

N° d'ordre :

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université BLIDA1

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales



Thèse de Doctorat

Spécialité : Aéronautique

Option : Aéronautique

Présentée par

Abdessamed MOGTIT

THÈME

**Contribution à l'optimisation de la
sectorisation de l'espace aérien**

Application à la FIR Alger et les FIRs France

Soutenue le 19 novembre 2020, devant le jury composé de :

Président :	M. Salah BOUKRAA	Professeur, Université Blida1
Examineurs :	Mme. Amina BENKHEDDA	Professeur, Université Blida1
	M. Méziane AÏDER	Professeur, USTHB
	M. Nour El Islam BACHARI	Professeur, USTHB
Directeurs :	M. Mohand LAGHA	Professeur, Université Blida1
	M. Yahia LEBBAH	Professeur, Université Oran1
Invité :	M. Nouredine ARIBI	MCA, Université Oran1

Dédicaces

A la mémoire de mon père,

A ma mère,

A ma femme et ma fille

A mes deux frères et ma sœur.

Remerciements

Les travaux de recherches présentés dans cette thèse ont été réalisés entre deux établissements : le Laboratoire des Sciences Aéronautiques (LSA) à l'Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales (IAES) de Blida¹ sous la direction de Monsieur Mohand LAGHA et le Laboratoire d'Informatique et des Technologies de l'Information (LITIO) de l'Université d'Oran¹, sous la direction de Monsieur Yahia LEBBAH. Je tiens à leur exprimer mes remerciements et mes reconnaissances les plus profondes pour leurs conseils, leurs encouragements et le partage de leurs connaissances scientifiques.

Ma plus grande gratitude va aussi à Nouredinne ARIBI de l'équipe du LITIO pour l'effort qu'il m'a fourni et l'intérêt avec lequel il a suivi les travaux de ma thèse. Ces conseils précieux m'ont beaucoup aidé à mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur BOUKRAA Salah qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Mes remerciements vont également aux membres de jury : Madame BENKHEDDA Amina, Messieurs : AÏDER Méziane et BACHARI Nour El Islam. Leurs rigueurs scientifiques et leurs expériences m'ont été extrêmement profitables.

Je n'oublie pas les personnes qui m'ont aidé de près et de loin dans mes travaux, spécialement Monsieur Patrick SIARRY et Messieurs Hamouche OULHADJ et Ahmed Nasreddine BENAICHOUCHE pour les discussions scientifiques que nous avons eues. Je voudrais également remercier tout le personnel du LiSSi, université Paris –Est Créteil. Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Bruno NICOLAS (*Statistics Specialist Eurocontrol- Network Manager Directorate - Performance Forecasts Relations-PRISME*) pour sa collaboration et la fourniture de jeux de données de l'espace aérien Français et rendre cette étude possible. Mes chaleureux remerciements vont à toute ma famille pour son soutien moral indéfectible, à tous mes amis.

ملخص : أصبحت مسألة التقسيم المتوازن للمجال الجوي مهمة للغاية، لا سيما في السنوات الأخيرة،

بسبب عدد الرحلات الجوية التي تتزايد بشكل مستمر. إن الخطة القطاعية الحالية للمجال الجوي غير قادرة على الاستجابة لحركة المرور الكبيرة، مما أدى إلى عدم التوازن والتوزيع الغير المتكافئ لعبء العمل بين قطاعات الحركة الجوية. في هذه الأطروحة، نقترح نموذج البرمجة بالمقيدات (PPC)، يسمى EQASP، بناء على تحسين طريقة (OWA) المتعدد (نموذج تسلسلي ومتوازي (Portfolio))، والذي يدمج التوازن في طرح *Trancdac et al.* تم تقييم النموذج ومقارنته وفقا لنوعية توازن عبء العمل بين القطاعات وأداء الحل مع الطريقة المقترحة من قبل *Trancdac et al.* باستخدام مجموع البيانات من حركة جوية منخفضة المستوى في المجال الجوي الفرنسي ليوم كامل وللأجواء الجزائرية لمدة ثلاث فترات مختلفة (ساعات خارج أوقات الذروة، ساعات الذروة ومدة 24 ساعة). استنادا إلى طريقة تحسين المعايير المتعددة (OWA)، أثبت النموذج المقترح (EQASP)، أنه يحسن عملية الحل لضمان التوزيع العادل لعبء العمل بين القطاعات، ويوفر حل وسط جيد بين جودة الحل ووقت التنفيذ. ولوحظ أنه من أجل حل المشكلات القطاعية، أنتجت الأداة الموازية (BASS) في جميع الأوقات حل قطاعيا قابلا للتطبيق يستجيب لجميع القيود التقنية للتقسيم عند حل الحالات الصعبة.

