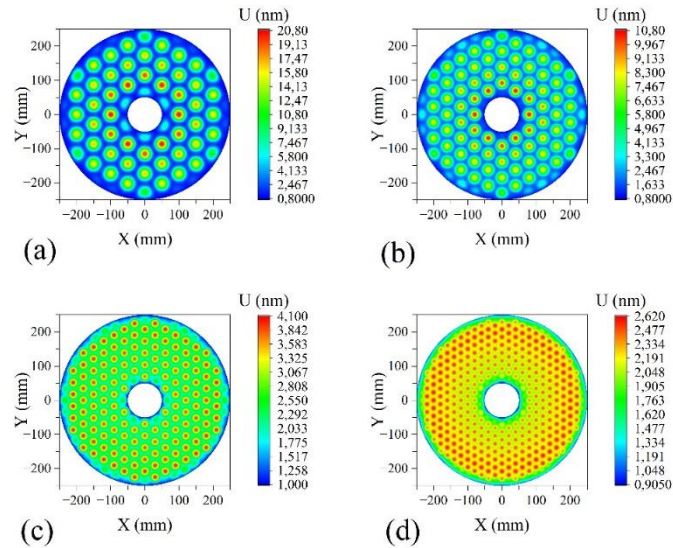


Figure 3.21. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NA sous l'effet de la pression de polissage, (a) NA-50, (b) NA-40, (c) NA-30, et (d) NA-20.

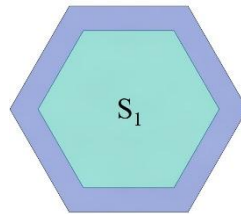


Figure 3.22. Illustration de la SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NA.

Tableau 3.4. Aires des SSP pour les miroirs NA.

Désignation	S_1 (mm ²)
NA-50	2165.06
NA-40	1385.64
NA-30	779.42
NA-20	346.41

3.4.2 2.2.3 Miroirs NAHC

Pour cette catégorie de miroir, on peut noter qu'à mesure que le rapport de hiérarchie augmente, les performances s'améliorent. En effet :

- PV_z passe de 216.37 nm pour NAHC-1.5 à 166.76 nm NAHC-3 en passant par 197.20 nm pour NAHC-2 et 178.60 nm pour NAHC-2.5.
- De même, RMS_z passe de 53.85 nm pour NAHC-1.5 à 42.81 nm NAHC-3 en passant par 49.71 nm pour NAHC-2 et 45.49 nm pour NAHC-2.5.

- La même tendance est observée pour PV_Y qui passe de 23.26 nm pour NAHC-1.5 à 21.60 nm NAHC-3 en passant par 22.77 nm pour NAHC-2 et 22.17 nm pour NAHC-2.5.
- Ne dérogeant pas à la règle, RMS_Y passe de 4.12 nm pour NAHC-1.5 à 3.87 nm NAHC-3 en passant par 4.06 nm pour NAHC-2 et 3.96 nm pour NAHC-2.5.
- Les fréquences naturelles, aussi, évoluent de la même façon, elles vont de 1216.20 Hz pour NAHC-1.5 à 1368.00 Hz pour NAHC-3 en passant par 1265.20 Hz pour NAHC-2 et 1324.60 Hz pour NAHC-2.5.
- Les valeurs de U_{max} , aussi, suivent cette tendance avec des valeurs allant de 5.97 nm pour NAHC-1.5 à 2.93 nm NAHC-3 en passant par 3.85 nm pour NAHC-2 et 3.16 nm pour NAHC-2.5.

Une analyse plus approfondie révèle une forte corrélation entre le rapport de hiérarchie, la taille de la cellule circulaire introduite (d_2), les épaisseurs de parois (t_1 , t_2), et les performances du miroir. En effet, plus la taille d_2 est petite, meilleures sont les performances. Aussi, plus l'épaisseur t_1 est importante et t_2 réduite en conséquence, mieux performe le miroir.

Le miroir offrant les meilleures performances de cette catégorie est NAHC-3.

La Figure 3.23 et la Figure 3.24 représentent les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs NAHC sous l'effet de la gravité axiale et latérale, respectivement, après soustraction des MCR. Les distributions des déplacements nodaux des surfaces optiques de ces miroirs sont assez similaires à celles des miroirs NA et celles du miroir de référence du chapitre 2 (2.2.3).

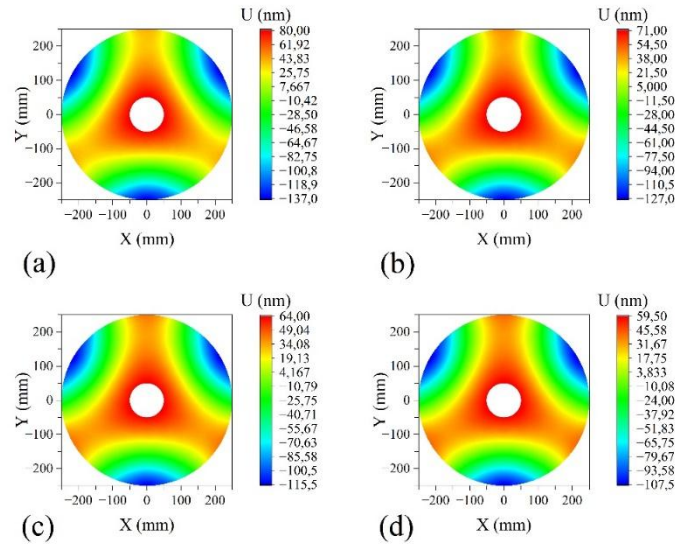


Figure 3.23. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAHC sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5, et (d) NAHC-3.

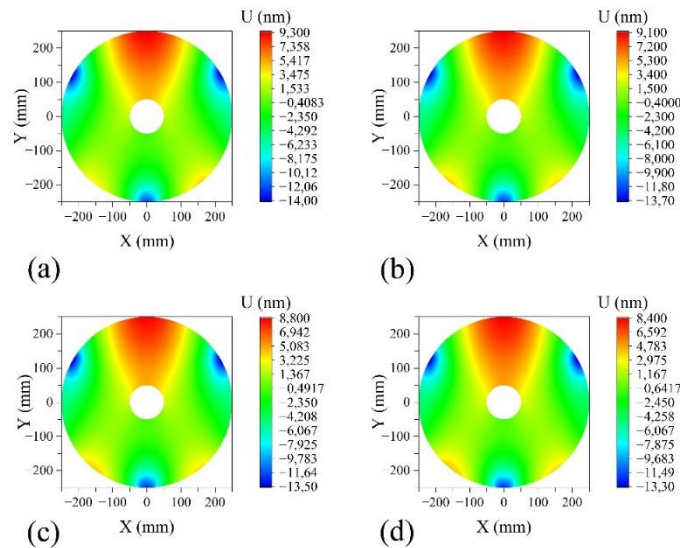


Figure 3.24. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAHC sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5, et (d) NAHC-3.

La Figure 3.25 illustre les tracés de contour des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs NAHC sous l'effet de la pression de polissage. On remarque qu'il y a des nuances entre les différents miroirs de cette catégorie. En effet, pour NAHC-1.5 et NAHC-2, des affaissements sont observés aux centres des cellules circulaires introduites. Tandis que pour NAHC-2.5, on observe aussi des affaissements au niveau des cellules les entourant qui s'accroissent pour NAHC-3.

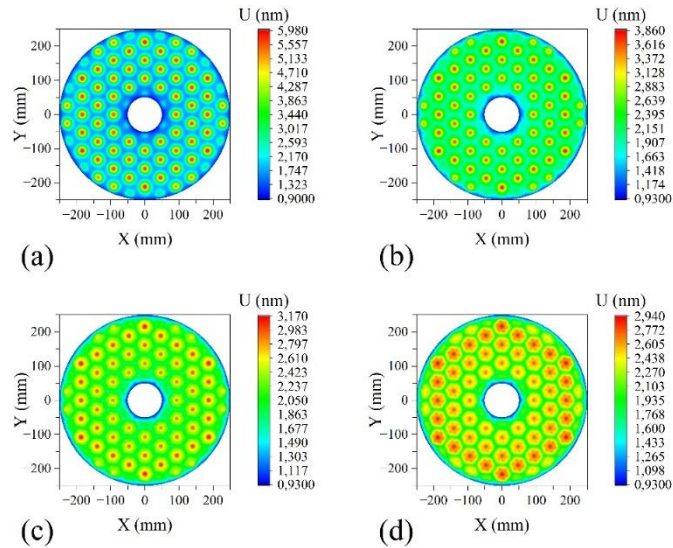


Figure 3.25. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAHC sous l'effet de la pression de polissage, (a) NAHC-1.5, (b) NAHC-2, (c) NAHC-2.5, et (d) NAHC-3.

Pour expliquer ceci, nous nous référons à la distribution et aires des SSP. La Figure 3.26 illustre les SSP au sein d'une cellule représentative d'un miroir NAHC. Le Tableau 3.5 liste les aires des SSP pour les différents miroirs NAHC.

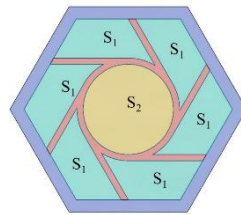


Figure 3.26. Illustration des SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NAHC.

Tableau 3.5. Aires des SSP pour les miroirs NAHC.

Désignation	S_1 (mm ²)	S_2 (mm ²)
NAHC-1.5	155.18	872.66
NAHC-2	226.60	490.87
NAHC-2.5	261.78	314.16
NAHC-3	282.89	218.17

Comme nous pouvons constater, pour NAHC-1.5 et NAHC-2, l'aire S_2 est largement plus importante que S_1 ce qui explique que la surface a tendance à s'affaisser de façon très marquée au niveau de la cellule circulaire correspondant à S_2 . Par contre, pour NAHC-2.5, les valeurs sont assez proches d'où l'apparition des affaissements entourant la cellule circulaire. Enfin, pour NAHC-3, S_1 dépasse S_2 expliquant les affaissements périphériques à la cellule circulaire plus marqués avec, toutefois, les affaissements les plus importants correspondants à la cellule

circulaire du fait de la distribution des affaissements périphériques sur les six cellules périphériques.

3.4.3 Miroirs NATA

L'analyse des résultats pour cette catégorie de miroirs montre une tendance générale d'amélioration des performances avec l'augmentation du rapport de hiérarchie avec quelques exceptions. En effet :

- Les valeurs de PV_Z sont comprises dans l'intervalle allant de 151.30 nm pour NATA-1.5 à 135.23 nm pour NATA-3 avec NATA-2 et NATA-2.5 présentant des valeurs respectives de 142.68 nm et 135.90 nm.
- Les valeurs de RMS_Z progressent de 38.65 nm pour NATA-1.5 à 35.38 nm pour NATA-2.5 qui affiche une valeur légèrement meilleure que celle de NATA-3 qui est de 35.41 nm, tandis que NATA-2 affiche 36.98 nm.
- PV_Y suit la même tendance que PV_Z avec des valeurs allant de 25.43 nm pour NATA-1.5 à 21.20 nm pour NATA-3, en passant par 23.62 nm pour NATA-2 et 22.05 nm pour NATA-2.5.
- RMS_Y ne déroge pas à cette règle avec des valeurs allant de 4.51 nm pour NATA-1.5 à 3.86 nm pour NATA-3, en passant par 4.21 nm pour NATA-2 et 3.97 nm pour NATA-2.5.
- Pour les fréquences naturelles, NATA-2.5 affiche une performance légèrement meilleure que celle de NATA-3 avec, respectivement 1501.8 Hz et 1498.3 Hz. Quant à NATA-1.5, il affiche la plus faible performance avec 1439.1 Hz, tandis que NATA-2 a une valeur de 1464.9 Hz.
- S'agissant de U_{max} , les valeurs vont de 6.43 nm pour NATA-1.5 à 3.15 nm pour NATA-3. NATA-2 et NATA-2.5 affichent respectivement des valeurs de 4.10 nm et 3.39 nm.

Une tendance générale se dégage de ces remarques. Il existe des corrélations entre, d'une part, le rapport de hiérarchie (r), la taille de la cellule hexagonale introduite (d_2), les épaisseurs de parois (t_1 et t_2), et les performances, d'autre part, avec quelques exceptions (RMS_Z et fréquence naturelle). A mesure que le rapport de hiérarchie augmente, entraînant la diminution de d_2 , l'augmentation de t_1 et la réduction de t_2 , les performances s'améliorent.

Tenant compte de l'importance que nous accordons à l'amélioration du comportement sous l'effet de la gravité axiale, le miroir offrant les meilleures performances de cette catégorie est NATA-2.5.

La Figure 3.27 et la Figure 3.28 représentent les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs NATA sous l'effet de la gravité axiale et latérale, respectivement, après soustraction des MCR. Celles-ci montrent des tendances similaires à celles des miroirs NA, NAHC et le miroir de référence du chapitre 2 (2.2.3).

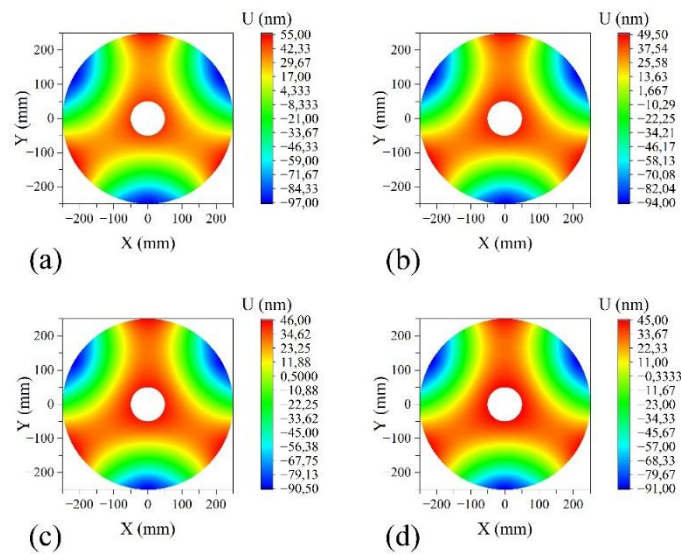


Figure 3.27. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NATA sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5, et (d) NATA-3.

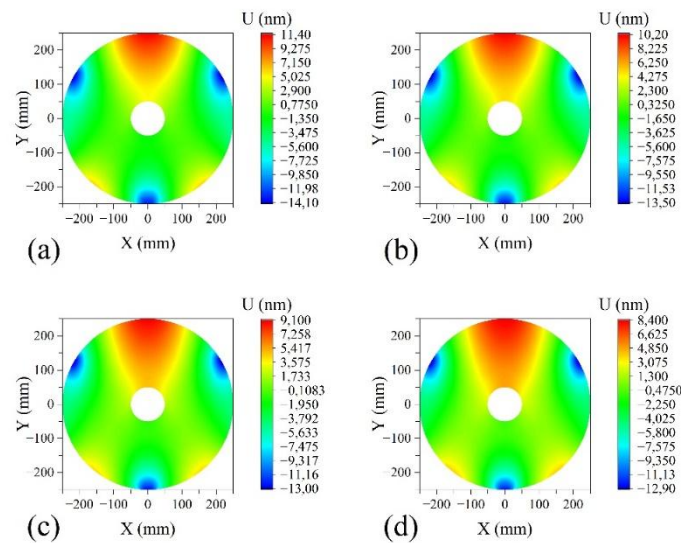


Figure 3.28. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NATA sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5, et (d) NATA-3.

La Figure 3.29 illustre les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs NATA sous l'effet de la pression de polissage. La Figure 3.30 représente les SSP dans la cellule représentative des miroirs NATA et le Tableau 3.6 liste leurs aires.

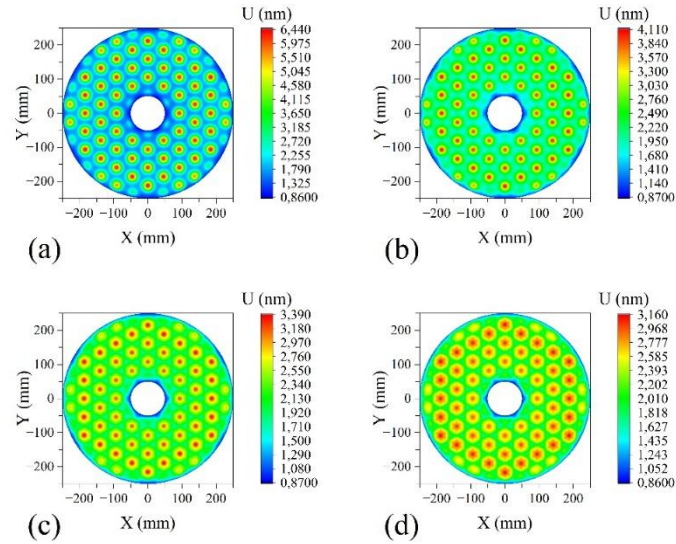


Figure 3.29. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NATA sous l'effet de la pression de polissage, (a) NATA-1.5, (b) NATA-2, (c) NATA-2.5, et (d) NATA-3.

La même tendance que pour les miroirs NAHC est observée. Pour NATA-1.5 et NATA-2, on observe des affaissements prononcés au niveau des cellules hexagonales centrales expliqués par le fait que S_2 soit très grande devant S_1 . Des affaissements périphériques correspondant aux cellules trapézoïdales entourant la cellule hexagonale centrale qui s'expliquent par les valeurs proches de S_1 et S_2 , sont constatés pour NATA-2.5. Ces affaissements périphériques sont plus prononcés pour NATA-3 du fait que S_1 soit légèrement plus grande que S_2 .

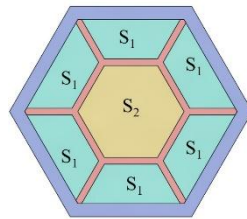


Figure 3.30. Illustration des SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NATA.

Tableau 3.6. Aires des SSP pour les miroirs NATA.

Désignation	S_1 (mm ²)	S_2 (mm ²)
NATA-1.5	143.28	962.25
NATA-2	220.54	541.27
NATA-2.5	258.40	346.41
NATA-3	279.65	240.56

3.4.4 Miroirs NAL

- La meilleure performance en terme de PV_Z est atteinte par NAL-1.5 affichant 138.56 nm, puis elle décline à mesure que le rapport de hiérarchie (r) augmente avec des valeurs de 138.91 nm, 140.13 nm, et 141.48 nm respectivement pour NAL-2, NAL-2.5, et NAL-3.
- Pour ce qui est de RMS_Z , la même tendance est observée avec des valeurs de 36.06 nm, 36.44 nm, 36.59 nm, et 36.72 nm, respectivement pour NAL-1.5, NAL-2, NAL-2.5, et NAL-3.
- les valeurs de PV_Y , en revanche s'améliorent avec l'augmentation du rapport de hiérarchie (r). elles vont de 21.94 nm pour NAL-1.5 à 21.23 pour NAL-3 en passant par 21.54 nm pour NAL-2 et 21.38 nm pour NAL-2.5.
- De même, les valeurs de RMS_Y , s'améliorent de 3.96 nm à 3.87 nm pour, NAL-1.5 et NAL-3 respectivement, avec NAL-2 et NAL-2.5 affichant respectivement 3.92 nm et 3.89 nm.
- Sur le plan des fréquences naturelles, de la même façon que PV_Z et RMS_Z , elles régressent avec l'augmentation du rapport de hiérarchie (r) avec des valeurs respectives pour NAL-1.5, NAL-2, NAL-2.5 et NAL-3 de 1484.7 Hz, 1476 Hz, 1472.7 Hz et 1470.2 Hz.
- Les valeurs de U_{max} , aussi, empiront à mesure que le rapport de hiérarchie augmente. les valeurs enregistrées étant de 3.41 nm, 3.65 nm, 3.77 nm, et 3.94 nm respectivement pour NAL-1.5, NAL-2, NAL-2.5 et NAL-3.