الكلمات الرئيسية: تقسيم المجال الجوي، إدارة الحركة الجوية، التوازن، برمجة القيد، تحسين المعايير،

نهج الحافظة.

Résumé : La problématique de la sectorisation équilibrée de l'espace aérien est devenue extrêmement importante, en particulier ces dernières années, en raison du nombre de vol qui ne cessent d'augmenter. Le plan de sectorisation existant de l'espace aérien étant actuellement incapable de répondre aux volumes de trafic aérien, ce qui entraîne un déséquilibre et une répartition inégale de la charge de travail entre les secteurs de contrôle. Dans cette étude, nous proposons un modèle exact basé sur la programmation par contraintes (PPC), appelé (EQASP), qui repose sur l'optimisation multi-agents OWA (modèle séquentiel et parallèle (Portfolio)), qui intègre l'équité dans l'approche de *Trancdac et al.*. Le modèle (EQASP) a été évalué et comparé en fonction de la qualité de l'équilibre de la charge de travail entre les secteurs et de la performance de la résolution avec la méthode proposée par *Trancdac et al.* en utilisant des jeux de données de réseau à basse altitude dans l'espace aérien français pour cinq FIRs pour une journée complète et l'espace aérien algérien pendant trois périodes différentes (heures creuses, heures de pointe et 24 heures). Il a été démontré que notre modèle proposé (EQASP), basé sur l'optimisation multi-agents de la méthode OWA, renforce le processus de résolution pour assurer l'équité de la charge de travail entre les secteurs et offre un bon compromis entre la qualité de la solution et le temps d'exécu-

tion. Il a été noté que, lors de la résolution des problèmes, notre outil (*BASS*) parallèle aboutissait à une solution de sectorisation viable qui répondait à toutes les contraintes géométriques de la sectorisation lors de la résolution des grandes instances.

Mots-clés : Sectorisation de l'espace aérien, gestion du trafic aérien, équité, programmation par contraintes, optimisation, approche Portfolio.

Abstract : The airspace sectorization problem is becoming of paramount importance, particularly in recent years, due to the number of flight which are increasingly on the rise. The existing sectorization plan for airspace is currently unable to respond to important high-traffic, resulting in an imbalance and uneven distribution of workload between the control sectors. In this thesis, we propose a constraint programming model (CP), coined (EQASP), based on OWA multi-agent optimization (Standard and Parallel Portfolio), which integrates the equity into Trandac *et al.* approach. The sequential and parallel portfolio versions EQASP model was evaluated and compared based on the quality of the workload balancing across sectors and the resolution performance with the competitive method of Trandac *et al.* using low-level network datasets in French airspace for full-day and Algerian airspace for three different periods (off-peak hours, peak hours, and 24 hours). It has been shown that our proposed EQASP model, based on the multi-criteria optimization method (OWA), strengthens the resolution process to ensure the fairness of the workload between the sectors and offers a good compromise between the quality of the solution and the time of resolution. It was pointed out that, when solving problems, our parallel BASS tool resulted at all times in a viable sectorization solution that met all the geometric constraints of sectorization when solving large instances.