Pour le cas des miroirs NAL, on ne peut pas conclure à quelque corrélation. En effet PV_Z , RMS_Z , les fréquences naturelles et U_{max} régressent à mesure que le rapport de hiérarchie (r) augmente, tandis que PV_Y et RMS_Y s'améliorent avec son augmentation.

NAL-1.5 affichant les meilleures performances sous l'effet de la gravité axiale ainsi que la meilleure fréquence naturelle, nous le considérons comme le meilleur performeur de cette catégorie de miroirs.

La Figure 3.31 et la Figure 3.32 illustrent les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs NAL, respectivement, sous l'effet de la gravité axiale et latérale, après soustraction des mouvements de corps rigides, montrant les mêmes tendances observées précédemment.

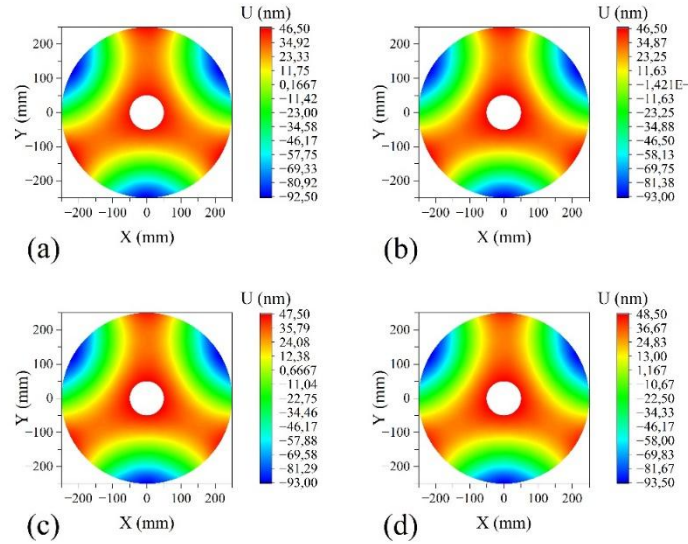


Figure 3.31. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAL sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5, et (d) NAL-3.

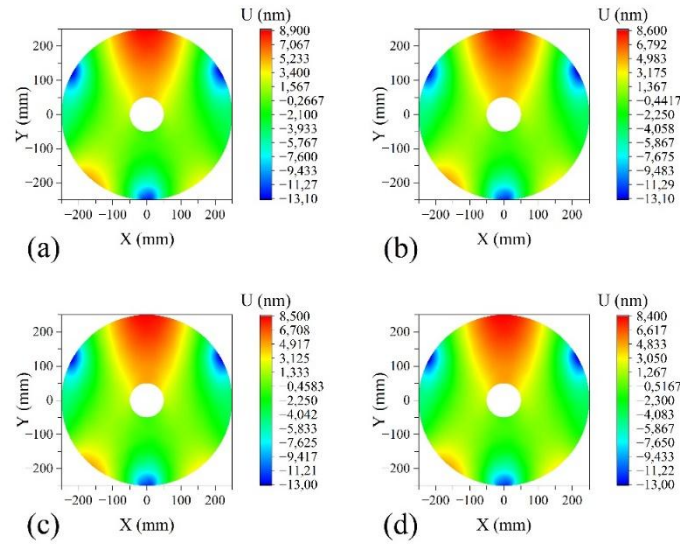


Figure 3.32. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAL sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5, et (d) NAL-3.

La Figure 3.33 montre les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs NAL sous l'effet de la pression de polissage. La Figure 3.34 affiche la configuration de la SSP pour ces miroirs et le Tableau 3.7 en récapitule les aires pour chaque miroir NAL.

Nous observons des affaissements au niveau des sous cellules en forme de losange avec différentes étendues et intensités en fonction de S_1 . En effet, NAL-1.5, avec $S_1 = 639.49 \text{ mm}^2$ manifeste des affaissements moins étendus et moins intenses que ceux de NAL-3, pour lequel S_1 est de 668.81 mm^2 .

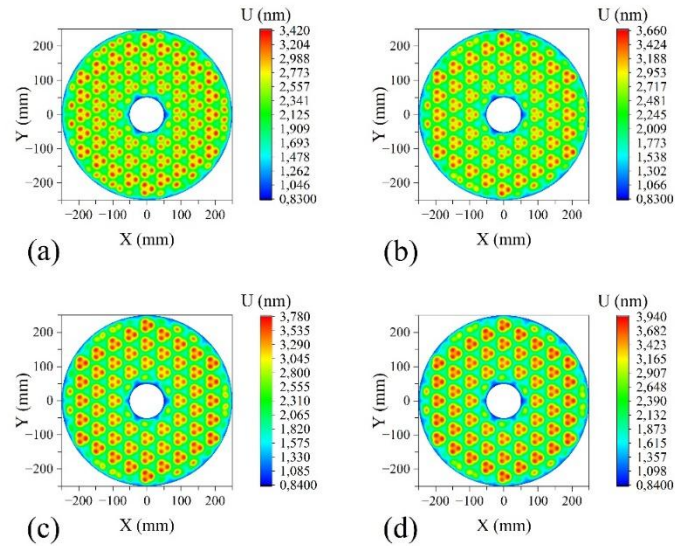


Figure 3.33. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAL sous l'effet de la pression de polissage, (a) NAL-1.5, (b) NAL-2, (c) NAL-2.5, et (d) NAL-3.

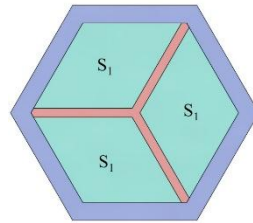


Figure 3.34. Illustration de la SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NATA.

Tableau 3.7. Aires des SSP pour les miroirs NAL.

Désignation	S_1 (mm ²)
NAL-1.5	639.49
NAL-2	651.99
NAL-2.5	661.79
NAL-3	668.81

3.4.5 Miroirs NAT

- PV_z s'améliore entre NAT-1.5 et NAT-2.5 puis régresse pour NAT-3. En effet NAT-1.5, NAT-2 et NAT-2.5 affichent des valeurs respectives de 123.72 nm, 122.84 nm et 121.07 nm mais NAT-3 affiche une valeur supérieure à celles de NAT-2 et NAT-2.5, de 123.02 nm.
- Pareil pour RMS_z dont les valeurs pour NAT-1.5, NAT-2 et NAT-2.5 sont, respectivement, de 30.47 nm, 30.31 nm et 29.89 nm tandis que celle pour NAT-3, supérieure à celle de NAT-2 et NAT-2.5, est de 30.38 nm.

- PV_Y , en revanche, régresse avec l'augmentation du rapport de hiérarchie (r) passant de 14.19 nm pour NAT-1.5 à 15.04 nm pour NAT-3 avec NAT-2 et NAT-2.5 enregistrant, respectivement, 14.40 nm et 14.62 nm.
- De même pour RMS_Y , les performances empirent avec l'augmentation du rapport de hiérarchie (r). Elles passent de 2.66 nm pour NAT-1.5 à 2.83 nm pour NAT-3, NAT-2 et NAT-2.5 ayant des valeurs respectives de 2.72 nm et 2.76 nm.
- S'agissant des fréquences naturelles, celles-ci évoluent de la même façon que PV_Z et RMS_Z avec la meilleure performance, de 1622 Hz, enregistrée par NAT-2.5. NAT-1.5, NAT-2 et NAT-3 ayant enregistré des performances respectives de 1600.9 Hz, 1605.2 Hz et 1607.3 Hz.
- U_{max} affiche la même tendance que PV_Y et RMS_Y régressant avec l'accroissement de r , allant de 2.61 nm pour NAT-1.5 à 2.86 nm pour NAT-3 en passant par 2.66 nm pour NAT-2 et 2.78 nm pour NAT-2.5.

Il existe une corrélation entre le rapport de hiérarchie (r) et les épaisseurs de parois d'une part, et les performances de l'autre part. En effet avec l'augmentation de (r), entraînant l'augmentation de (t_1) et la réduction (t_2), PV_Y , RMS_Y et U_{max} régressent pour tous les miroirs de cette catégorie. En revanche, PV_Z , RMS_Z et la fréquence naturelle s'améliorent entre NAT-1.5 et NAT-2.5 mais régressent, ensuite pour NAT-3.

La Figure 3.35 et la Figure 3.36 illustrent les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs NAT, respectivement, sous l'effet de la gravité axiale et latérale, après soustraction des MCR, montrant les mêmes tendances observées précédemment.

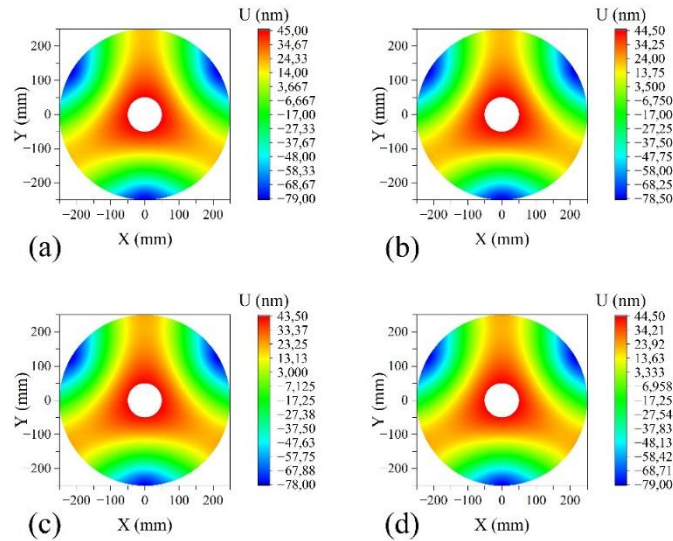


Figure 3.35. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAT sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5, et (d) NAT-3.

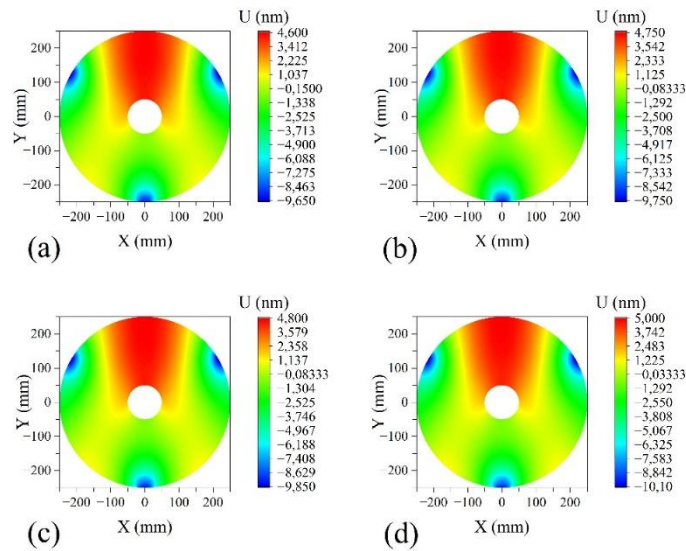


Figure 3.36. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAT sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5, et (d) NAT-3.

La Figure 3.37 montre les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs NAT sous l'effet de la pression de polissage. La Figure 3.38 affiche la configuration de la SSP pour ces miroirs et le Tableau 3.8 en récapitule les aires pour chaque miroir NAT.

Nous observons des affaissements au niveau des sous cellules triangulaires avec différentes étendues et magnitudes en fonction de S_1 . En effet, NAT-1.5, avec $S_1 = 305.42 \text{ mm}^2$ manifeste des affaissements moins étendus et moins intenses que ceux de NAT-3, pour lequel S_1 est de 319.75 mm^2 .

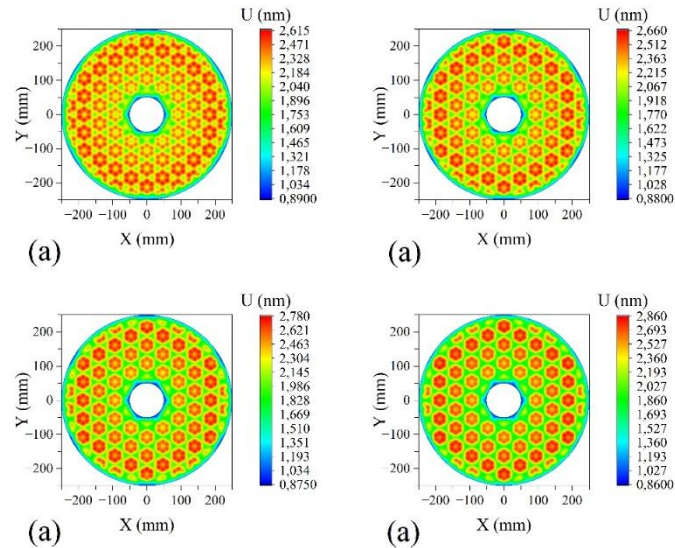


Figure 3.37. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs NAT sous l'effet de la pression de polissage, (a) NAT-1.5, (b) NAT-2, (c) NAT-2.5, et (d) NAT-3.

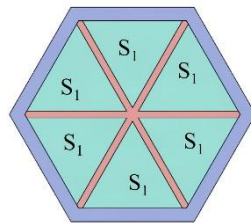


Figure 3.38. Illustration des SSP au sein de la cellule représentative des miroirs NAT.

Tableau 3.8. Aires des SSP pour les miroirs NAT.

Désignation	S1 (mm ²)
NAT-1.5	305.42
NAT-2	310.75
NAT-2.5	316.13
NAT-3	319.75

3.4.6 Comparaison des performances des différents types de miroirs

- Concernant PV_Z, les meilleures valeurs pour chaque catégorie de miroirs sont classées, de la pire à la meilleure, comme suit :
 - Les miroirs NAHC, 166.76 nm enregistrée pour NAHC-3, avec une amélioration de 8.54 % par rapport à NA-50, mais pas d'amélioration par rapport à NA-40.
 - Les miroirs NA, 151.56 nm enregistrée pour NA-40, avec une amélioration de 16.88 % par rapport à NA-50.

- Les miroirs NAL, 138.56 nm enregistrée pour NAL-1.5, avec une amélioration de 24.01 % par rapport à NA-50 et de 8.58 % par rapport à NA-40.
- Les miroirs NATA, 135.23 nm enregistrée pour NATA-3, avec une amélioration de 25.83 % par rapport à NA-50 et de 10.77 % par rapport à NA-40.
- Les miroirs NAT, 121.07 nm enregistrée pour NAT-2.5, avec une amélioration de 33.60 % par rapport à NA-50 et de 20.11 % par rapport à NA-40.
- Concernant RMS_Z , les meilleures valeurs pour chaque catégorie de miroirs sont classées, de la pire à la meilleure, comme suit :
 - Les miroirs NAHC, 42.81 nm enregistrée pour NAHC-3, avec une amélioration de 3.06 % par rapport à NA-50, mais pas d'amélioration par rapport à NA-40.
 - Les miroirs NA, 38.35 nm enregistrée pour NA-40, avec une amélioration de 13.15 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NAL, 36.06 nm enregistrée pour NAL-1.5, avec une amélioration de 18.34 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NATA, 35.38 nm enregistrée pour NATA-2.5, avec une amélioration de 19.88 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NAT, 29.89 nm enregistrée pour NAT-2.5, avec une amélioration de 32.31 % par rapport à NA-50.
- Concernant PV_Y , les meilleures valeurs pour chaque catégorie de miroirs sont classées, de la pire à la meilleure, comme suit :
 - Les miroirs NAHC, 21.60 nm enregistrée pour NAHC-3, sans amélioration par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NAL, 21.23 nm enregistrée pour NAL-3, sans amélioration par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NATA, 21.20 nm enregistrée pour NATA-3, sans amélioration par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NA, 20.45 nm enregistrée pour NA-50.
 - Les miroirs NAT, 14.19 nm enregistrée pour NAT-1.5, avec une amélioration de 30.61 % par rapport à NA-50.
- Concernant RMS_Y , les meilleures valeurs pour chaque catégorie de miroirs sont classées, de la pire à la meilleure, comme suit :
 - Les miroirs NAHC, 3.87 nm enregistrée pour NAHC-3, sans amélioration par rapport à NA-50.

- Les miroirs NAL, 3.87 nm enregistrée pour NAL-3, sans amélioration par rapport à NA-50.
- Les miroirs NATA, 3.86 nm enregistrée pour NATA-3, sans amélioration par rapport à NA-50.
- Les miroirs NA, 3.74 nm enregistrée pour NA-50.
- Les miroirs NAT, 2.66 nm enregistrée pour NAT-1.5, avec une amélioration de 40.60 % par rapport à NA-50.
- Concernant les fréquences naturelles, les meilleures valeurs pour chaque catégorie de miroirs sont classées, de la pire à la meilleure, comme suit :
 - Les miroirs NAHC, 1368 Hz enregistrée pour NAHC-3, avec une amélioration de 2.23 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NA, 1431.3 Hz enregistrée pour NA-40, avec une amélioration de 6.96 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NAL, 1484.7 Hz enregistrée pour NAL-1.5, avec une amélioration de 10.95 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NATA, 1501.8 Hz enregistrée pour NATA-2.5, avec une amélioration de 12.23 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NAT, 1622 Hz enregistrée pour NAT-2.5, avec une amélioration de 21.21 % par rapport à NA-50.
- Concernant $U_{\max}$, les meilleures valeurs pour chaque catégorie de miroirs sont classées, de la pire à la meilleure, comme suit :
 - Les miroirs NAL, 3.41 nm enregistrée pour NAL-1.5, avec une amélioration de 83.59 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NATA, 3.15 nm enregistrée pour NATA-3, avec une amélioration de 84.84 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NAHC, 2.93 nm enregistrée pour NAHC-3, avec une amélioration de 85.89 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NA, 2.62 nm enregistrée pour NA-20, avec une amélioration de 87.39 % par rapport à NA-50.
 - Les miroirs NAT, 2.61 nm enregistrée pour NAT-1.5, avec une amélioration de 87.43 % par rapport à NA-50.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'emploi des cœurs en nid d'abeille hiérarchiques pour la conception des miroirs légers pour les télescopes spatiaux. Ces cœurs ont des structures hiérarchiques spécifiques incorporées au sein des cellules hexagonales du cœur en nid d'abeille classique original. On a étudié différentes configurations de hiérarchie, en l'occurrence les hiérarchies à motifs hexa-chiral, en toile d'araignée, en losange et triangulaire.

A cet effet, Nous avons conçus différentes séries de miroirs incorporant des cœurs en nid d'abeille classiques et hiérarchiques. Les miroirs à cœurs en nid d'abeille conçus ont différentes tailles de cellule : 50 mm, 40 mm, 30 mm et 20 mm, tandis que ceux à cœurs en nid d'abeille hiérarchiques, possèdent différents rapports de hiérarchie (1.5, 2, 2.5 et 3) pour chaque série correspondant à chaque type de hiérarchie. Nous avons analysé tous ces miroirs par MEF avec le software ANSYS sous différents cas de chargement : gravité axiale, gravité latérale, analyse modale, et pression de polissage.

Les résultats obtenus démontrent que :

- Tous les miroirs affichent de meilleures performances sous l'effet de la gravité latérale que sous l'effet de la gravité axiale.
- La réduction de la taille de cellule dans les miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques permet une amélioration des performances sous l'effet de la gravité axiale et des fréquences naturelles mais pas des performances sous l'effet de la gravité latérale.
- L'insertion de certaines structures hiérarchiques permet une amélioration de toutes les performances.

Bien que la réduction de la taille de cellule dans les miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques permette d'améliorer les performances sous l'effet de la gravité axiale ainsi que la fréquence naturelle, l'insertion de hiérarchie au sein de la cellule sans en modifier la taille, permet de bien plus substantielles améliorations.

En effet, la réduction de la taille de cellule permet des améliorations de 16.88 %, 12.02 % et 6.96 %, respectivement pour les erreurs de la surface optique sous l'effet de la gravité axiale PV et RMS et la fréquence naturelle, tandis que les performances sous l'effet de la gravité latérale enregistrent un recul. Par contre, l'insertion de hiérarchie à motif triangulaire, permet des améliorations de performances de 33.60 %, 32.31%, 28.5 %, 26.20 % et 21.21 %, respectivement pour les erreurs de la surface optique sous l'effet de la gravité axiale PV et RMS, la fréquence naturelle, la gravité latérale et la pression de polissage.

respectivement pour les erreurs de la surface optique PV et RMS sous l'effet de la gravité axiale et latérale et la fréquence naturelle par rapport au miroir de référence.

Ces chiffres démontrent la supériorité des configurations à cœurs en nid d'abeille hiérarchiques, et plus particulièrement celles à motif de hiérarchie triangulaire, par rapport aux configurations à cœur en nid d'abeille classiques.

4. Nouvelles configurations de cœurs pour les miroirs légers des télescopes embarqués

4.1 Introduction

La recherche sur les cœurs ondulés ne cesse de susciter de l'intérêt [140–150]. En effet, les ondulations prodiguent aux cœurs de la rigidité. Une tendance nouvelle a fait son apparition dans ce domaine. Les cœurs ondulés bidirectionnels. Ces derniers sont dérivés des cœurs ondulés simples tout en offrant plus de rigidité [151–155].

Dans ce chapitre, on a mis au point de nouvelles architectures de cœurs basées sur les cœurs ondulés, en l'occurrence, des cœurs ondulés multidirectionnels enchevêtrés ou - en anglais - Entangled Multidirectional Corrugated (EMC) cores. Que l'on désignera, dans le reste de ce document, par cœurs EMC. Ces cœurs sont obtenus par la manipulation de plaques ondulées simples. Leur duplication, rotation, enchevêtrement et combinaison permettent l'obtention d'un patchwork de géométries de cœurs pour miroirs légers offrant de très bonnes performances.

Ces architectures complexes, contrairement à celles étudiées dans les chapitres précédents ne peuvent pas être fabriquées par les procédés classiques. Elles ne sont permises que par la fabrication additive dont l'avènement dans la confection des miroirs légers est en train de révolutionner le domaine [18,42, 56–62,106,156–162].

Différents miroirs avec différentes configurations de cœurs EMC ont été conçus. Deux catégories de cœurs EMC ont été considérées : les cœurs EMC uni-axiaux et bi-axiaux. Dans la catégorie des cœurs EMC uni-axiaux, quatre miroirs ont été conçus contre deux pour la catégorie des cœurs EMC bi-axiaux. Tous ces miroirs conçus ont été analysés par MEF. Les cas de chargement sont la gravité terrestre axiale et latérale, la pression de polissage ainsi qu'une analyse modale. Les indicateurs de performance calculés sont : PV et RMS des erreurs de la surface optique sous l'effet de la gravité terrestre, le déplacement max de la surface optique sous l'effet de la pression de polissage et les fréquences naturelles du premier ordre.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été publiés dans [164].

4.2 Conception des miroirs à cœurs EMC

Tous les miroirs conçus sont plan-concaves en configuration open-back tel qu'illustré dans la Figure 4.1. Ils sont constitués d'une fine plaque avant ayant une forme de ménisque et une

épaisseur (t) de 5 mm. Cette face avant est supportée par un cœur EMC enchâssé entre deux anneaux d'épaisseur (t) de 5 mm. Le diamètre extérieur (D) est de 500 mm et celui du trou central (d) est de 100 mm. La distance focale est de 2500 mm. La différence entre les miroirs conçus réside dans la configuration du cœur EMC.

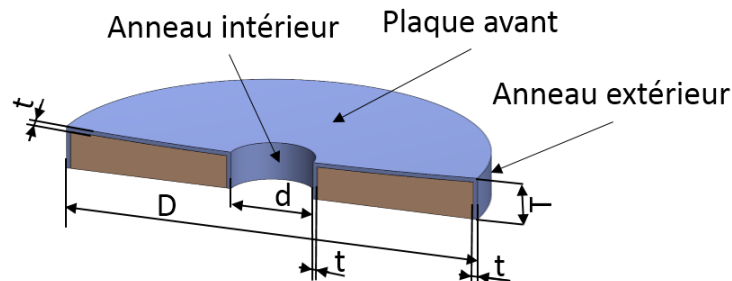


Figure 4.1. Architecture de base des miroirs conçus avec ses différents constituants et dimensions.

Les cœurs EMC sont dérivés de la plaque ondulée annulaire de base de la Figure 4.2. Elle a une ondulation trapézoïdale et est caractérisée par son épaisseur EP , sa période d'ondulation PO , et sa direction d'ondulation. La duplication de cette plaque et la manipulation puis la combinaison de ses copies avec différentes orientations, permettent d'aboutir aux géométries décrites dans ce qui suit.

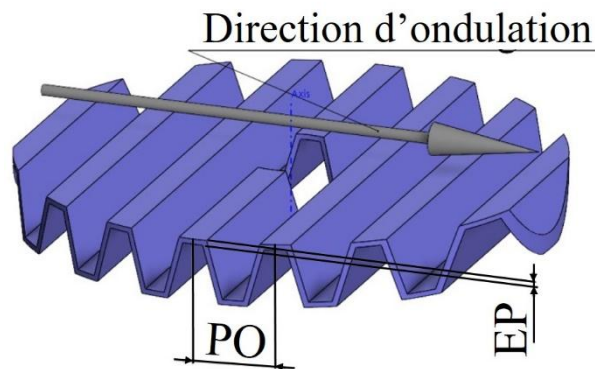


Figure 4.2. Illustration de la plaque ondulée annulaire de base avec ses paramètres géométriques.

4.2.1 Les cœurs EMC uni-axiaux

Dans cette catégorie, quatre cœurs ont été conçus à savoir le bidirectionnel, le tri-directionnel, le quadri-directionnel et l'hexa-directionnel constitués respectivement de deux, trois, quatre et six plaques. Ils sont obtenus par l'addition des plaques constituantes dont la première est la plaque de base et le reste en sont des copies avec différentes directions d'ondulation. Ces

directions d'ondulation sont obtenues par la rotation de chacune des copies (i) de la plaque de base autour son axe d'un angle α_i donné par l'équation 4.1 et propre à chacune.

$$\alpha_i = i * \theta \quad (4.1)$$

Où i est l'ordre de la plaque avec la plaque de base ayant un ordre 0, la première copie un ordre 1 et ainsi de suite, et θ est l'incrément angulaire du cœur donné par l'équation 4.2.

$$\theta = 180/N \quad (4.2)$$

Où N est le nombre de plaques constituantes du cœur.

Le Tableau 4.1 dresse, pour les quatre cœurs EMC uni-axiaux, le nombre de plaques constituantes, l'incrément angulaire θ et les directions d'ondulation des plaques constituantes α_i .

Tableau 4.1. Nombres de plaques constituantes, incréments angulaires et directions d'ondulations des plaques constituantes pour tous les cœurs EMC uni-axiaux conçus.

Cœurs	Nombre de plaques constituantes	Incrément angulaire θ (°)	Directions d'ondulations α_i (°)
Bidirectionnel	2	90	0, 90
Tri-directionnel	3	60	0, 60, 120
Quadri-directionnel	4	45	0, 45, 90, 135
Hexa-directionnel	6	30	0, 30, 60, 90, 120, 150

Dans ce qui suit, une description détaillée des étapes de conception ainsi que la géométrie finale sont données pour chacun des quatre cœurs EMC uni-axiaux.

4.2.1.1 Cœur EMC uni-axial bidirectionnel

Ce cœur est constitué de deux plaques ondulées annulaires, en conséquence son incrément angulaire θ est de 90° . La plaque de base a une direction d'ondulation correspondant à $\alpha_0 = 0^\circ$ (Figure 4.3(a)), et la seconde en est une copie mais avec une direction d'ondulation correspondant à $\alpha_1 = 90^\circ$ que l'on peut apercevoir dans la Figure 4.3(b). De la superposition et la combinaison de ces deux plaques résulte la géométrie de la Figure 4.3(c). Les deux peaux - inférieure et supérieure- délimitant cette géométrie sont supprimées tel qu'illustré dans la Figure 4.3(d) pour aboutir au cœur illustré dans la Figure 4.3(e).

La Figure 4.3(f) donne une vue de dessus d'un quart du cœur. Une vue de dessous est donnée par la Figure 4.3(g), et une vue en coupe dans la Figure 4.3(h).

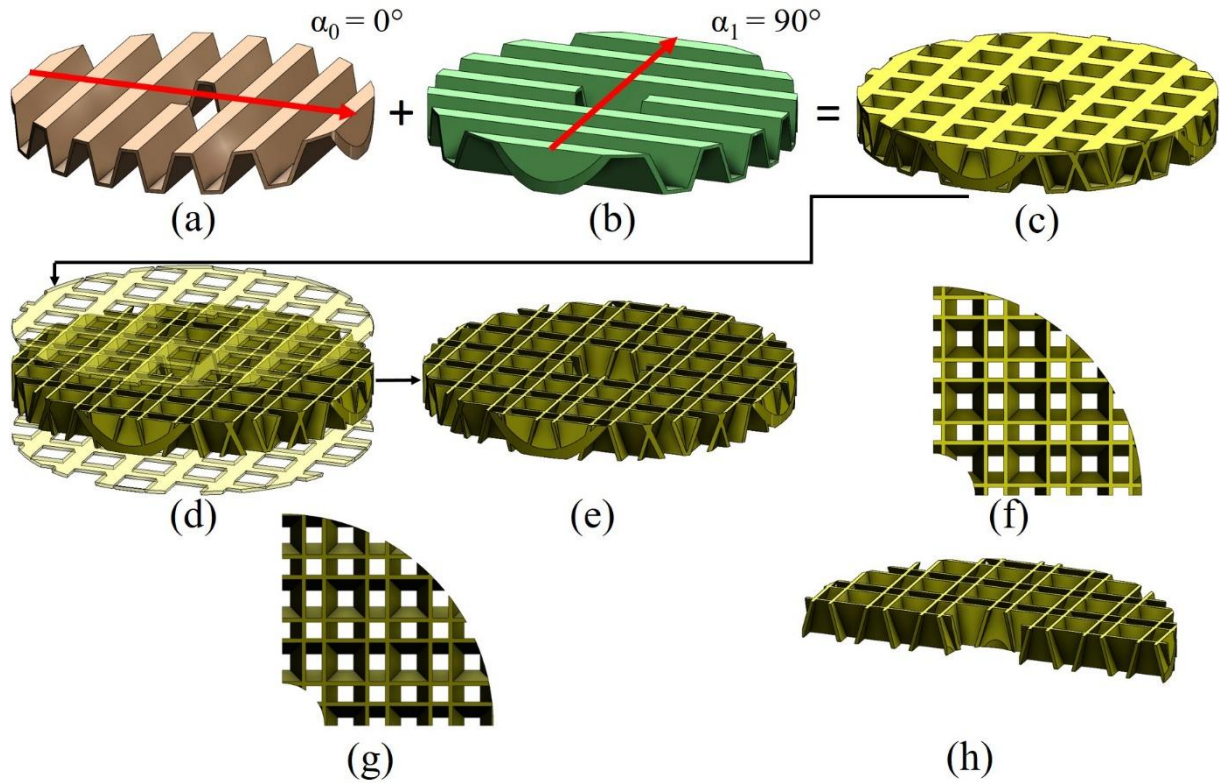


Figure 4.3. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC uni-axial bidirectionnel, (a) plaque ondulée de base ($\alpha_0 = 0^\circ$), (b) deuxième plaque ondulée ($\alpha_1 = 90^\circ$), (c) résultat de la superposition et la combinaison des deux plaques, (d) suppression des deux peaux, (e) cœur résultant, (f) vue de dessus d'un quart du cœur, (g) vue de dessous d'un quart du cœur, et (h) vue en coupe du cœur.

4.2.1.2 Cœur EMC uni-axial tri-directionnel

L'incrément angulaire θ pour ce cœur est de 60° , celui-ci étant constitué de trois plaques. La plaque de base possède une direction d'ondulation $\alpha_0 = 0^\circ$ (Figure 4.4(a)), les deux autres possèdent des directions d'ondulation correspondant à $\alpha_1 = 60^\circ$ (Figure 4.4(b)), et $\alpha_2 = 120^\circ$ (Figure 4.4(c)). Les trois plaques sont superposées et combinées pour aboutir à la géométrie de la Figure 4.4(d) dont sont enlevées les deux peaux tel que l'on peut voir dans la Figure 4.4(e) ce qui donne comme résultat le cœur illustré dans la Figure 4.4(f).

La Figure 4.4(g) illustre une vue de dessus d'un quart du cœur, la Figure 4.4(h) en illustre une vue de dessous, et la Figure 4.4(i) montre une vue en coupe du cœur.

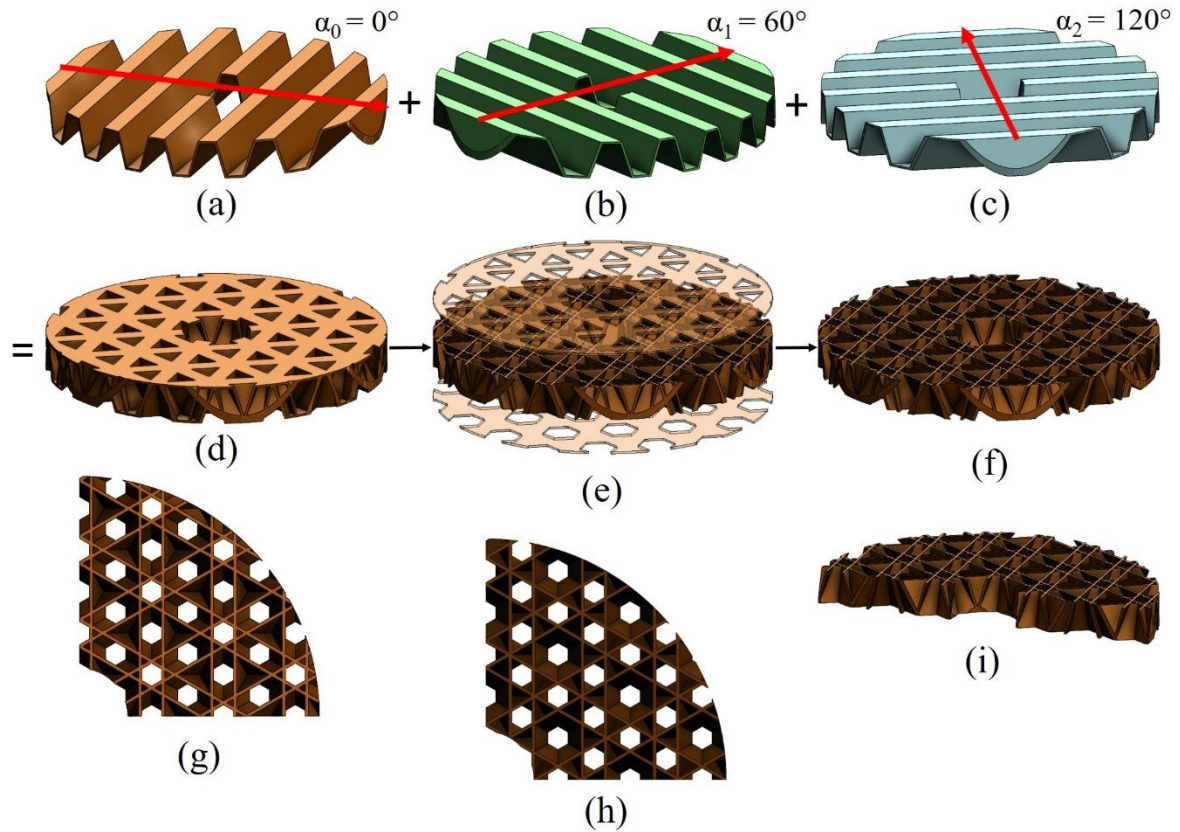


Figure 4.4. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC uni-axial tri-directionnel, (a) plaque ondulée de base ($\alpha_0 = 0^\circ$), (b) deuxième plaque ondulée ($\alpha_1 = 60^\circ$), (c) troisième plaque ondulée ($\alpha_2 = 120^\circ$), (d) résultat de la superposition et la combinaison des trois plaques, (e) suppression des deux peaux, (f) cœur résultant, (g) vue de dessus d'un quart du cœur, (h) vue de dessous d'un quart du cœur, et (i) vue en coupe du cœur.

4.2.1.3 Cœur EMC uni-axial quadri-directionnel

Constitué de quatre plaques, l'incrément angulaire θ de ce cœur est de 45° . Les quatre plaques constitutives ont des directions d'ondulation correspondant à $\alpha_0 = 0^\circ$ (Figure 4.5(a)), $\alpha_1 = 45^\circ$ (Figure 4.5(b)), $\alpha_2 = 90^\circ$ (Figure 4.5(c)), et $\alpha_3 = 135^\circ$ (Figure 4.5(d)). Leur superposition et combinaison résultent en la géométrie de la Figure 4.5(e). Les deux peaux, supérieure et inférieure sont ensuite enlevées tel qu'illustré dans la Figure 4.5(f), et il en résulte le cœur affiché dans la Figure 4.5(g).

Une vue de dessus et une vue de dessous d'un quart du cœur sont illustrées, respectivement, dans la Figure 4.5(h) et la Figure 4.5(i). Une vue en coupe du cœur est donnée par la Figure 4.5(j).