Key words : Airspace sectorization, Air traffic management, Equity, Constraint programming, optimization, Parallel Portfolio approach.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	iii
Résumé	v
Table des matières	x
Nomenclature	xi
Introduction générale	1
1 Principes généraux d'organisation et de gestion de l'espace aérien	9
1.1 Structure de base de l'espace aérien	9
1.2 Service de la circulation aérienne	10
1.2.1 Service de contrôle d'aérodrome	11
1.2.2 Service de contrôle d'approche	11
1.2.3 Service de contrôle régional	11
1.3 Gestion de l'espace aérien (ASM) et conception	12
1.4 Charge de travail et contraintes liées à la sectorisation de l'espace aérien	14
1.4.1 Charges de travail	14
1.4.2 Contraintes géométriques	15
1.5 Saturation de l'espace aérien vers une resectorisation équilibrée	17
1.5.1 La question de la saturation de l'espace aérien	17
1.5.2 Situation actuelle en matière de retards	19
1.5.3 Causes principales contribuant au retard	20
1.5.4 Retards ATFM -En route	20
1.6 Application de régulations ATFM	22
1.6.1 Planification stratégique	22
1.6.2 Planification pré tactique	22
1.6.3 Planification tactique	23

1.7	Conclusion	24
2	Techniques d'optimisation de la sectorisation de l'espace aérien	25
2.1	Introduction	26
2.2	Sectorisation de l'espace aérien	26
2.3	Techniques de résolutions des problèmes de la SEA	27
2.3.1	Les approches basées sur le modèle cellulaire	27
2.3.2	Les approches basées sur le modèle des algorithmiques géométriques	31
2.3.3	Les approches basées sur le modèle de graphe	35
2.3.4	Sectorisation de l'espace aérien par la PPC	38
2.4	Conclusion	42
3	Méthodes de modélisation et de résolution par la programmation par contraintes	43
3.1	Introduction	43
3.2	Programmation par contraintes	44
3.2.1	Problème combinatoire	44
3.2.2	Principe de filtrage et de consistance locale	46
3.2.3	Stratégies de recherche	47
3.3	Contraintes globales	50
3.4	Principe de parallélisme	51
3.4.1	Solveurs SAT parallèles	51
3.4.2	Langages PPC	52
3.4.3	Mesure de performance	52
3.4.4	Résolution parallèle de contraintes	53
3.4.5	Espace de recherche partagé en mémoire	53
3.4.6	Division de l'espace de recherche	54
3.4.7	Division du problème	54
3.5	Modèles de parallélisation Portfolio	54
3.5.1	Le premier modèle Portfolio N To N	55
3.5.2	Le deuxième modèle Portfolio N To P	56
3.6	Consistance et propagation parallèles	57
3.6.1	Consistance d'Arc parallèle	57

Table des matières

3.6.2	La recherche parallèle	57
3.7	Conclusion	58
4	Sectorisation optimisée équitable de l'espace aérien	59
4.1	Introduction	60
4.2	Contribution de la PPC à la gestion du trafic aérien	60
4.3	Modèle de sectorisation de l'espace aérien	61
4.3.1	Modélisation de l'espace aérien et partitionnement de graphes	61
4.3.2	Variables	62
4.3.3	Contraintes	64
4.4	Optimisation multiagent équitable	70
4.4.1	Fonctions d'agrégation équitables	75
4.4.2	Moyennes pondérées ordonnées	76
4.4.3	Équité en optimisation multicritère	77
4.5	Sectorisation optimisée équitable	80
4.5.1	Modèle d'équité EQASP	80
4.6	Approche Portfolio pour une sectorisation équilibrée	82
4.7	Conclusion	83
5	Étude expérimentale	85
5.1	Introduction	86
5.2	Protocole expérimental	86
5.2.1	Environnement informatique	86
5.2.2	Mesures qualitatives	86
5.2.3	Stratégie de portfolio parallèle coopérative et réglage des performances	87
5.3	Instances de tests : données de trafic aérien	88
5.4	Résultats de la sectorisation	89
5.4.1	Résultats initiaux	91
5.4.2	Résultats de la sectorisation de l'espace aérien algérien	92
5.4.3	Résultats de la sectorisation de l'espace aérien français	96
5.5	Conclusion	107
	Conclusion générale et perspectives	109