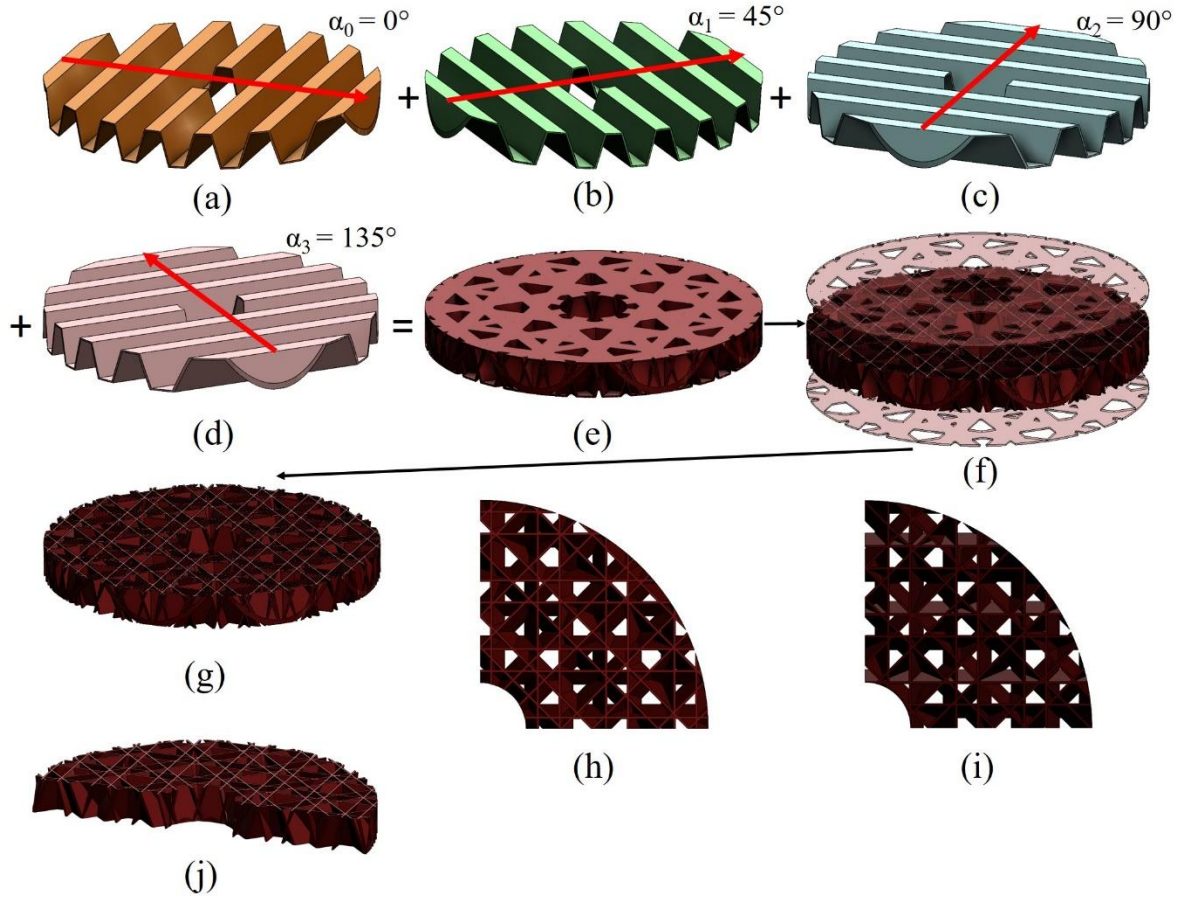


Figure 4.5. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC uni-axial quadri-directionnel, (a) plaque ondulée de base ($\alpha_0 = 0^\circ$), (b) deuxième plaque ondulée ($\alpha_1 = 45^\circ$), (c) troisième plaque ondulée ($\alpha_2 = 90^\circ$), (d) quatrième plaque ondulée ($\alpha_3 = 135^\circ$), (e) résultat de la superposition et la combinaison des quatre plaques, (f) suppression des deux peaux, (g) cœur résultant, (h) vue de dessus d'un quart du cœur, (i) vue de dessous d'un quart du cœur, et (j) vue en coupe du cœur.

4.2.1.4 Cœur EMC uni-axial hexa-directionnel

Six plaques constituent ce cœur, par conséquent son incrément angulaire θ est de 30° . Ces plaques possèdent des directions d'ondulation correspondant à $\alpha_0 = 0^\circ$ (Figure 4.6(a)), $\alpha_1 = 30^\circ$ (Figure 4.6(b)), $\alpha_2 = 60^\circ$ (Figure 4.6(c)), $\alpha_3 = 90^\circ$ (Figure 4.6(d)), $\alpha_4 = 120^\circ$ (Figure 4.6(e)), et $\alpha_5 = 150^\circ$ (Figure 4.6(f)). En les superposant et les combinant, l'on obtient la géométrie illustrée dans la Figure 4.6(g). Après suppression des peaux supérieure et inférieure, tel qu'illustré dans la Figure 4.6(h), l'on aboutit au cœur illustré dans la Figure 4.6(i).

Des vues de dessus et de dessous d'un quart du cœur ainsi obtenu sont affichées, respectivement, dans la Figure 4.6(j) et la Figure 4.6(k). Enfin, une vue en coupe du cœur est donnée dans la Figure 4.6(l).

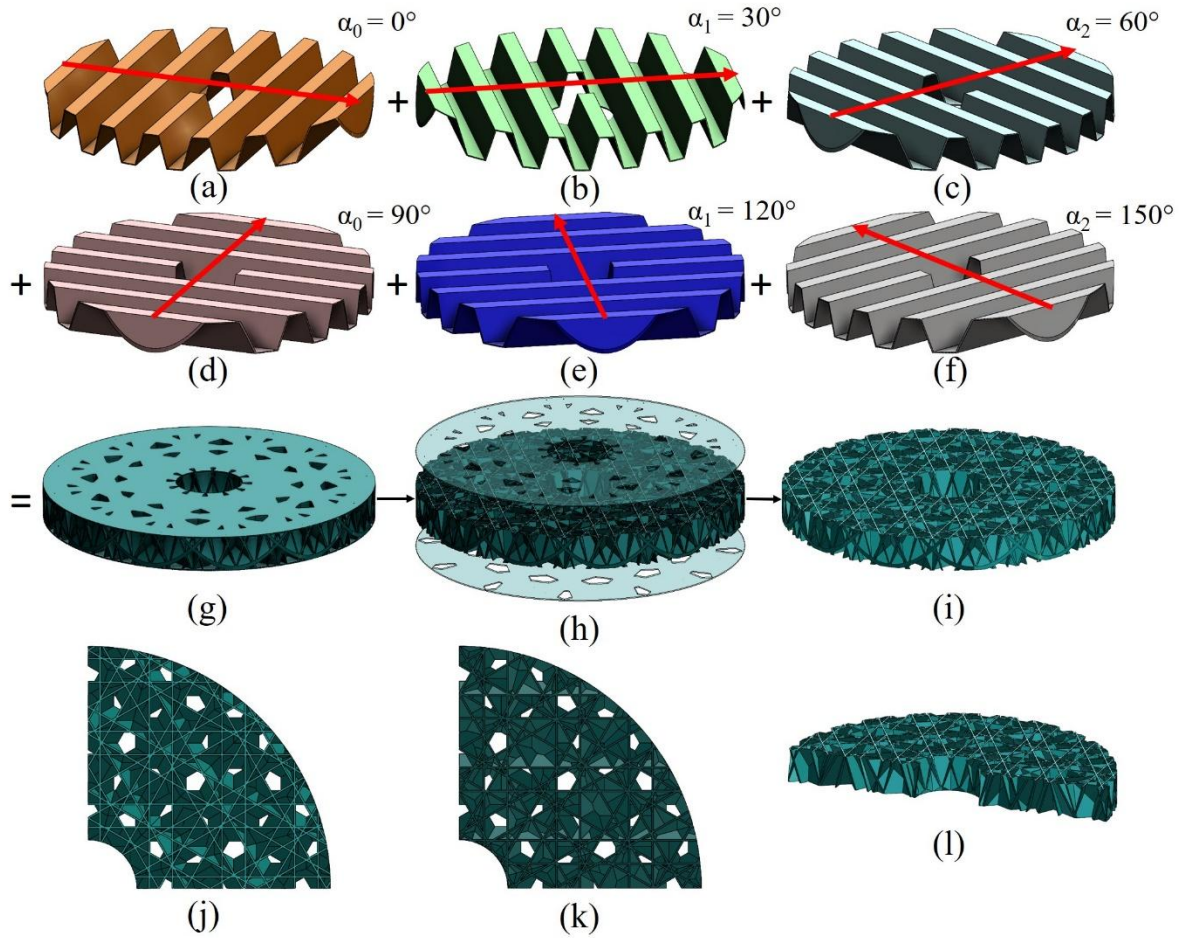


Figure 4.6. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC uni-axial hexa-directionnel, (a) plaque ondulée de base ($\alpha_0 = 0^\circ$), (b) deuxième plaque ondulée ($\alpha_1 = 30^\circ$), (c) troisième plaque ondulée ($\alpha_2 = 60^\circ$), (d) quatrième plaque ondulée ($\alpha_3 = 90^\circ$), (e) cinquième plaque ondulée ($\alpha_4 = 120^\circ$), (f) sixième plaque ondulée ($\alpha_5 = 150^\circ$), (g) résultat de la superposition et la combinaison des six plaques, (h) suppression des deux peaux, (i) cœur résultant, (j) vue de dessus d'un quart du cœur, (k) vue de dessous d'un quart du cœur, et (l) vue en coupe du cœur.

4.2.2 Les cœurs EMC bi-axiaux

Les cœurs de cette catégorie sont conçus selon une approche différente de celle des cœurs EMC uni-axiaux. Ils se constituent, chacun, de deux copies d'un des cœurs EMC uni-axiaux avec des orientations différentes obtenues par renversement. Deux cœurs ont été conçus pour cette catégorie : le cœur EMC bi-axial quadri-directionnel et le cœur EMC bi-axial hexa-directionnel.

4.2.2.1 Cœur EMC bi-axial quadri-directionnel

Ce cœur résulte de la superposition et la combinaison du cœur EMC uni-axial bidirectionnel (Figure 4.7(a)) avec une copie renversée de lui-même (Figure 4.7(b)). Ainsi obtenu, ce cœur est affiché dans la Figure 4.7(c) dont une vue de dessus du quart peut être aperçue dans la Figure 4.7(d), tandis que la Figure 4.7(e) illustre une vue en coupe.

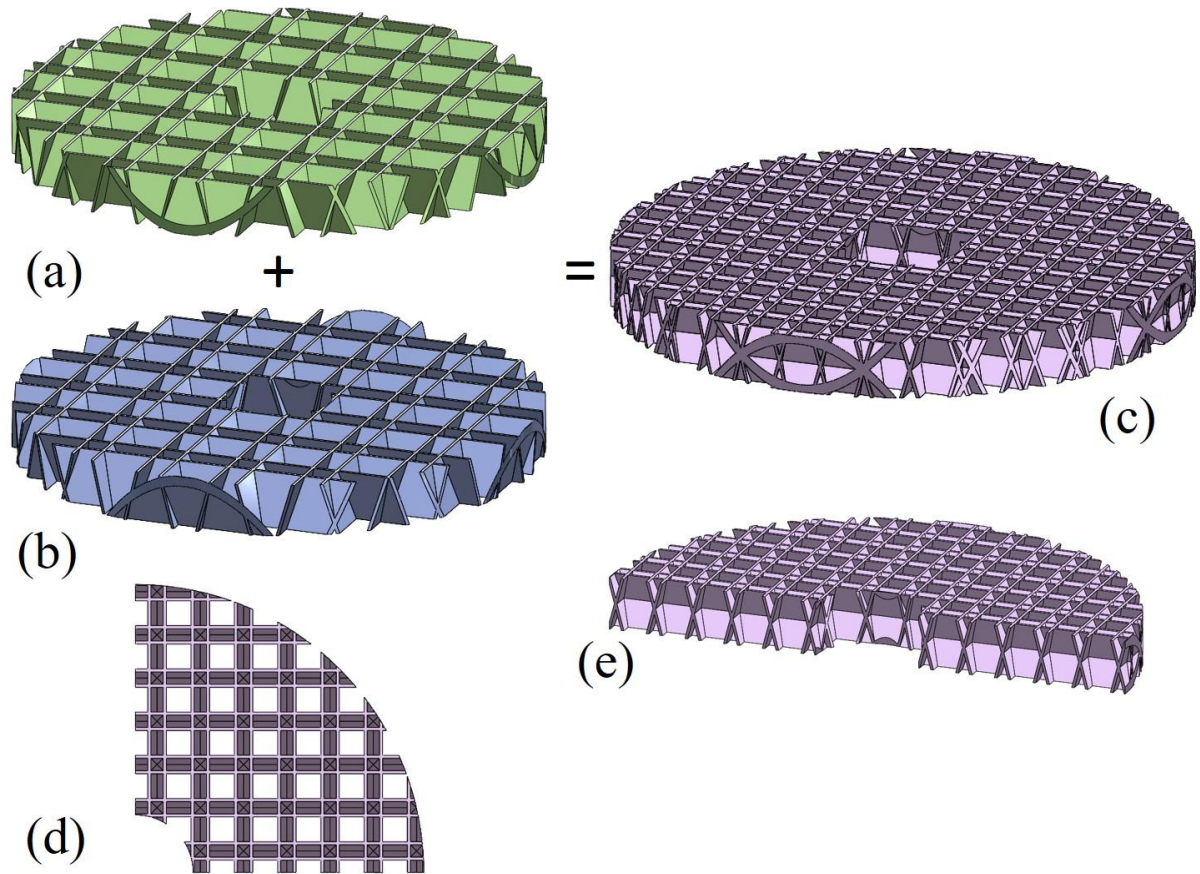


Figure 4.7. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC bi-axial quadri-directionnel, (a) cœur EMC uni-axial bidirectionnel, (b) deuxième cœur EMC uni-axial bidirectionnel renversé, (c) cœur résultant de la superposition et la combinaison des deux cœurs, (d) vue de dessus d'un quart du cœur, (e) vue en coupe du cœur.

4.2.2.2 Cœur EMC bi-axial hexa-directionnel

Ce cœur est dérivé du cœur EMC uni-axial tri-directionnel. Ce dernier (Figure 4.8(a)) est superposé et combiné à une copie renversée de lui-même que l'on peut voir dans la Figure 4.8(b), pour donner le cœur illustré dans la Figure 4.8(c), dont une vue de dessus et une vue en coupe sont montrées, respectivement, dans la Figure 4.8(d) et la Figure 4.8(e).

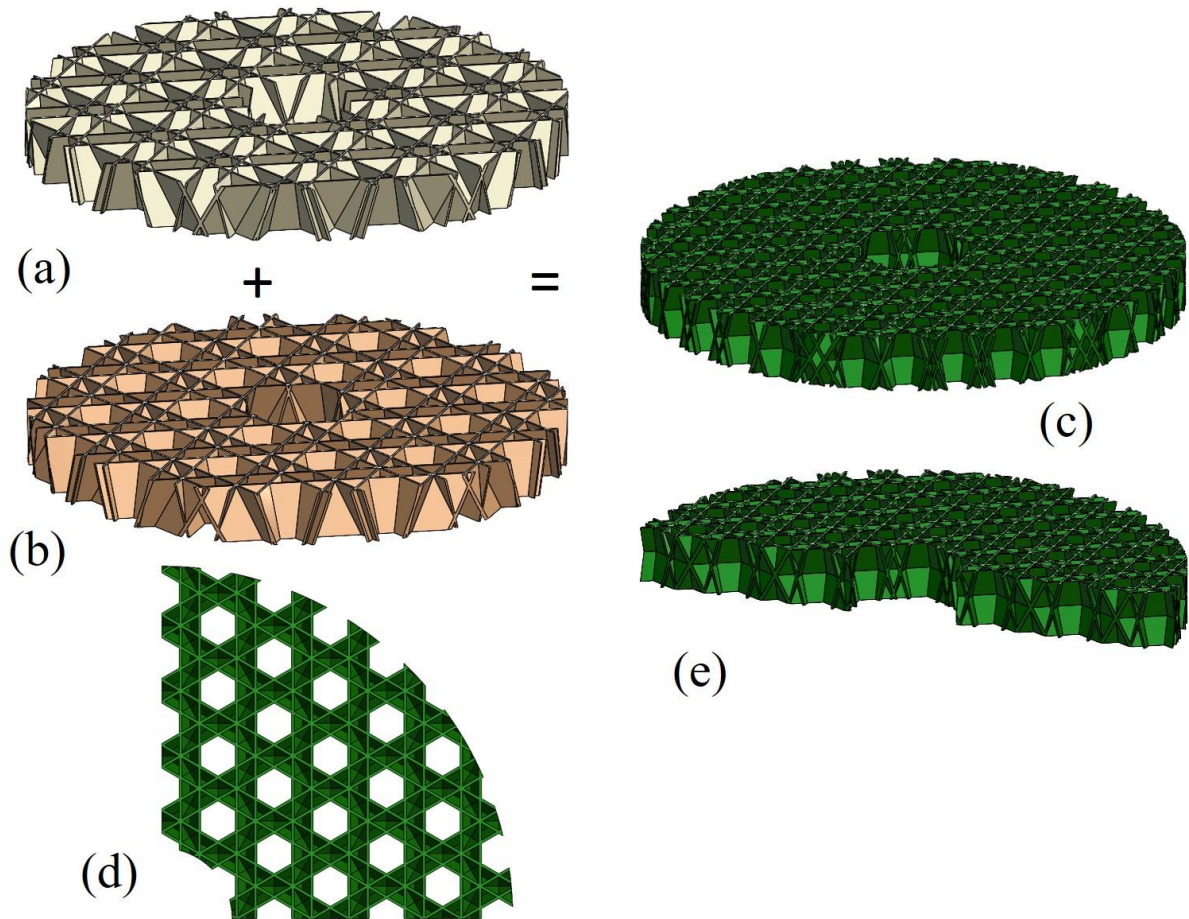


Figure 4.8. Etapes de conception et différentes vues du cœur EMC bi-axial hexa-directionnel, (a) cœur EMC uni-axial tri-directionnel, (b) deuxième cœur EMC uni-axial tri-directionnel renversé, (c) cœur résultant de la superposition et la combinaison des deux cœurs, (d) vue de dessus d'un quart du cœur, (e) vue en coupe du cœur.

4.2.3 Les miroirs à cœurs EMC

Des miroirs ayant l'architecture illustrée dans la Figure 4.1 et incorporant chacun un des cœurs décrits des deux catégories ont été conçus. Ils ont pour matériaux, le carbure de silicium SiC. Les cœurs de tous ces miroirs sont dérivés d'une plaque ondulée de base ayant une période d'ondulation PO de 75 mm. Les épaisseurs de cette dernière ont été ajustées pour chaque miroir afin qu'ils répondent à l'exigence de masse de $10 \text{ kg} \pm 1\%$. Le Tableau 4.2 énumère les paramètres géométriques PO et EP ainsi que les masses de chaque miroir à cœur EMC conçu.

Les miroirs incorporant des cœurs EMC uni-axiaux sont désignés par U suivi par le nombre de plaques constitutives. Ceux à cœurs EMC bi-axiaux sont désignés par B suivi par le nombre de plaques constitutives.

Tableau 4.2. Paramètres géométriques et masses de tous les miroirs à cœurs EMC conçus.

Désignation	PO (mm)	EP (mm)	Masse (kg)
Miroirs à cœurs EMC uni-axiaux			
U2	75	4.9	10.03
U3	75	3.35	10.04
U4	75	2.5	9.96
U6	75	1.7	9.99
Miroirs à cœurs EMC bi-axiaux			
B4	75	2.6	10.03
B6	75	1.8	9.99

4.3 Analyse des miroirs à cœurs EMC

Tous les miroirs à cœurs EMC décrits ci-dessus ont été analysés par MEF avec pour matériau le carbure de silicium SiC et les cas de chargement suivants :

4.3.1 Cas de chargement 1 : gravité axiale

- Type d'étude : structure statique.
- Charge appliquée : accélération de la gravité terrestre de magnitude 1-g parallèle à l'axe optique (direction z) tel qu'illustré dans la Figure 4.9(a).
- Conditions aux limites : une condition aux limites de type 'support fixe' est appliquée au niveau de trois emplacements à la périphérie du miroir comme on peut le voir dans la Figure 4.9(a).
- Indicateurs de performance : les valeurs PV et RMS de l'erreur de la surface optique, après soustraction des MCR, notées PV_z et RMS_z (équations 2.1 et 2.2, respectivement).

4.3.2 Cas de chargement 2 : gravité latérale

- Type d'étude : structure statique.
- Charge appliquée : accélération de la gravité terrestre de magnitude 1-g perpendiculaire à l'axe optique du miroir (direction y) tel qu'illustré dans la Figure 4.9(b).
- Conditions aux limites : la même condition aux limites de type 'support fixe' du cas de chargement 1 est appliquée aux mêmes localisations (Figure 4.9(b)).
- Indicateurs de performance : les valeurs PV et RMS de l'erreur de la surface optique, après soustraction des MCR, notées PV_y et RMS_y (équations 2.3 et 2.4, respectivement).

4.3.3 Cas de chargement 3 : analyse modale

- Type d'étude : modale
- Conditions aux limites : la même condition aux limites de type 'support fixe' des cas de chargement 1 et 2 est appliquée aux mêmes localisations.
- L'indicateur de performance calculé est la fréquence naturelle du premier mode de vibration.

4.3.4 Cas de chargement 4 : pression de polissage

- Type d'étude : structure statique.
- Charge appliquée : pression uniforme de 5 kPa sur la surface optique tel que l'on peut voir dans la Figure 4.9(c).
- Conditions aux limites : Une condition aux limites de type 'support fixe' est appliquée à la surface arrière du miroir comme on peut l'apercevoir dans la Figure 4.9(d).
- L'indicateur de performance pour ce cas de chargement est le déplacement modal maximal de la surface optique, sous l'effet de la pression de polissage, noté $U_{\max}$.

La Figure 4.9(e) illustre un modèle discrétisé.

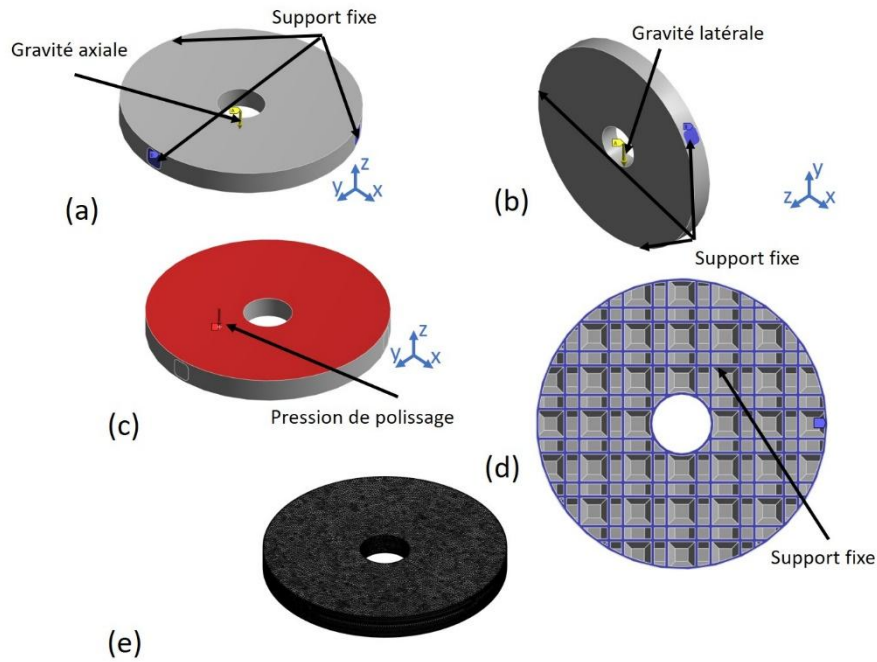


Figure 4.9. Illustration des cas de chargement, (a) cas de chargement 1, (b) cas de chargement 2, (c) pression de polissage du cas de chargement 4, (d) condition aux limites du cas de chargement 4 (avec U2 pris pour l'exemple), et (e) un modèle discrétisé.

4.3.5 Analyses de convergence du maillage

Des études de convergence du maillage ont été effectuées pour tous les miroirs à cœurs EMC en suivant la même procédure décrite dans la section 2.2.2.42.2.2.4. Les modèles de tous les miroirs ont convergé à une taille d'éléments de 2.5 mm. Les nombres d'éléments et de nœuds à la convergence pour chaque miroir sont listés dans le Tableau 3.2. La Figure 4.10 illustre les courbes de convergence de maillage pour tous les miroirs à cœurs EMC.

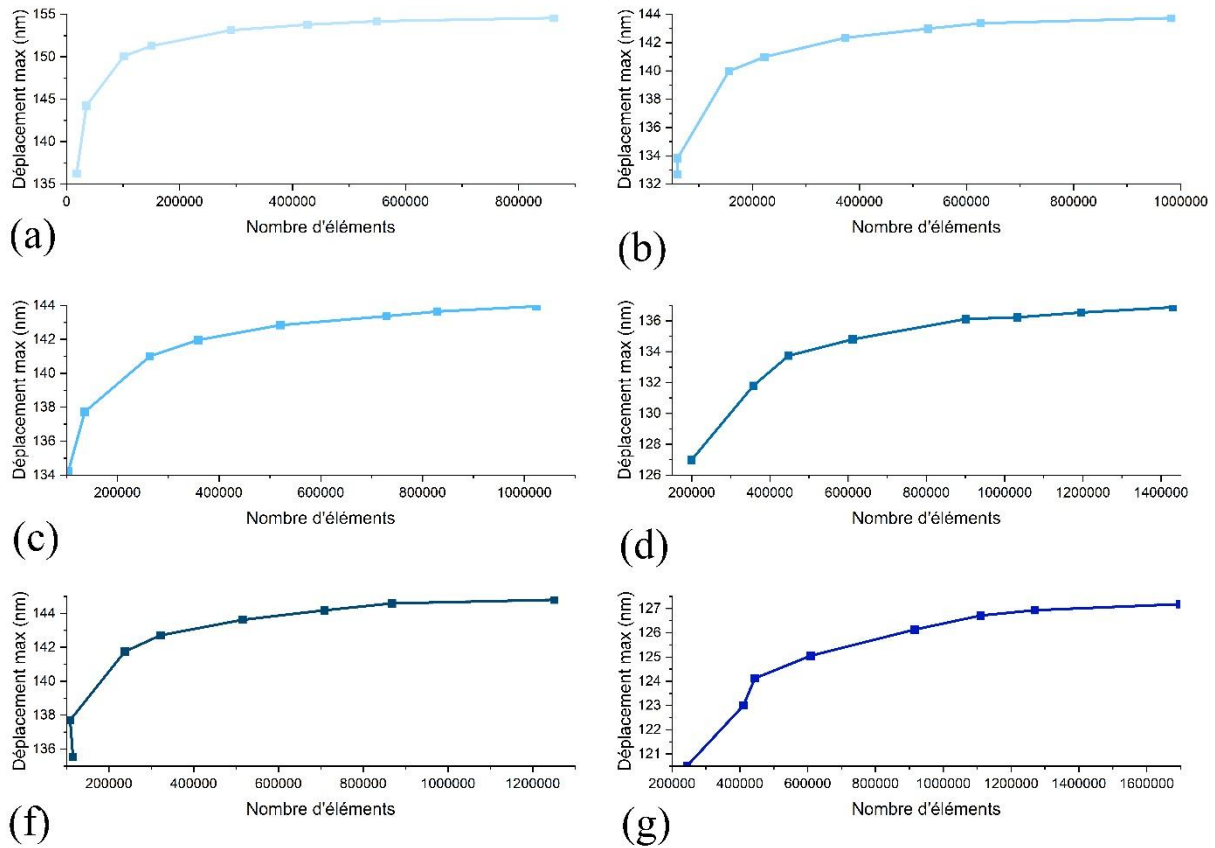


Figure 4.10. Courbes de convergence du maillage pour tous les miroirs à cœurs EMC conçus, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.

Tableau 4.3. Nombres d'éléments et de nœuds du maillage à la convergence pour tous les miroirs à cœurs EMC conçus.

désignation	Nombre d'éléments	Nombre de nœuds
Miroirs à cœurs EMC uni-axiaux		
U2	427554	745891
U3	537779	958538
U4	727489	1287510
U6	1024038	1794898
Miroirs à cœurs EMC bi-axiaux		
B4	707917	1240039
B6	1117416	1956154

4.4 Résultats et discussions

L'analyse par MEF des miroirs à cœurs EMC conçus a abouti aux résultats listés dans le Tableau 4.4. La Figure 4.11 montre ces résultats sous la forme de graphiques à barres.

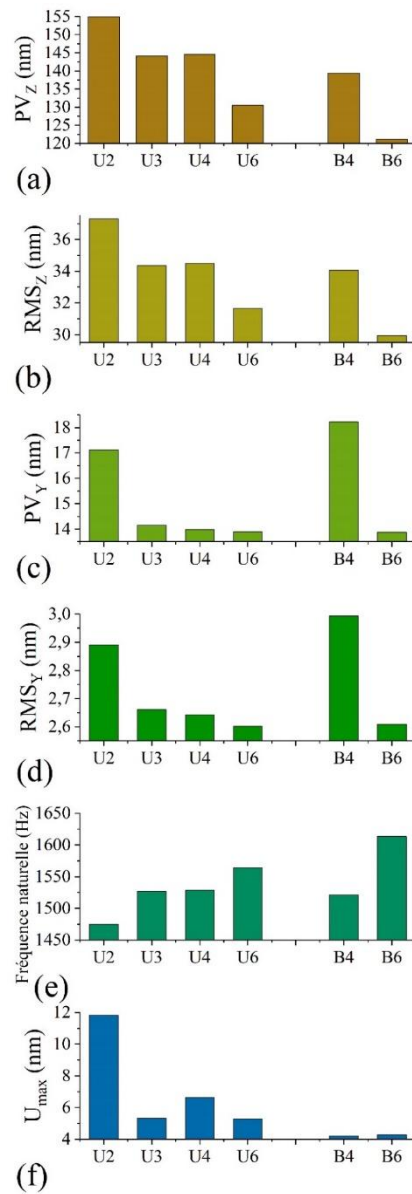


Figure 4.11. Graphiques à barres des indicateurs de performances calculés pour tous les miroirs à cœurs EMC, (a) PV_z , (b) RMS_z , (c) PV_y , (d) RMS_y , (e) Fréquences naturelles, et (f) U_{max} .

Tableau 4.4. Indicateurs de performances calculés pour les différents miroirs à cœurs EMC conçus.

Désignation	PV_z (nm)	RMS_z (nm)	PV_y (nm)	RMS_y (nm)	Fréquence naturelle (Hz)	U_{max} (nm)
Miroirs à cœurs EMC uni-axiaux						
U2	148.55	36.23	17.11	2.93	1474.9	11.82
U3	136.92	33.27	14.15	2.65	1526.6	5.32
U4	137.19	33.39	14.01	2.62	1529.1	6.61
U6	130.50	31.64	13.89	2.60	1564.2	5.28
Miroirs à cœurs EMC bi-axiaux						
B4	139.34	34.07	18.22	2.99	1521.1	4.20

B6	121.14	29.93	13.88	2.61	1613.4	4.30
-----------	--------	-------	-------	------	--------	------

De l'analyse de ces résultats, on peut tirer les remarques globales suivantes :

- Les valeurs de PV_Z varient de 121.14 nm à 148.55 nm.
- Les valeurs de RMS_Z varient de 29.93 nm à 36.23 nm.
- Les valeurs de PV_Y varient de 13.88 nm à 18.89 nm.
- Les valeurs de RMS_Z varient de 2.60 nm à 2.99 nm.
- Les fréquences naturelles varient de 1474.9 Hz à 1613.4 Hz.
- Les valeurs de U_{max} varient de 4.20 nm à 11.82 nm.

Le même constat que ceux des chapitres précédents peut être dressé, à savoir que les performances sous l'effet de la gravité latérale surpassent largement celles sous l'effet de la gravité axiale en accord avec [68,78–81,86,87,122,123].

Par rapport aux tolérances de conception les plus sévères de $\lambda/10$ pour PV et $\lambda/50$ pour RMS, ces miroirs peuvent opérer dans des longueurs d'onde infrarouges autour de 1800 nm pour la gravité axiale et autour de 190 nm pour la gravité latérale. Nous focaliserons donc la comparaison de mérite sur les performances sous l'effet de la gravité axiale, en l'occurrence PV_Z et RMS_Z .

Par rapport aux tolérances en matière de fréquences naturelles, qui peuvent aller jusqu'à 1000 Hz, tous les miroirs à cœurs EMC satisfont largement les critères.

Plus en profondeur, on constate que :

- PV_Z s'améliore à mesure que le nombre de plaques constituant le cœur EMC augmente, en effet :
 - Pour les miroirs à cœurs EMC uni-axiaux, elles passent de 148.55 nm pour U2 dont le cœur est constitué de deux plaques à 130.50 nm pour U6 dont le cœur est constitué de six plaques.
 - Pour les miroirs à cœurs EMC bi-axiaux, elles passent de 139.34 nm pour B4 dont le cœur est constitué de quatre plaques à 121.14 nm pour B6 dont le cœur est constitué de six plaques.
- De même, les valeurs de RMS_Z s'améliorent avec l'augmentation du nombre de plaques constituant le cœur EMC, en effet :

- Pour les miroirs à cœurs EMC uni-axiaux, elles passent de 36.23 nm pour U2 dont le cœur est constitué de deux plaques à 31.54 nm pour U6 dont le cœur est constitué de six plaques.
- Pour les miroirs à cœurs EMC bi-axiaux, elles passent de 34.07 nm pour B4 dont le cœur est constitué de quatre plaques à 29.93 nm pour B6 dont le cœur est constitué de six plaques.
- Les valeurs de PV_Y , aussi, évoluent positivement avec le nombre de plaques constituantes, avec :
 - Pour les miroirs à cœurs EMC uni-axiaux, elles passent de 17.11 nm pour U2 dont le cœur est constitué de deux plaques à 13.89 nm pour U6 dont le cœur est constitué de six plaques.
 - Pour les miroirs à cœurs EMC bi-axiaux, elles passent de 18.22 nm pour B4 dont le cœur est constitué de quatre plaques à 13.88 nm pour B6 dont le cœur est constitué de six plaques.
- De la même manière, les valeurs de RMS_Y s'améliorent à mesure que le nombre de plaques du cœur augmente, en effet :
 - Pour les miroirs à cœurs EMC uni-axiaux, elles passent de 2.93 nm pour U2 dont le cœur est constitué de deux plaques à 2.60 nm pour U6 dont le cœur est constitué de six plaques.
 - Pour les miroirs à cœurs EMC bi-axiaux, elles passent de 2.91 nm pour B4 dont le cœur est constitué de quatre plaques à 2.61 nm pour B6 dont le cœur est constitué de six plaques.
- Les fréquences naturelles ne dérogent pas à cette règle, on note que :
 - Pour les miroirs à cœurs EMC uni-axiaux, elles passent de 1474.9 Hz pour U2 dont le cœur est constitué de deux plaques à 1564.2 Hz pour U6 dont le cœur est constitué de six plaques.
 - Pour les miroirs à cœurs EMC bi-axiaux, elles passent de 1521.1 Hz pour B4 dont le cœur est constitué de quatre plaques à 1613.4 Hz pour B6 dont le cœur est constitué de six plaques.
- Les valeurs de U_{max} ne respectent pas la tendance générale observée. Avec les exceptions suivantes :
 - U3 enregistre une meilleure performance que U4 avec 5.32 nm contre 6.61 nm.
 - B4 surpasse B6 avec une valeur de 4.20 nm contre 4.30 nm.

Etant donné ces remarques, nous pouvons conclure, pour les miroirs à cœurs EMC, à une corrélation positive entre le nombre de plaques constituant le cœur et les niveaux performances affichés. Toutefois, soulignons l'exception de $U_{\max}$ qui reste cependant anecdotique étant donné les faits que les anomalies enregistrées restent minimales et que $U_{\max}$ ne constitue pas un indicateur de performance opérationnel contrairement aux autres.

Une analyse plus approfondie des géométries complexes des miroirs à cœurs EMC, nous a permis d'introduire une nouvelle notion, celle de la « cellule enchâssée la plus volumineuse » ou LEC pour « Largest Enclosed Cell » en anglais. L'enchevêtrement des raidisseurs au sein du cœur est entrecoupé par des cellules vides. La LEC est, parmi ces cellules, la plus volumineuse. La Figure 4.12 illustre, pour chaque miroir à cœur EMC, les cellules enchâssées entre les raidisseurs du cœur en mettant l'accent sur la LEC. Le Tableau 4.5 dresse, pour chaque miroir à cœur EMC, le nombre total de cellules du cœur, le volume de la LEC, et le nombre d'occurrences de la LEC.

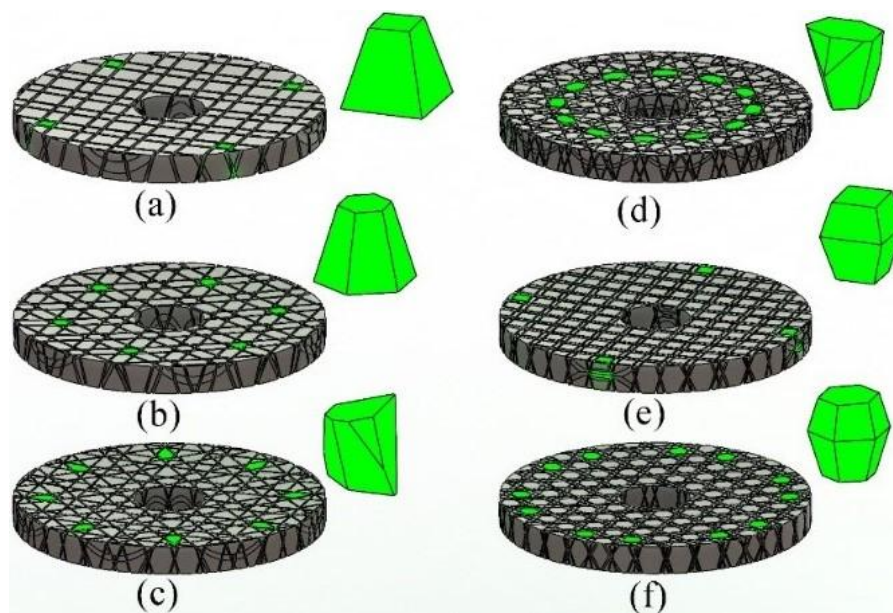


Figure 4.12. Illustrations des cellules enchâssées au sein des différents cœurs des miroirs à cœurs EMC avec l'accent mis sur la LEC, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.

Tableau 4.5. Nombre total de cellules et volume et nombre d'occurrences de la LEC pour tous les miroirs à cœurs EMC conçus.

Désignation	Nombre total de cellules	Volume de la LEC (X 10 ⁻³ l)	Nombre d'occurrences de la LEC
Miroirs à cœurs EMC uni-axiaux			
U2	168	52.63	4
U3	390	49	6
U4	824	37.18	8

U6	2064	30.80	12
Miroirs à cœurs EMC bi-axiaux			
B4	1008	36.96	4
B6	2226	39.51	12

De l'analyse de ces données, on constate qu'il y a une corrélation positive entre, d'une part le nombre total de cellules enchâssées, le volume et le nombre d'occurrences de la LEC du cœur EMC, et d'autre part les performances du miroir. En effet, plus le nombre de cellules augmente, le volume de la LEC diminue et son nombre d'occurrence augmente, résultant en un meilleur support de la plaque avant, plus les performances s'améliorent. Par exemple, U6, ayant un nombre de cellules de 2064, un volume de la LEC de 30.80×10^{-3} l, et 12 occurrences de la LEC, enregistre de bien meilleures performances que U2 qui n'a que 168 cellules, un volume de la LEC de 52.63×10^{-3} l et 4 occurrences de la LEC. Néanmoins, une anomalie est observée pour B4 et B6. Bien que B6 ait un nombre de cellules et un nombre d'occurrences de la LEC supérieurs à ceux de B4 et affiche de meilleures performances, B4 possède un volume de LEC plus petit avec 36.96×10^{-3} l contre 39.51×10^{-3} l pour B6.