Annexe A : Travaux de recherche	113
Références bibliographiques	114

Nomenclature

Liste des symboles

C_1, C_2, C_3	Coefficients positifs de pondération.
F_{b1}	Charge de surveillance.
F_{b2}	Charge de travail basé sur le nombre des avions.
F_c	Charge de coordination.
F_t	Charge de temps minimum de séjour de l'avion.
V_p, V_q	Deux partitions de graphe G .
ω_{ij}	Poids des arêtes de graphe entre 2 sommets.
ω_i	Poids de sommets.
k	Nombre des secteurs.
G	Graphe.
S	Ensembles des sommets.
U	Ensembles des arêtes.
(s_i, s_j)	Deux sommets de l'ensembles S du graphe G .
(c_{ij}, y_{ij})	Variation auxiliaires.
a, b, c	Triplet de sites.
$l(v_a^i, v_b^j)$	Distance entre 2 sommets.
l_{min1}	Contrainte de temps de passage minimum.
l_{min2}	Contrainte de distance minimum.
σ	Taux de tolérance.
W_{max}	Charge de travail maximale.
W_{min}	Charge de travail minimale.

Abréviations

4DT	4-Dimensional Trajectories.
AIP	Aeronautical information publication.
ANSP	Air Navigation Service Providers.
APP	Approach Control Services.
ARTCC	Air Route Traffic Control Centers.
ATC	Air Traffic Control.
ATFCM	Air Traffic Flow and Capacity Management.
ATFM	Air Traffic Flow Management.
ATM	Air Traffic Management.
ATS	Air Traffic Service.
AUP	Airspace User Plan.
BASS	Balanced AirSpace Sectorization.
CBLs	Constraint-based local search.
CFMU	Central Flow Management Unit.
CSP	Constraint Satisfaction Problem.
DAC	Dynamic Airspace Configurations.
DACM	Direction Générale de l'Aviation Civile et de la Météorologie.
DAS	Dynamic Airspace Sectorisation.
DBDFS	Discrepancy Bounded Depth First Search.
DCSP	Distributed Constraint Satisfaction Problem.
DoD	Department of Defense.
EAs	Evolutionary Algorithms.
ECAC	European Civil Aviation Conference.
ENNA	Établissement National de la Navigation Aérienne.
ENR	EN-Route.
EQASP	Équilibre AirSpace Problem.
ERASMUS	En-Route Air traffic Soft Management Ultimate System.
FAA	Federal Aviation Administration.
FIR	Flight Information Region.
FL	Flight Level.

FMP	Flight Management Position.
FPA	Fix Posting Area.
FRA	Free Route Airspace.
Ft	Foot.
FUA	Flexible Use of Airspace.
iABM	improved Agent Based Model.
IFR	Instruments Flight Rules.
IMC	Instruments Meteorological Conditions.
LiSSi	Laboratoire Images, Signaux et Systèmes Intelligents.
LITIO	Laboratoire d'Informatique et des Technologies de l'Information d'Oran.
LNS	Large Neighborhood Search.
LSA	Laboratoire des Sciences Aéronautiques.
MAP	Monitor Alert Parameter.
MIP	Mixed Integer Program.
NAS	Espace Aérien Nationaux.
NextGEN	Next Generation Air Transportation System.
nm	nautical mile.
NMOC	Network Management Operations Centre.
NSGA-II	Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II.
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale.
OWA	Order Weight Average.
PBN	Based Navigation Performance.
PPC	Programmation Par Contrainte.
PSNA	Prestataire de Service de la Navigation Aérienne.
RVSM	Reduced Vertical Separation Minima.
SEA	Sectorisation de l'Espace Aérien.
SESAR	Single European Sky ATM Research.
SLS	Stochastic local Search.

SRG	Seeded Region Growing.
Std.Dev	Standard Deviation.
TAAM	Total Airspace and Airport Modeller.
TWR	Tower.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle.
utoSec	Automatic Sectorization.
UUP	Updated Airspace User Plan.
VFR	Visual Flight Rules.
VMC	Visual Meteorological Conditions.
Vsids	Heuristiques de choix de variables de branchement.

Liste des tableaux

5.1	Caractérisation des instances de benchmarking de l'espace aérien algérien.	92
5.2	Caractérisation des instances de benchmarking du réseau d'espace aérien français.	97
5.3	Les résultats de sectorisation de la FIR Reims pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 avec portfolio.	100
5.4	Les résultats de sectorisation de la FIR Reims pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 sans portfolio.	100
5.5	Les résultats de sectorisation de la FIR Reims pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 avec Trandac <i>et al.</i>	101
5.6	Les résultats de sectorisation de la FIR Marseille pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 avec porfolio.	104
5.7	Les résultats de sectorisation de la FIR Marseille pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 sans porfolio.	105

Liste des figures

1.1	Extrait d'une carte répertoriant les routes aériennes de l'espace aérien Nord de la FIR d'Alger (FL \leq 195).	12
1.2	Norme de séparation horizontale est de 5 nm et de 1000 ft verticalement jusqu'au niveau FL 290.	14
1.3	Le temps de passage minimum à travers un secteur, l'avion doit rester un temps minimum donné.	16
1.4	La distance minimale pour la conception du secteur de l'espace aérien.	16
1.5	La contrainte de convexité pour la conception de l'espace aérien.	17
1.6	La contrainte de connectivité pour la conception de l'espace aérien. Par exemple la solution représentée dans la figure n'est pas acceptable.	17
1.7	Répartition du retard moyen (retard 2016 par rapport à 2017 en Europe). © Eurocontrol.	21
1.8	Évaluation de la capacité et portée de la planification.	23
2.1	Exemple de partitionnement de l'espace aérien à trois niveaux (FL 0-FL210, FL210-FL310, plus de FL310) et la structure hexagonale des cellules [168].	29
2.2	Résultats de partitionnement de l'espace aérien "USA" en 412 secteurs à l'aide d'un algorithme géométrique (pie-cut).	34
2.3	Représentation d'un graphe pondéré avec sa correspondante matrice des poids.	35
3.1	Portfolio N Stratégies \times N Coeurs.	55
3.2	Portfolio N Stratégies \times P Coeurs.	56
4.1	Exemple d'une contrainte de triangulation (à droite) d'un graphe donné (à gauche).	62
4.2	Exemple d'un extrait d'un plan de vol illustrant des sommets et des routes aériennes dans un espace aérien.	64

Liste des figures

4.3	Exemple d'application d'une sectorisation fragmentée (non acceptable) sur un réseau de trafic aérien.	68
4.4	Interprétation graphique des coefficients de l'OWA ω	79
4.5	Modèle PPC «OWA» pour une sectorisation équitable de l'espace aérien.	81
5.1	Le réseau d'espace aérien à basse altitude à travers la FIR d'Alger pendant 24 heures de la journée du 11 décembre 2002.	89
5.2	Le réseau d'espace aérien en haute et basse altitude à travers la FIR française pendant 24 heures de la journée du 07 juillet 2017.	90
5.3	Le réseau d'espace aérien à basse altitude passant par la FIR française le 07 juillet 2017.	91
5.4	Analyse d'accélération de l'outil BASS parallèle dans l'espace aérien algérien.	93
5.5	Analyse de performance des approches de sectorisation dans l'espace aérien algérien.	94
5.6	Qualité de l'équilibre des sectorisations résultantes sur l'espace aérien algérien.	95
5.7	Comparaison qualitative entre l'outil BASS parallèle et la méthode [150] sur l'espace aérien algérien.	96
5.8	Analyse d'accélération de l'outil BASS parallèle dans l'espace aérien de la France.	98
5.9	Analyse des performances des approches de sectorisation dans l'espace aérien français.	99
5.10	Réseau aérien de Reims pendant 24 heures, le 07 juillet 2017.	99
5.11	Réseau aérien de Marseille pendant 24 heures, le 07 juillet 2017.	102
5.12	Qualité de l'équilibre des sectorisations résultantes dans l'espace aérien français (07 juillet 2017).	103
5.13	Comparaison qualitative des approches de PPC sur l'espace aérien de la France.	107