La Figure 4.13 et la Figure 4.14 présentent, respectivement, les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques de tous les miroirs à cœurs EMC conçus, sous l'effet de la gravité axiale et latérale respectivement, après soustraction des MCR. On peut y constater les mêmes tendances que celle observées pour les miroirs étudiés aux chapitres précédents.

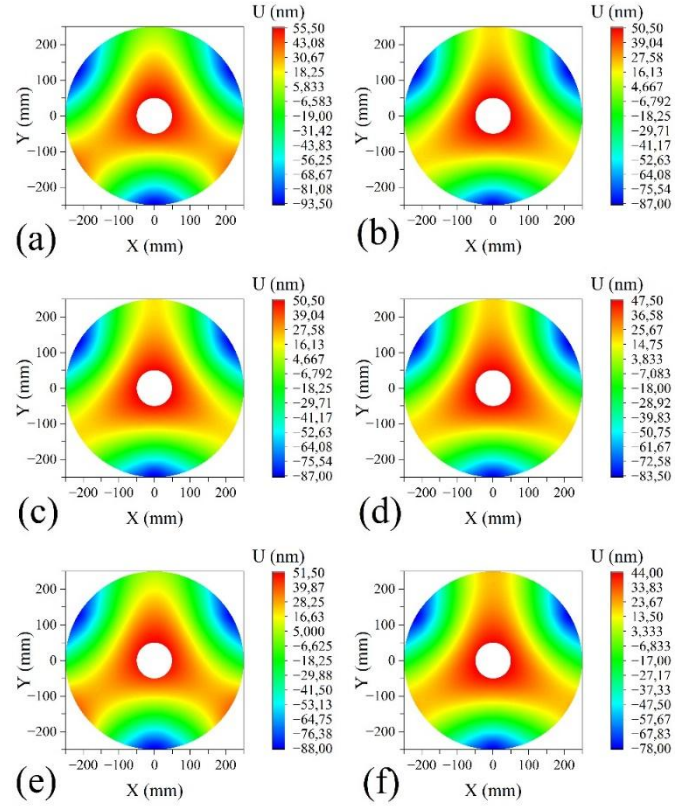


Figure 4.13. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs à cœurs EMC sous l'effet de la gravité axiale après soustraction des MCR, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.

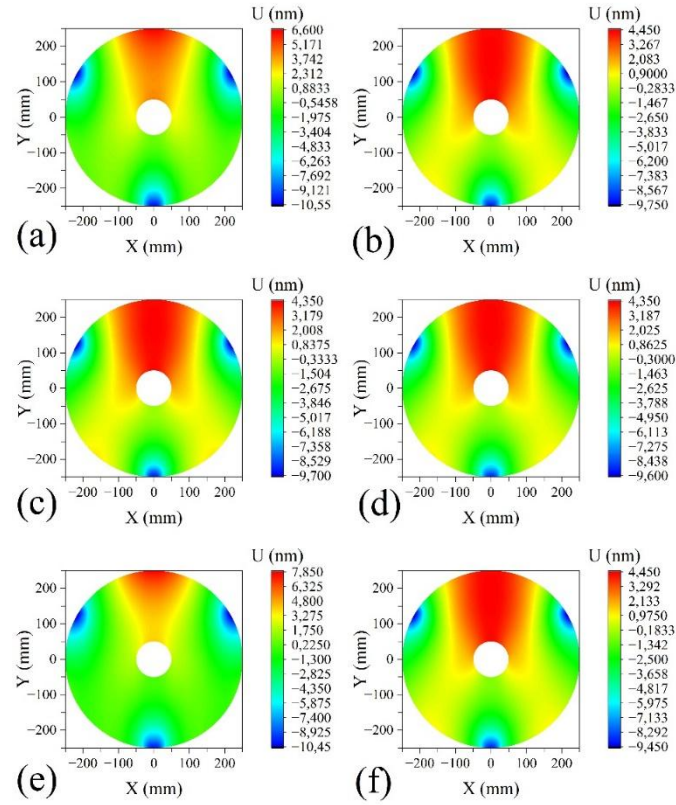


Figure 4.14. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs à cœurs EMC sous l'effet de la gravité latérale après soustraction des MCR, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.

La Figure 4.15 illustre les tracés de contours des déplacements nodaux des surfaces optiques des miroirs à cœurs EMC sous l'effet de la pression de polissage. Nous pouvons y constater que le déplacement maximal coïncide avec l'emplacement de la LEC.

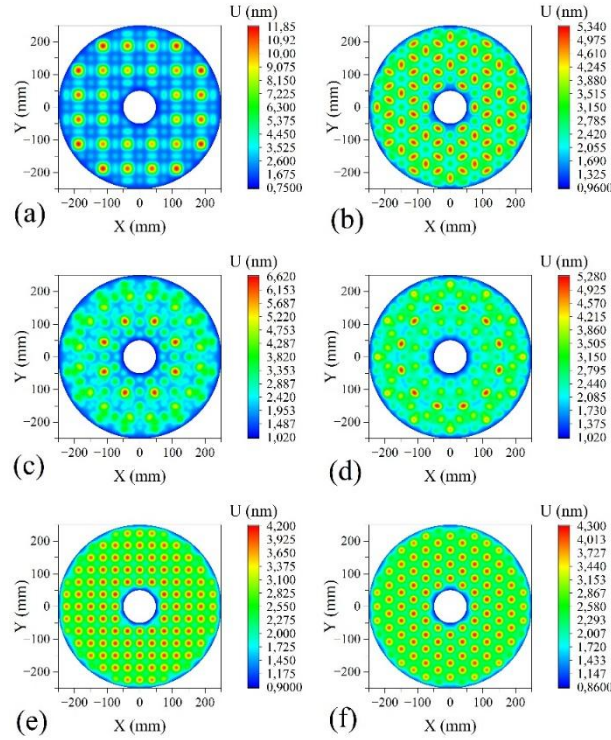


Figure 4.15. Tracés de contours des déplacements nodaux de la surface optique des miroirs à cœurs EMC sous l'effet de la pression de polissage, (a) U2, (b) U3, (c) U4, (d) U6, (e) B4, et (f) B6.

Dans la catégorie des miroirs à cœurs EMC uni-axiaux, celui qui affiche les meilleures performances est U6, tandis que pour les miroirs à cœurs EMC bi-axiaux, c'est B6 qui vient en tête. Entre ces deux miroirs, on constate que B6 surpasse U6 sauf en ce qui concerne RMS_Y où U6 affiche une valeur très légèrement meilleure avec 2.60 nm contre 2.61 nm. Donc, on pourrait dire que B6 est le meilleur miroir à cœur EMC parmi ceux étudiés ici.

Quand on compare B6 au miroir à cœur en nid d'abeille de référence, NA-50 du chapitre 2 en l'occurrence, on constate des améliorations de 33.56 % pour PV_Z , 32.22 % pour RMS_Z , 32.12% pour PV_Y , 30.21 % pour RMS_Y , et 20.57 % pour la fréquence naturelle.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit de nouvelles architectures pour les miroirs légers des télescopes spatiaux basées sur les cœurs ondulés multidirectionnels enchevêtrés ou EMC (Entangled Multidirectional Corrugated). Ces cœurs sont dérivés des cœurs ondulés classiques et obtenus par la manipulation, l'enchevêtrement, la superposition, et la combinaison de plusieurs occurrences de différentes orientations de ces derniers.

En outre, nous avons conçu plusieurs miroirs à cœurs EMC répartis en deux catégories, les miroirs à cœurs EMC uni-axiaux et bi-axiaux. Les paramètres géométriques de ces miroirs ont été ajustés de façon à respecter la contrainte de masse de $10 \text{ kg} \pm 1 \%$ imposée aux miroirs conçus dans les chapitres précédents. Ces miroirs ont été, ensuite, analysés par MEF en considérant les mêmes cas de chargement utilisés pour les miroirs des chapitres précédents.

Les résultats démontrent une supériorité des miroirs à cœurs EMC par rapport aux miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques étudiés dans le chapitre 3. En effet, des améliorations de 33.56 % pour PV_z , 32.22 % pour RMS_z , 32.12% pour PV_y , 30.21 % pour RMS_y , et 20.57 % pour la fréquence naturelle ont été enregistrées par le miroir à cœur EMC bi-axial hexa-directionnel (B6) par rapport au miroir à cœur en nid d'abeille de référence NA-50.

Conclusion générale et perspectives

La résolution et la sensibilité d'un télescope, deux critères essentiels en astronomie et en astrophysique modernes, dépendent étroitement de son ouverture, et donc du diamètre de son miroir primaire. Face aux exigences croissantes de ces disciplines, les télescopes doivent gagner en puissance, ce qui implique l'emploi de miroirs primaires de dimensions toujours plus grandes. Toutefois, la fabrication et l'intégration de tels miroirs soulèvent d'importants défis économiques, technologiques et opérationnels, rendant leur allègement indispensable. C'est dans ce contexte que, depuis plusieurs décennies, divers matériaux et architectures ont été développés afin de réduire leur masse tout en conservant une rigidité et des performances optomécaniques satisfaisantes.

La présente thèse s'inscrit dans cette problématique et porte sur les architectures des miroirs légers pour télescopes spatiaux. Elle vise à concevoir de nouvelles structures innovantes à cœurs cellulaires, capables d'offrir de meilleures performances que les architectures classiques à cœurs en nid d'abeille.

En premier, nous avons proposé des méthodes d'amélioration des performances d'un miroir léger à cœur en nid d'abeille par l'insertion de renforcements locaux stratégiques basés sur la configuration de montage adoptée. A cet effet, nous avons conçu et analysé un miroir de référence, incorporant un cœur en nid d'abeille à cellules hexagonales, de 500 mm et répondant à une exigence de masse de $10 \text{ kg} \pm 1 \%$, et nous l'avons analysé par MEF sous différents cas de chargement, en l'occurrence l'accélération de la gravité de magnitude 1-g axiale et latérale, et l'analyse modale. Les résultats de l'analyse ont révélé que les efforts d'amélioration devaient être orientés vers les performances sous l'effet de la gravité axiale, et ont permis d'identifier des zones structurellement vulnérables à renforcer. Ainsi, nous avons, ensuite, conçu trois autres miroirs à renforcement locaux, employant chacun une stratégie de renforcement distincte avec comme exigences, que le miroir puisse être fabriqué par les procédés traditionnels utilisés pour la fabrication des miroirs à cœurs en nid d'abeille, et d'avoir une masse de $10 \text{ kg} \pm 1\%$. La stratégie de renforcement pour le premier miroir consiste à remplir les cellules du cœur correspondant aux zones vulnérables, celle du deuxième se base sur la gradation de la taille des cellules avec des cellules de petites tailles au niveau des zones vulnérables et des plus grandes ailleurs, et celle du troisième s'appuie sur l'insertion de raidisseurs au sein des cellules des zones de vulnérabilité. Ces stratégies de renforcement ont atteint l'objectif visé, enregistrant des améliorations des valeurs PV et RMS de l'erreur de la surface optique due à la gravité

axiale, respectives, de 22.07 % et 19.04 %, avec une amélioration de la fréquence naturelle de 7.33 %.

Dans la deuxième partie, nous avons exploré une approche innovante consistant en l'utilisation des cœurs en nid d'abeille hiérarchiques et les potentielles améliorations de performances qu'ils pourraient permettre par rapport aux cœurs en nid d'abeille classiques. Ces cœurs sont dérivés des cœurs en nid d'abeille classiques et obtenus par l'insertion, au sein des cellules de ces derniers de raidisseurs, de plus faible épaisseur que la paroi du nid d'abeille, et arrangés de manières spécifiques. Ainsi nous avons considéré quatre motifs de hiérarchie, hexachiral, en toile d'araignée, en losanges et triangulaire. Afin de tester la potentielle supériorité de ces nouveaux cœurs sur les cœurs en nid d'abeille classiques, nous avons conçu et analysé plusieurs séries de miroirs, chacune incorporant un type de cœur distinct, en nid d'abeille classique ou hiérarchique avec un des motifs cités ci-dessus. La différence entre les miroirs de la série des nids d'abeille classiques réside dans la taille de cellules, tandis que celle entre les miroirs de chaque série correspondant aux nids d'abeille hiérarchiques réside dans le rapport de hiérarchie. Ces miroirs aussi répondent aux exigences de faisabilité par les procédés classiques et à celles du diamètre et de la masse. Les résultats ont révélé une nette supériorité des cœurs en nid d'abeille hiérarchiques, avec ceux à motif triangulaires enregistrant des améliorations de 33.60 %, 32.31%, 28.5 %, 26.20 %, respectivement, pour les valeurs PV et RMS des erreurs de la surface optique sous l'effet de la gravité axiale et latérale, et de 21.21 % pour la fréquence naturelle.

Enfin, nous avons introduit de nouvelles architectures de cœurs pour la conception des miroirs légers des télescopes spatiaux. Il s'agit des cœurs ondulés multidirectionnels enchevêtrés (Entangled Multidirectional Corrugated cores EMC). Ces architectures de cœurs sont dérivées des cœurs ondulés et obtenues par la manipulation, la superposition, l'enchevêtrement, et la combinaison de copies ayant différentes orientations de ces cœurs ondulés. Plusieurs miroirs avec différentes configurations de cœurs EMC, obéissant tous à l'exigence de masse de $10 \text{ kg} \pm 1\%$, et ayant un diamètre de 500 mm, ont été conçus et analysés par MEF. Les résultats ont révélé une supériorité de ces architectures par rapport à celles à cœurs en nid d'abeille classiques. Avec des améliorations de 33.56 % et 32.22 % pour les performances sous l'effet de la gravité axiale, de 32.12% et 30.21 % pour les performances sous l'effet de la gravité latérale, et de 20.57 % pour la fréquence naturelle.

Grâce à ces résultats, nous pouvons affirmer, confiants, que les architectures de miroirs légers que nous avons proposées sont nettement supérieures à celles à cœurs cellulaires en nid d'abeille classiques.

Les miroirs conçus, dans cette thèse, ont été analysés par la méthode des éléments finis sous différents cas de chargement. L'accélération de la gravité de magnitude 1-g appliquée parallèlement et perpendiculairement à l'axe optique, l'analyse modale, et la pression de polissage ont été traités. Les indicateurs de performances qui ont été employés pour les cas de chargement de type gravité terrestre sont les valeurs PV et RMS de la distorsion de la surface optique après soustraction des MCR. Bien que ces indicateurs de performance permettent une comparaison assez exhaustive des différentes architectures proposées, il aurait été encore plus qualitatif de décomposer les surfaces optiques déformées sur la base des polynômes de Zernike, ce qui nous aurait permis de mieux comprendre les aberrations que les effets étudiés pourraient engendrer pour chaque catégorie de designs. La première perspective que nous envisageons comme complément à ce travail est celle de mettre au point une méthode pour la décomposition des surfaces déformées obtenues par MEF sur la base des polynômes de Zernike.

Cette thèse a abordé les sollicitations mécaniques que subissent les miroirs légers des télescopes spatiaux. Or, ces derniers sont aussi soumis à des sollicitations thermiques orbitales très sévères dans l'environnement d'opération dues au changement des flux de rayonnement thermiques qu'ils reçoivent entre la nuit et le jour orbitaux. La deuxième perspective est celle d'analyser les performances des architectures que nous proposons sous l'effet de ces contraintes thermiques.

Nous avons exploré l'emploi des cœurs en nid d'abeille hiérarchiques pour la conception des miroirs légers des télescopes spatiaux en étudiant quatre variantes. Or, dans la littérature, il existe tout un éventail d'autres configurations de ces cœurs employées dans d'autres domaines de l'ingénierie. Il serait intéressant de sonder parmi elles, celles qui pourraient apporter un plus.

Nous avons proposé les miroirs à cœurs EMC qui s'avèrent être d'excellents candidats pour les miroirs légers des télescopes spatiaux. Une étude paramétrique de ces derniers permettrait d'en améliorer les performances encore davantage, ce que nous nous proposons d'entreprendre pour la suite. Aussi, l'exploration d'autres types d'ondulation que la trapézoïdale, étudiée ici, pourrait se révéler judicieux.

Pour toutes les architectures que nous avons proposées, nous avons comparé les performances à masse égale. Il serait intéressant aussi de vérifier, dans des travaux futurs, à quel point elles

permettent de réduire la masse tout en maintenant des niveaux de performance comparables à ceux des miroirs à cœurs en nid d'abeille classiques.

Comme autre perspective, nous envisageons d'étudier la scalabilité des architectures que nous avons proposées en explorant les améliorations de performances qu'elles pourraient permettre pour des miroirs de plus grandes dimensions ou pour des segments qui, assemblés, forment des miroirs de plus grandes envergures.

Enfin, nous envisageons pour de futurs travaux de mettre au point des stratégies d'optimisation des performances basées sur les techniques de l'intelligence artificielle telles que le machine learning et le deep learning.

Bibliographie

1. R. N. Wilson, *Reflecting Telescope Optics I Basic Design Theory and Its Historical Development*, 2nd ed. (Springer Berlin Heidelberg, 2004).
2. G. Verhoeven, "Resolving some spatial resolution issues-Part 2: When diffraction takes over," *Aargnews* **59**, 12–23 (2019).
3. G. Chartier, *Introduction to Optics* (Springer New York, 2005).
4. S. K. Saha, *Diffraction-Limited Imaging with Large and Moderate Telescopes* (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007).
5. D. Silva and I. S. Mclean, "Introduction to Telescopes," in *Planets, Stars and Stellar Systems Volume 1: Telescopes and Instrumentation*, T. D. Oswalt and I. S. Mclean, eds. (Springer, 2013).
6. W. J. Smith, *Optical Engineering*, 3rd ed. (McGraw-Hill, 2000).
7. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 7th ed. (CAMBRIDGE UNIVERSITY PRES, 1999).
8. D. Malacara and Z. Malacara, *Handbook of Optical Design*, 2nd ed. (Marcel Dekker, Inc., 2004).
9. J. M. COWLEY, *Diffraction Physics*, 3rd ed. (ELSEVIER SCIENCE B.V., 1995).
10. O. V Minin and I. V Minin, *Diffractional Optics of Millimetre Waves* (IOP Publishing Ltd, 2004).
11. W. J. Smith, *Practical Optical System Layout* (McGraw-Hill, 1997).
12. A. LABEYRIE, S. G. LIPSON, and P. NISENSEN, *AN INTRODUCTION TO OPTICAL STELLAR INTERFEROMETRY* (Cambridge University Press, 2006).
13. D. J. SCHROEDER, *Astronomical Optics*, Second edi (Academic Press, 2000).
14. J. Cheng, *The Principles of Astronomical Telescope Design* (Springer, 2009), Vol. 360.
15. L. Feinberg, "Space telescope design considerations," *Opt. Eng.* **51**, 011006 (2012).
16. A. M. Savitskiĭ and I. M. Sokolov, "Questions of constructing lightened primary mirrors of space telescopes," *J. Opt. Technol.* **76**, 666 (2009).