Introduction générale

Le secteur de l'aviation est l'un des secteurs économiques dont la croissance est la plus rapide au monde, qui opère également dans un environnement concurrentiel où la sécurité des vols est un facteur primordial. Cette sécurité exige un travail d'équipe à tous les niveaux, particulièrement dans les espaces aériens congestionnés. Lorsque la congestion devient vraiment trop importante durant certaines périodes de la journée, la charge du contrôle induit augmente. Une telle situation critique entraîne une redistribution de la charge de travail des contrôleurs. À l'origine, cette répartition s'effectuait en divisant l'espace aérien d'une manière plus ou moins permanente selon des réseaux composés de routes aériennes, zones réservées, points d'attente, etc., afin de distinguer les limites entre les différents secteurs de contrôle. Il est donc possible d'envisager à partir d'un découpage « quelconque », de constater ses faiblesses tactiques et de l'améliorer pas à pas, empiriquement. Dans la plus part des cas, Il est difficile de tenir compte de l'équilibre de la charge de travail entre les secteurs et les contraintes techniques, en particulier de la forte demande pour les opérations aériennes dans l'espace aérien. Cependant, une démarche analytique autour de la question de ce que pourrait être un bon découpage s'impose si l'on désire parvenir rapidement à une solution convenable sans s'embourber dans des voies sans issues. Dans le cadre de la conception de l'espace aérien optimisé (un bon découpage) ou en d'autres termes une sectorisation plus équilibrée de la charge de travail entre les différents secteurs et absence de violation des contraintes améliore nettement les performances opérationnelles de la gestion de trafic qui sont brièvement décrits ci-dessous :

- Flexibilité pour répondre à la demande de trafic variable et aux changements temporaires des flux de trafic ;
- Continuité opérationnelle et procédurale au-delà des frontières sectorielles ;
- Promouvoir la flexibilité globale du système (combinaison/division des secteurs selon les besoins ;
- Utilisation optimale de l'espace aérien et charge équilibrée sur les secteurs, etc.

Problématiques liées au contrôle du trafic aérien

Le transport aérien constitue une partie inéluctable du développement, tout en étant un puissant moteur de la mobilité nationale et internationale, contribuant au produit intérieur brut (PIB), facilitant et générant une activité économique à grande échelle. Il a également un impact sur d'autres secteurs, tels que le commerce et le tourisme. Et effectivement l'Algérie occupe une position stratégique importante et distinguée, qui sert de carrefour du transit «hub» pour l'Europe, l'Afrique et l'Amérique latine vers l'Asie, d'une superficie d'environ 2 millions et 381741 kilomètres carrés. Le secteur de la navigation aérienne le détient et l'exploite, avec l'arrivée de nouvelles compagnies aériennes, le nombre d'aéronefs utilisés pour l'espace aérien algérien augmente de manière significative, de sorte que l'Algérie est devenue l'un des pays les plus intensifs en volume d'activités aériennes en Afrique du nord, atteignant à la fin de 2016 environ 254439 trafic aériens (aller-retour) par an [2].