17. L. E. Cohan, "Integrated modeling for design of lightweight, active mirrors," *Opt. Eng.* **50**, 063003 (2011).
18. P. R. Yoder, *Mounting Optics in Optical Instruments* (SPIE Press, 2002).
19. C. Zhang and Z. Li, "A Review of Lightweight Design for Space Mirror Core Structure: Tradition and Future," *Machines* **10**, 1066 (2022).
20. P. R. Yoder, *Opto-Mechanical Systems Design*, 3rd ed. (CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006).
21. A. Ahmad, *Optomechanical Engineering Handbook* (CRC Press LLC, 1999).
22. K. Schwertz and J. H. Burge, *Field Guide to Optomechanical Design and Analysis* (SPIE, 2012).
23. G. W. Matthews, R. Egerman, S. P. Maffett, H. P. Stahl, R. Eng, and M. R. Effinger, "The development of stacked core technology for the fabrication of deep lightweight UV-quality space mirrors," *Proc. SPIE* **9143**, 91431U (2014).
24. T. W. Hobbs, M. J. Edwards, and R. R. VanBrocklin, "Corning's fabrication techniques for ULE and fused silica lightweight mirrors," *Proc. SPIE.* **5179**, 1 (2003).
25. Z. Wang, J. Zhang, J. Wang, X. He, L. Fu, F. Tian, X. Liu, and Y. Zhao, "A Back Propagation neural network based optimizing model of space-based large mirror structure," *Optik (Stuttg.)*. (2018).
26. Q. Dong, Q. Wang, C. Wang, Y. Luan, X. Wang, and X. Wang, "Multiobjective Optimization of SiC Mirror Based on Dual-Parameter Coupling," *Photonics* **10**, (2023).
27. J. Wu, "Design of High-lightweight Space Mirror Component Based on Automatic Optimization," *J. Phys. Conf. Ser.* **1605**, (2020).
28. L. Xu, J. Ding, Y. Wang, Y. Xie, X. Wu, and Z. Ma, "Thermal Stability Analysis and Experimental Study of a New Type of Grid-Reinforced Carbon Fiber Mirror," *Appl. Compos. Mater.* **26**, 469–478 (2019).
29. H. Kihm, H. S. Yang, I. K. Moon, and Y. W. Lee, "Adjustable bipod flexures for mounting mirrors in a satellite telescope," *20th IMEKO World Congr.* 2012 **3**, 1670–1673 (2012).
30. H. M. Martin, "Making mirrors for giant telescopes," *Proc. SPIE* **11116**, 202 (2019).

31. R. K. Banyal, B. Ravindra, and S. Chatterjee, "Opto-thermal analysis of a lightweighted mirror for solar telescope," *Opt. Express* **21**, 7065 (2013).
32. P. Barthol, A. Gandorfer, S. K. Solanki, M. Schüssler, B. Chares, W. Curdt, W. Deutsch, A. Feller, D. Germerott, B. Grauf, K. Heerlein, J. Hirzberger, M. Kolleck, R. Meller, R. Müller, T. L. Riethmüller, G. Tomasch, M. Knölker, B. W. Lites, G. Card, D. Elmore, J. Fox, A. Lecinski, P. Nelson, R. Summers, A. Watt, V. Martínez Pillet, J. A. Bonet, W. Schmidt, T. Berkefeld, A. M. Title, V. Domingo, J. L. Gasent Blesa, J. C. del Toro Iniesta, A. López Jiménez, A. Álvarez-Herrero, L. Sabau-Graziati, C. Widani, P. Haberler, K. Härtel, D. Kampf, T. Levin, I. Pérez Grande, A. Sanz-Andrés, and E. Schmidt, "The Sunrise Mission," *Sol. Phys.* **268**, 1–34 (2010).
33. H. M. Martin, R. Allen, V. Gasho, B. Jannuzi, D. W. Kim, J. Kingsley, K. Law, A. Loeff, R. Lutz, M. Tuell, S. Weinberger, S. C. West, T. McMahon, and C. J. Oh, "Manufacture of primary mirror segments for the Giant Magellan Telescope," *Proc. SPIE* **10706**, (2018).
34. M. T. Strzelecki, M. Magida, R. O'Malley, M. Stier, K. Trefny, and N. P. Wyckoff, "Low temperature bonding of light-weighted mirrors," *Opt. Mater. Struct. Technol.* **5179**, 50 (2003).
35. Y. Han, Y. Zhang, J. Han, J. Zhang, W. Yao, and Y. Zhou, "Optimum design of lightweight silicon carbide mirror assembly," *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* **23**, 259–262 (2008).
36. R. E. Parks, R. W. Wortley, and J. E. Cannon, "Engineering with lightweight mirrors," *Adv. Technol. Opt. Telesc. IV* **1236**, 735–743 (1990).
37. Z. Zhu, A. Tian, B. Liu, Y. Wu, and S. Dong, "Design and Evaluation of Flexible Support Based on Space Mirror," *Appl. Sci.* **14**, (2024).
38. W. Ke-jun, D. J. Li, W. Guo, and Z. W. W. H. Xuan-ming, "The design of support structure of mirror subassembly of space remote sensor," *Proc. SPIE* **9280**, 2–8 (2014).
39. S. R. Camera, "Optimization Design of Large-Aperture Primary Mirror for a Space Remote Camera," *Sensors* **23**, 5441 (2023).
40. S. W. Guo, G. Y. Zhang, W. Y. Wang, and X. Z. Zhao, "Design and Analysis of Lightweight Pointing Mirror Used in Space Camera Design and Analysis of Lightweight

- Pointing Mirror Used in Space Camera," J. Phys. Conf. Ser. **48 (2006)**, 620–624 (2006).
41. F. Sijun, L. Bohong, H. Bin, W. Yuwei, and F. Lei, "Design and thermal stability analysis of primary mirror assembly for space-borne gravitational wave telescope," Opto-Electronic Eng. **51**, 230157 (2024).
42. J. Tang, S. Wang, J. Zhang, and H. Xian, "Integrated optimum design for a honeycomb mirror," Proc. SPIE **8415**, 84150T (2012).
43. E. Hilpert, J. Hartung, S. Risse, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, "Precision manufacturing of a lightweight mirror body made by selective laser melting," Precis. Eng. **53**, 310–317 (2018).
44. W.-C. Lin, S.-T. Chang, T.-M. Huang, M.-Y. Hsu, and Y.-C. Lin, "The optical performance test of lightweight primary mirror of space Cassegrain telescope," Proc. SPIE **8838**, 883812 (2013).
45. D. Zhang, W. Li, Q. Lv, Y. Liu, and X. Chen, "Lightweight design and finite element analysis of primary mirror for the space telescope," Proc. SPIE **9626**, 96262C (2015).
46. Y. Yan, G. Jin, and H. Yang, "Design and analysis of large spaceborne light-weighted primary mirror and its support system," 3rd Int. Symp. Adv. Opt. Manuf. Test. Technol. Large Mirrors Telesc. **6721**, 67210V (2007).
47. X. Wang, S. Jiang, J. Wan, and R. Shu, "Gravity and thermal deformation of large primary mirror in space telescope," 8th Int. Symp. Adv. Opt. Manuf. Test. Technol. Large Mirrors Telesc. **9682**, 968205 (2016).
48. Y. Fujii, T. Uno, S. Ariki, K. Suehiro, S. Itakura, M. Imaki, T. Mizutani, S. Sato, K. Yanagase, S. Yasuda, T. Kawano, and T. Kimura, "Experimental study of 3.6-meter segmented-aperture telescope for geostationary Earth observation satellite," Proc. SPIE. **11852**, 118522G (2021).
49. T. D. Oswalt and I. S. McLean, *Planets, Stars and Stellar Systems: Volume 1: Telescopes and Instrumentation* (2013), Vol. 1.
50. P. Sandri, P. Mazzinghi, and V. Da Deppo, "Double Donut Schmidt Camera, a wide-field, large-aperture, and lightweight space telescope for the detection of ultrahigh energy cosmic rays," Appl. Opt. **57**, 3078 (2018).

51. B. Ulutas, D. Kerley, J. Dunn, A. Suleman, and E. J. Park, "Distributed H_∞ control of dynamically coupled segmented telescope mirrors: Design and simulation," *Mechatronics* **22**, 121–135 (2012).
52. A. J. Yingling and B. N. Agrawal, "Applications of tuned mass dampers to improve performance of large space mirrors," *Acta Astronaut.* **94**, 1–13 (2014).
53. M. Clampin, "The James Webb Space Telescope (JWST)," *Adv. Sp. Res.* **41**, 1983–1991 (2008).
54. J. W. Contreras and P. A. Lightsey, "Optical design and analysis of the James Webb Space Telescope: optical telescope element," *Nov. Opt. Syst. Des. Optim. VII* **5524**, 30 (2004).
55. P. A. Lightsey, "James Webb Space Telescope: large deployable cryogenic telescope in space," *Opt. Eng.* **51**, 011003 (2012).
56. A. Roberge, D. Fischer, B. Peterson, J. Bean, D. Calzetti, R. Dawson, C. Dressing, L. Feinberg, K. France, O. Guyon, W. Harris, M. Marley, V. Meadows, L. Moustakas, J. O'Meara, I. Pascucci, M. Postman, L. Pueyo, D. Redding, J. Rigby, D. Schiminovich, B. Schmidt, K. Stapelfeldt, C. Stark, and J. Tumlinson, "The Large UV / Optical / Infrared Surveyor (LUVOIR) Telling the Story of Life in the Universe," *Bull. AAS* **53**, 3847 (2021).
57. K. Zhang, X. Xie, C. Wang, H. Wang, F. Xu, H. Wang, X. Zhang, H. Guan, H. Qu, and J. Zhang, "Optomechanical Performances of Advanced Lightweight Mirrors Based on Additive Manufacturing," *Micromachines* **13**, (2022).
58. E. Hilpert, J. Hartung, H. von Lukowicz, T. Herffurth, and N. Heidler, "Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy for space applications," *Opt. Eng.* **58**, 1 (2019).
59. J. Mici, B. Rothenberg, E. Brisson, S. Wicks, and D. M. Stubbs, "Optomechanical performance of 3D-printed mirrors with embedded cooling channels and substructures," *Proc. SPIE* **9573**, 957306 (2015).
60. H. von Lukowicz, J. Hartung, E. Hilpert, C. Damm, T. Peschel, and N. Heidler, "Optimization and additive manufacturing of a three-mirror-anastigmatic telescope," *Proc. SPIE* **11852**, (2021).

61. R. M. Snell, C. Atkins, H. Schnetler, I. Todd, E. Hernández-Nava, A. R. Lyle, G. Maddison, K. Morris, C. Miller, M. Roulet, E. Hugot, F. Tenegi Sanginés, A. Vega-Moreno, B. van de Vorst, J. Dufils, L. Brouwers, S. Farkas, G. Mező, M. Beardsley, and M. Harris, "An additive manufactured CubeSat mirror incorporating a novel circular lattice," *Proc. SPIE*. **11451**, 114510C–1–114510C–16 (2020).
62. C. Liu, K. Xu, Y. Zhang, H. Hu, X. Tao, Z. Zhang, W. Deng, and X. Zhang, "Design and Fabrication of Extremely Lightweight Truss-Structured Metal Mirrors," *Materials (Basel)*. **15**, (2022).
63. Q. Fu, L. Yan, S. Tan, Y. Liu, and L. Wang, "Lightweight and High-Stiffness Metal Optical Systems Based on Additive Manufacturing," *Micromachines* **15**, (2024).
64. Y. Fan, D. Dong, C. Li, Y. Sun, Z. Zhang, F. Wu, L. Yang, and Q. Li, "Topology-Optimization Design Method of Space Mirror Based on Additive-Manufacturing Technology," *Mach. 2021* **9**, (2021).
65. R. Hu, S. Liu, and Q. Li, "Topology-optimization-based design method of flexures for mounting the primary mirror of a large-aperture space telescope," *Appl. Opt.* **56**, 4551 (2017).
66. R. Hu, W. Chen, Q. Li, S. Liu, P. Zhou, Z. Dong, and R. Kang, "Design Optimization Method for Additive Manufacturing of the Primary Mirror of a Large-Aperture Space Telescope," *J. Aerosp. Eng.* **30**, (2017).
67. R. Hu, W. Chen, Q. Li, S. Liu, P. Zhou, Z. Dong, and R. Kang, "Design Optimization Method for Additive Manufacturing of the Primary Mirror of a Large-Aperture Space Telescope," *J. Aerosp. Eng.* **30**, 04016093 (2017).
68. S. Liu, R. Hu, Q. Li, P. Zhou, Z. Dong, and R. Kang, "Topology optimization-based lightweight primary mirror design of a large-aperture space telescope," *Appl. Opt.* **53**, 8318 (2014).
69. O. Karcı and M. Ekinçi, "Design of a high-precision, 0.5 m aperture Cassegrain collimator," *Appl. Opt.* **59**, 8434 (2020).
70. P. C. T. Rees, I. P. Baker, D. A. Thomson, D. Catterall, M. Coleman, M. Jones, and J. B. Mitchell, "Development of a lightweight camera for high altitude platform systems," *Opt. Eng.* **59**, 1–24 (2020).

71. J. H. Clark and F. Ernesto Penado, "Method of analysis for determining and correcting mirror deformation due to gravity," *Opt. Eng.* **53**, 015102 (2014).
72. E. E. Bloemhof, J. C. Lam, V. A. Faria, and Z. Chang, "Extracting the zero-gravity surface figure of a mirror," *Opt. Infrared Interferom.* **7013**, 70133L (2008).
73. P. Jiang and P. Zhou, "Examination of the Blank Error on Mirror Accuracy of Lightweight SiC Mirror and a Compensation Method," *Photonics* **9**, (2022).
74. Y.-C. Chen, B.-K. Huang, Z.-T. You, C.-Y. Chan, and T.-M. Huang, "Optimization of lightweight structure and supporting bipod flexure for a space mirror," *Appl. Opt.* **55**, 10382 (2016).
75. Y. Peng and L. Yuan, "Aberration analysis for development of a large-aperture reflector by finite element," *Proc. SPIE* **7281**, 72810G (2009).
76. X. Liu, X. Zhang, and F. Tian, "Opto-mechanical Design of Monocrystalline Silicon Mirror for a Reflective Imaging Optical System Xiaofeng," *Curr. Opt. Photonics* **6**, 236–243 (2022).
77. H. P. Stahl, G. Kuan, W. Arnold, M. Baysinger, T. Brooks, J. Garcia, and B. Knight, "Habitable-zone observatory (HabEx) baseline 4-m telescope design and predicted performance," *Proc. SPIE* **11443**, 11443C (2020).
78. H. Kihm and H.-S. Yang, "Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope," *Opt. Eng.* **52**, 091806 (2013).
79. Y. Qu, Y. Jiang, L. Feng, X. Li, B. Liu, and W. Wang, "Lightweight design of multi-objective topology for a large-aperture space mirror," *Appl. Sci.* **8**, (2018).
80. G. Liu, L. Guo, X. Wang, and Q. Wu, "Topology and parametric optimization based lightweight design of a space reflective mirror," *Opt. Eng.* **57**, 1 (2018).
81. Z. Li, X. Chen, S. Wang, and G. Jin, "Optimal design of a $\Phi 760$ mm lightweight SiC mirror and the flexural mount for a space telescope," *Rev. Sci. Instrum.* **88**, (2017).
82. S. Tan, X. Zhang, L. Wang, H. Wu, Q. Fu, L. Yan, and M. Hu, "Equivalent Modeling and Verification of a High-Steepness and Lightweight Elliptical Aluminum Mirror," *Appl. Sci.* **12**, (2022).
83. C. Schwaer, A. Sinn, P. Keller, and G. Schitter, "Design methodology to develop an

- active optics system for a thin 1-m meniscus mirror," *J. Astron. Telesc. Instruments, Syst.* **6**, (2020).
84. C. Schwaer, A. Sinn, and G. Schitter, "Mechatronic approach towards lightweight mirrors with active optics for telescope systems," *IFAC-PapersOnLine* **52**, 7–12 (2019).
85. H. G. Rhee, H. Kihm, H. S. Yang, Y. S. Ghim, Y. W. Lee, and J. Lee, "Pixel-based absolute test of a 1-m lightweight mirror for a space telescope," *J. Korean Phys. Soc.* **65**, 1385–1389 (2014).
86. H.-B. Lee, J.-Y. Suk, and J.-I. Bae, "Trade study of all-SiC lightweight primary mirror and metering structures for spaceborne telescopes," *Proc. SPIE.* **9574**, 95740D–1–95740D–12 (2015).
87. J. H. Lee, Y. S. Jung, S. Y. Ryoo, Y. J. Kim, B. U. Park, H. J. Kim, S. K. Youn, K. W. Park, and H. B. Lee, "Imaging performance analysis of an EO/IR dual band airborne camera," *J. Opt. Soc. Korea* **15**, 174–181 (2011).
88. J. H. Lee, "Lightweight mirror design method using topology optimization," *Opt. Eng.* **44**, 053002 (2005).
89. J. Liu and B. Jiang, "Topology optimization design of a space mirror," *Sel. Pap. Photoelectron. Technol. Comm. Conf. held June–July 2015* **9795**, 97952Y (2015).
90. K. S. Park, S. Y. Chang, and S. K. Youn, "Topology optimization of the primary mirror of a multi-spectral camera," *Struct. Multidiscip. Optim.* **25**, 46–53 (2003).
91. D. Wang, S. Zhang, F. Tan, X. Zhi, Y. Chu, H. Lv, and R. Zhen, "A method on lightweight for the primary mirror of large space-based telescope based on neural network," *Int. Symp. Optoelectron. Technol. Appl. 2014 Imaging Spectrosc. Telesc. Large Opt.* **9298**, 92981J (2014).
92. Z. Wei and Y. Yi, "Design of lightweight mirror based on genetic algorithm," *Proc. SPIE* **6148**, 61480T–1 (2006).
93. R. Geyl and E. Ruch, "Progress in ultra-lightweight glass ceramic space optics," *Proc. SPIE.* **11852**, 1185207-1-1185207–11 (2021).
94. T. Westerhoff, T. B. Hull, and J. Krieg, "Better, faster, cheaper: Recent SCHOTT ZERODUR facilities are game-changing for high performance lightweight mirrors,"

- Proc. SPIE. **11852**, 118524R–1–118524R–9 (2021).
95. H. Philip Stahl, "Advanced ultraviolet, optical, and infrared mirror technology development for very large space telescopes," *J. Astron. Telesc. Instruments, Syst.* **6**, 025001-1-025001-26 (2020).
 96. J. T. Mooney, M. A. Allen, J. Bolton, R. J. Dahl, and E. A. Lintz, "Lightweight mirror construction optimization," *Proc. SPIE.* **9633**, 96330Z–1–96330Z–8 (2015).
 97. E. Sein, Y. Toulemont, F. Safa, M. Duran, P. Deny, D. de Chambure, T. Passvogel, and G. L. Pilbratt, "A Φ 3.5m diameter Sic telescope for Herschel mission," *Proc. SPIE.* **4850**, 606 (2003).
 98. L. Li, Z. Liu, D. Xue, W. Deng, R. Li, Y. Bai, X. Zeng, and X. Zhang, "Rapid fabrication of a lightweight 2 m reaction-bonded SiC aspherical mirror," *Results Phys.* **10**, 903–912 (2018).
 99. P. Hofbauer and M. R. Krödel, "Designing optimized ultra-lightweight mirror structures made of Cesium for space and ground based applications," *Proc. SPIE* **7739**, 77390J (2010).
 100. Y. Han, Y. Zhang, J. Han, J. Zhang, W. Yao, and Y. Zhou, "Optimum structural design of lightweight silicon carbide mirror in cassegrain system," *1st Int. Symp. Syst. Control Aerosp. Astronaut.* **2006**, 1009–1013 (2006).
 101. Z. Yu, X. Wu, and F. Wang, "Active Support System for the Correction of a 4m SiC Primary Mirror Based on the Bending Mode," *Appl. Sci.* **13**, (2023).
 102. X. Zhang, H. Hu, X. Wang, X. Luo, G. Zhang, W. Zhao, X. Wang, Z. Liu, L. Xiong, E. Qi, C. Cui, Y. Wang, Y. Li, X. Wang, L. Li, Y. Bai, Q. Cheng, Z. Zhang, R. Li, W. Tang, X. Zeng, W. Deng, and F. Zhang, "Challenges and strategies in high-accuracy manufacturing of the world's largest SiC aspheric mirror," *Light Sci. Appl.* **11**, (2022).
 103. M. Kotani, T. Imai, H. Katayama, Y. Yui, Y. Tange, H. Kaneda, T. Nakagawa, and K. Enya, "Quality evaluation of spaceborne SiC mirrors (I): Analytical examination of the effects on mirror accuracy by variation in the thermal expansion property of the mirror surface," *Appl. Opt.* **52**, 4797–4805 (2013).
 104. Z. Liu, L. Li, E. Qi, H. Hu, and X. Luo, "Fabrication of a 4 m SiC Aspheric Mirror Using an Optimized Strategy of Dividing an Error Map," *Photonics* **11**, (2024).

105. X. Luo, "High-precision fabrication of 4m SiC aspheric mirror," *Light Sci. Appl.* **12**, (2023).
106. Y. Liu, Z. Ma, J. Chen, Z. Chen, X. Liu, and Z. Huang, "Environmental simulation evaluation of SSiC brazed optical mirrors," *7th Int. Symp. Adv. Opt. Manuf. Test. Technol. Large Mirrors Telesc.* **9280**, 928009 (2014).
107. Z. Wang, T. Chen, Y. Cao, W. Fan, H. Wang, and W. Wang, "The Optimization Design of a Lightweight 2 m SiC Mirror for Ground-Based Telescopes," *Photonics* **11**, (2024).
108. L. Zhou, H. Ma, B. Zhong, and J. Wang, "Ultra-precision grinding of light-weighted SiC aspheric mirror," *J. Phys. Conf. Ser.* **2591**, (2023).
109. H. Leea, R. G. Cobb, D. Development, and P. O. Box, "Design of lightweight primary mirror and metering structure for spaceborne telescope," *Proc. SPIE* **6049**, 60490P (2005).
110. J. Breyse, D. Castel, and M. Bougoin, "All-SiC telescope technology at EADS ASTRIUM: Big step forward for space optical payloads," *Proc. SPIE* **10564**, 1056442 (2012).
111. M. Bougoin, F. Mallet, J. Lavenac, A. Gerbert Gaillard, D. Ballhause, and F. Chaumeil, "Full-SiC EUCLID's very large telescope," *Proc. SPIE* **11180**, 111801P (2018).
112. M. Kroedel and C. Devilliers, "Cesic: optomechanical technology last development results and new HBCesic highly light weighted space mirror development including corrective function 7th international conference on space optics, october 2008," *Proc. SPIE* **10566**, 105660N (2008).
113. Z. Zhang, X. Yang, L. Zheng, and D. Xue, "High-performance grinding of a 2-m scale silicon carbide mirror blank for the space-based telescope," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **89**, 463–473 (2017).
114. G. Xu, X. Zhao, M. Liu, and Y. Liu, "Design of mirror assembly and surface simulation for CPA," *Optik (Stuttg.)* **192**, 162939 (2019).
115. and K. M.-W. Jong-In Bae, Haeng-Bok Lee, Jeong-Won Kim, "Design of All-SiC Lightweight Secondary and Tertiary Mirrors for Use in Spaceborne Telescopes," *Curr. Opt. Photonics* **6**, 60–68 (2022).

116. S. Guo, G. Zhang, L. Li, W. Wang, and X. Zhao, "Effect of materials and modelling on the design of the space-based lightweight mirror," *Mater. Des.* **30**, 9–14 (2009).
117. W.-C. Lin, S.-T. Chang, S.-H. Chang, C.-P. Chang, Y.-C. Lin, C.-C. Chin, H.-P. Pan, and T.-M. Huang, "Alignment and assembly process for primary mirror subsystem of a spaceborne telescope," *Opt. Eng.* **54**, 115109 (2015).
118. H. Kihm, H. S. Yang, and Y. W. Lee, "Bipod flexure for 1-m primary mirror system," *Rev. Sci. Instrum.* **85**, (2014).
119. B. Liu, W. Wang, Y.-J. Qu, X.-P. Li, X. Wang, and H. Zhao, "Design of an adjustable bipod flexure for a large-aperture mirror of a space camera," *Appl. Opt.* **57**, 4048 (2018).
120. S. Jeong, J. W. Nam, K. B. Ahn, I. H. Park, S. W. Kim, J. Lee, H. Lim, S. Brandt, C. Budtz-Jørgensen, A. J. Castro-Tirado, P. Chen, M. H. Cho, J. N. Choi, B. Grossan, M. A. Huang, A. Jung, J. E. Kim, M. B. Kim, Y. W. Kim, E. V. Linder, K. W. Min, G. W. Na, M. I. Panasyuk, J. Ripa, V. Reglero, G. F. Smoot, J. E. Suh, S. Svertilov, N. Vedenkin, and I. Yashin, "Slewing Mirror Telescope optics for the early observation of UV/optical photons from Gamma-Ray Bursts," *Opt. Express* **21**, 2263 (2013).
121. Y.-C. Lin, K.-H. Wu, T.-M. Huang, C.-Y. Chan, S.-T. Chang, C.-C. Lien, and H.-L. Tsay, "The design and assembly of aluminum mirrors of a three-mirror-anastigmat telescope," *Proc. SPIE* **10562**, 105624X (2016).
122. B.-H. Kim, J.-U. Lee, I.-K. Moon, H.-S. Yang, H.-Y. Kihm, and Y.-W. Lee, "Optimization of 30 cm Lightweight Mirror," *Korean J. Opt. Photonics* **21**, 214–223 (2010).
123. L. Ma, S. Tan, L. Yan, S. Ma, H. Wu, and X. Zhang, "Optimization design and analysis of double-sided integrated mirror structure," *J. Appl. Opt.* **45**, 45–53 (2024).
124. X. Yin, B. Zhang, X. Zhang, L. Wei, L. Zhang, C. Song, and L. Yin, "Optimal design of integrated main supporting structure with ultra-light weight and high stability for space camera," *J. Vibroengineering* **23**, 1694–1706 (2021).
125. L. I. G. Uo, H. A. J. Iang, Q. L. U. Ishuai, J. Inlong, H. Uang, Y. A. Z. Heng, Y. I. Z. Hang, and Y. Ongchen, "Hybrid ball-hinged secondary mirror assembly for high-precision surface shape maintenance," **31**, 22603–22621 (2023).
126. H. Philip Stahl, "Advanced ultraviolet, optical, and infrared mirror technology

- development for very large space telescopes," *J. Astron. Telesc. Instruments, Syst.* **6**, 1 (2020).
127. X. Zhou, Y. Zhang, Y. Jiang, S. Ding, and L. Sun, "Optik A horizontal-axis spaceborne primarymirror design," *Optik (Stuttg.)* **224**, 165671 (2020).
128. Y.-C. Chen, B.-K. Huang, Z.-T. You, C.-Y. Chan, and T.-M. HUANG, "Optimization of lightweight structure and supporting bipod flexure for a space mirror," *Appl. Opt.* **55**, 10382–10391 (2016).
129. K. Song, D. Li, C. Zhang, T. Liu, Y. Tang, Y. M. Xie, and W. Liao, "Bio-inspired hierarchical honeycomb metastructures with superior mechanical properties," *Compos. Struct.* **304**, (2023).
130. H. Song, C. Zhang, P. Wang, L. Meng, and Z. Wang, "A new type of hierarchical honeycomb in-plane impact study," *Materials (Basel)*. **14**, (2021).
131. Y. Tao, R. Zhao, J. Shi, D. Zhou, and Y. Han, "In-Plane Elastic Properties of 3D-Printed Graded Hierarchical Hexagonal Honeycombs," *Polymers (Basel)*. **16**, 1–20 (2024).
132. Y. Zhu, J. Deng, W. Xiong, T. You, and W. Zhou, "Koch Hierarchical Honeycomb: A Fractal-Based Design for Enhanced Mechanical Performance and Energy Absorption," *Materials (Basel)*. **16**, 1–15 (2023).
133. M. Zoumaki, M. T. Mansour, K. Tsongas, D. Tzetzis, and G. Mansour, "Mechanical Characterization and Finite Element Analysis of Hierarchical Sandwich Structures with PLA 3D-Printed Core and Composite Maize Starch Biodegradable Skins," *J. Compos. Sci.* **6**, (2022).
134. D. Mousanezhad, H. Ebrahimi, B. Haghpanah, R. Ghosh, A. Ajdari, A. M. S. Hamouda, and A. Vaziri, "Spiderweb honeycombs," *Int. J. Solids Struct.* **66**, 218–227 (2015).
135. M. I. Chibinyani, T. C. Dzogbewu, M. Maringa, and A. M. Muiruri, "Numerical modelling of Ti6Al4V(ELI) hierarchical honeycomb structures of order one at the vertices," *Results Eng.* **21**, (2024).
136. J. Sherman, W. Zhang, and J. Xu, "Energy Absorption Performance of Bio-inspired Honeycombs: Numerical and Theoretical Analysis," *Acta Mech. Solida Sin.* **34**, 884–894 (2021).

137. D. Mousanezhad, S. Babaei, H. Ebrahimi, R. Ghosh, A. S. Hamouda, K. Bertoldi, and A. Vaziri, "Hierarchical honeycomb auxetic metamaterials," *Sci. Rep.* **5**, 1–8 (2015).
138. W. He, X. Peng, F. Xin, and T. J. Lu, "Ultralight micro-perforated sandwich panel with hierarchical honeycomb core for sound absorption," *J. Sandw. Struct. Mater.* **24**, 201–217 (2022).
139. M. Rahmani and M. Bouafia, "Design and performance evaluation of lightweight mirror blanks for space-based telescopes based on various hierarchical honeycomb cores," *J. Opt.* (2025).
140. Q. Dong, J. Yang, T. Zhang, and X. Wang, "Optimization of Ultra Lightweight Mirror and Opto-Mechanical–Thermal Coupling Analysis Based on Solar Thermal Radiation," *Sensors* **25**, (2025).
141. S. Hou, C. Shu, S. Zhao, T. Liu, X. Han, and Q. Li, "Experimental and numerical studies on multi-layered corrugated sandwich panels under crushing loading," *Compos. Struct.* **126**, 371–385 (2015).
142. A. Hernández-Pérez, R. Hägglund, L. A. Carlsson, and F. Avilés, "Analysis of twist stiffness of single and double-wall corrugated boards," *Compos. Struct.* **110**, 7–15 (2014).
143. J. S. Yang, Z. Da Liu, R. Schmidt, K. U. Schröder, L. Ma, and L. Z. Wu, "Vibration-based damage diagnosis of composite sandwich panels with bi-directional corrugated lattice cores," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **131**, (2020).
144. J. Zhang, T. Taylor, T. Kizaki, and J. Yanagimoto, "Bendable metal-based composite sheets with a truncated dome core made of carbon fibre reinforced thermoplastics," *Compos. Struct.* **236**, 111918 (2020).
145. I. Dayyani, A. D. Shaw, E. I. Saavedra Flores, and M. I. Friswell, "The mechanics of composite corrugated structures: A review with applications in morphing aircraft," *Compos. Struct.* **133**, 358–380 (2015).
146. C. Kiliçaslan, M. Güden, I. K. Odaci, and A. Taşdemirci, "Experimental and numerical studies on the quasi-static and dynamic crushing responses of multi-layer trapezoidal aluminum corrugated sandwiches," *Thin-Walled Struct.* **78**, 70–78 (2014).
147. J. Zhou, Z. W. Guan, and W. J. Cantwell, "Scaling effects in the mechanical response of

- sandwich structures based on corrugated composite cores," *Compos. Part B Eng.* **93**, 88–96 (2016).
148. V. Daliri and A. Zeinedini, "Flexural Behaviour of the Composite Sandwich Panels with Novel and Regular Corrugated Cores," *Appl. Compos. Mater.* **26**, 963–982 (2019).
149. Q. Tao, C. Wang, K. Wang, Z. Xie, and H. Tan, "Mixed-mode bending of a smart reconfigurable lattice structure with bi-directional corrugated core," *Int. J. Mech. Sci.* **185**, 105848 (2020).
150. Y. Xing, S. Yang, S. Lu, P. Zhang, Y. An, W. Yu, and J. Zhai, "Mechanical properties of bi-directional corrugated honeycomb aluminum filled with expanded polypropylene under quasi-static compression," *Int. J. Crashworthiness* **26**, 674–683 (2021).
151. A. Mukherjee, D. Kumar, S. F. Ali, and A. Arockiarajan, "Design and conception of a trailing edge morphing wing concept with bistable composite skin," *Proc. SPIE* **11376**, 113762K (2020).
152. Z. H. Wen, D. W. Wang, and L. Ma, "Sound transmission loss of sandwich panel with closed octahedral core," *J. Sandw. Struct. Mater.* **23**, 174–193 (2021).
153. V. T. Le and N. S. Goo, "Thermomechanical performance of bio-inspired corrugated-core sandwich structure for a thermal protection system panel," *Appl. Sci.* **9**, 1–23 (2019).
154. L. Ge, H. Zheng, H. Li, B. Liu, H. Su, and D. Fang, "Compression behavior of a novel sandwich structure with bi-directional corrugated core," *Thin-Walled Struct.* **161**, 107413 (2021).
155. X. Yang, J. Ma, Y. Shi, Y. Sun, and J. Yang, "Crashworthiness investigation of the bio-inspired bi-directionally corrugated core sandwich panel under quasi-static crushing load," *Mater. Des.* **135**, 275–290 (2017).
156. A. Shahbazi and A. Zeinedini, "Impact response of E-glass/epoxy composite bi-directional corrugated core sandwich panels," *Polym. Polym. Compos.* **29**, 1563–1574 (2021).
157. C. Atkins, W. Brzozowski, N. Dobson, S. Todd, C. Atkins, W. Brzozowski, N. Dobson, M. Milanova, D. Pearson, C. Bourgenot, D. Brooks, R. Snell, P. Cooper, S. G. Alcock, and I. Nistea, "Lightweighting design optimisation for additively manufactured mirrors,"

- Proc. SPIE. **11116**, 1111617-1-1111617–19 (2019).
158. M. Roulet, E. Hugot, C. Atkins, S. Lemared, S. Lombardo, and M. Ferrari, "3D printing for astronomical mirrors," 3 (2018).
159. C. Atkins, C. Feldman, D. Brooks, S. Watson, W. Cochrane, M. Roulet, E. Hugot, M. Beardsley, C. Spindloe, S. Alcock, I.-T. Nistea, C. Morawe, F. Perrin, and M. Harris, "Topological design of lightweight additively manufactured mirrors for space," Proc. SPIE 15 (2018).
160. N. Heidler, E. Hilpert, J. Hartung, and T. Albert, "Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing," *Ameriacn Soc. Precis. Eng.* **0826**, 2–5 (2014).
161. H. Herzog, J. Segal, J. Smith, R. Bates, J. Calis, A. De La Torre, D. W. Kim, J. Mici, J. Mireles, D. M. Stubbs, and R. Wicker, "Optical fabrication of lightweighted 3D printed mirrors," Proc. SPIE **9573**, 957308 (2015).
162. J. Zhang, C. Wang, H. Qu, H. Guan, H. Wang, X. Zhang, X. Xie, H. Wang, K. Zhang, and L. Li, "Design and Fabrication of an Additively Manufactured Aluminum Mirror with Compound Surfaces," *Materials (Basel)*. **15**, 1–17 (2022).
163. M. Roulet, C. Atkins, E. Hugot, R. Snell, B. van de Vorst, K. Morris, M. Marcos, I. Todd, C. Miller, J. Dufils, S. Farkas, G. Mezo, F. Tenegi, A. Vega-Moreno, and H. Schnelter, "Use of 3D printing in astronomical mirror fabrication," Proc. SPIE. **11349**, 113490D (2020).
164. M. Rahmani and M. Bouafia, "Entangled multidirectional corrugated core lightweight mirror designs for space-based telescopes," *Appl. Opt.* **64**, 127–136 (2025).

Résumé

Les miroirs primaires des télescopes spatiaux sont d'une importance capitale en imagerie. Ils doivent offrir le meilleur compromis entre masse, coût, rigidité, et performances. Au cours des dernières décennies, plusieurs matériaux et architectures ont été développés pour permettre leur allègement tout en maintenant un niveau de performances acceptable. Dans cette thèse, nous proposons de nouvelles architectures à cœurs cellulaires, innovantes, pour les miroirs légers des télescopes spatiaux qui offrent de meilleures performances optomécaniques que les miroirs légers à cœurs en nid d'abeille classiques. Ainsi, nous avons exploré, en premier lieu, quelques stratégies de renforcements locaux pour l'amélioration des performances d'un miroir à cœur en nid d'abeille, avec des améliorations allant jusqu'à 22.07 %. Nous avons ensuite, exploré l'emploi des cœurs en nid d'abeille hiérarchiques, grâce auxquels, nous avons pu atteindre des améliorations substantielles de 33.60 %. Enfin, nous avons mis au point de nouvelles architectures de cœurs ondulés multidirectionnels enchevêtrés pour les miroirs légers des télescopes spatiaux qui ont permis des améliorations de 33.56 %.

Mots-clés

Télescopes spatiaux ; Miroirs légers ; Cœurs cellulaires ; Performances optomécaniques

Abstract

Primary mirrors of space telescopes are of crucial importance in imaging. They must offer the best compromise between mass, cost, stiffness, and performance. Over the past decades, several materials and architectures have been developed to reduce their weight while maintaining an acceptable level of performance. In this thesis, we propose new innovative cellular core architectures for lightweight mirrors of space telescopes, offering better optomechanical performance than classical honeycomb-core lightweight mirrors. First, we explored some local reinforcement strategies to improve the performance of a honeycomb-core mirror, achieving enhancements of up to 22.07%. Next, we investigated the use of hierarchical honeycomb cores, which led to substantial improvements of 33.60%. Finally, we developed new architectures of entangled multidirectional corrugated cores for lightweight mirrors of space telescopes, resulting in improvements of 33.56%.

Keywords

Space telescopes; Lightweight mirrors; Cellular cores; Optomechanical performance

الملخص

تُعد المرايا الأولية للتلسكوبات الفضائية ذات أهمية بالغة في التصوير، إذ يجب أن تحقق أفضل توازن ممكن بين الكتلة، والتكلفة، والصلابة، والأداء. على مدى العقود الماضية، تم تطوير عدة مواد وهياكل بهدف تخفيف وزنها مع الحفاظ على مستوى أداء مقبول. في هذه الأطروحة، نقترح هياكل خلوية جديدة ومبتكرة للمرايا الخفيفة الخاصة بالتلسكوبات الفضائية، تقدم أداءً بصرياً-ميكانيكياً أفضل من المرايا الخفيفة ذات القلوب الكلاسيكية على شكل خلية نحل. في البداية، استكشفنا بعض استراتيجيات التعزيز الموضعي لتحسين أداء مرآة ذات قلب خلوية نحل، وحققنا تحسينات تصل إلى 22.07%. بعد ذلك، درسنا استخدام القلوب الخلوية الهرمية، والتي مكّنتنا من الوصول إلى تحسينات كبيرة بلغت 33.60%. وأخيراً، طورنا هياكل جديدة للقلوب المتموجة متعددة الاتجاهات. والنتيجة المتشابهة للمرايا الخفيفة الخاصة بالتلسكوبات الفضائية، والتي سمحت بتحقيق تحسينات بنسبة 33.56%.

الكلمات المفتاحية

التلسكوبات الفضائية؛ المرايا الخفيفة؛ القلوب الخلوية؛ الأداء البصري-الميكانيكي