La direction générale de l'aviation civile et de la météorologie (DACM) s'attend à ce que le volume des investissements dans le secteur de l'aviation augmente au cours des deux prochaines décennies, parallèlement à l'ouverture prévue de la nouvelle aérogare de l'aéroport international d'Alger au cours de l'année 2018, à cela s'ajoute la croissance de la demande d'investissement dans ce secteur, qui offre d'énormes possibilités d'investissement non encore exploitées. Assurer également la surveillance et la communication avec les autres centres de contrôle aérien, tels que la France, le Maroc, la Tunisie, l'Espagne, le Mali et la Mauritanie, pour diriger les avions en cas de grève dans les aéroports de ces pays et cela ce n'est qu'après les avoir autorisés, comme convenu dans les accords internationaux.

Avec la demande croissante de trafic aérien, l'engagement des pays de l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI) dans la voie de la modernisation de ses espaces aériens et l'amélioration des services fournis aux usagers de l'air, s'inscrit actuellement dans deux grands projets : le projet de recherche sur la gestion du trafic aérien dans le ciel unique européen (SESAR, Single European Sky ATM Research) de l'Eurocontrol et le projet des États-Unis, le système de transport aérien de nouvelle génération (NextGEN, Next Generation Air Transportation System) de la Fédéral Aviation Administration (FAA, Federal Aviation Administration).

Le développement des stratégies d'amélioration des performances de la navigation aérienne (PBN¹, Performance Based Navigation) vise à améliorer la sécurité des opérations en route, en région terminale et d'approche, améliorer l'efficacité opérationnelle en réduisant le nombre de miles parcourus en vol, de réduire les coûts des infrastructures, arriver à une utilisation accrue de l'espace aérien et d'atténuer l'impact sur l'environnement grâce à une diminution des émissions et la possibilité de réduire l'exposition au bruit [87, 153].

Le déploiement progressif des solutions avancées telles que le concept des opérations basées sur une trajectoire (trajectory-based, flight-/flow-centric operations) appelée aussi trajectoire quadridimensionnelle (4DT) conformément aux nouvelles visions. Son objectif est de mettre en place une planification pré-tactique (éviter des zones avec une mauvaise météorologie ou congestionnées pour un avion) et de mettre en place une planification tactique (générer des ensembles de trajectoires 4DT sans conflit), vise à améliorer la capacité et renforcer l'efficacité des opérations aériennes [64, 96, 137, 154].

Le développement et la mise en œuvre d'un nouveau concept envisagé qui modifierait de manière fondamentale la structure du trafic aérien, appelé l'espace aérien en route libre (FRA², Free Route Airspace) afin de favoriser la mise en œuvre de routes plus courtes et une utilisation plus efficace de l'espace aérien [131]. La Free Routing est considérée comme le concept qui fournira la plus grande économie de carburant dans l'espace aérien en route, une réduction des émissions en C_{O_2} ; une réduction du temps de vol et une amélioration de la planification.

D'autre part, la surveillance aérienne a connu dans de nombreux pays du monde, notamment en Europe et aux États-Unis d'Amérique, un grand développement face aux défis énormes posés dans le domaine de la navigation aérienne de véhicule aérien non habité (UAV, Unmanned Aerial Vehicle), ce qui soulève des questions sur les lois régissant le mouvement de ces aéronefs en cas de risque de collision avec des avions réguliers, en particulier ceux survolant les aéroports et d'autres zones sensibles, où l'OACI tente de définir un cadre général pour l'avenir afin d'intégrer les véhicules aériens sans pilote d'une manière harmonieuse grâce à des "outils d'action" spéciaux,

1. Navigation fondée sur les performances (Performance Based Navigation, PBN) : fournit une base pour la conception et la mise en œuvre de trajectoires de vol automatisées qui facilitera la conception de l'espace aérien, la fluidité du trafic et un meilleur accès aux pistes.

2. Espace aérien en route libre (FRA, Free Route Airspace) désigne un espace aérien spécifié dans lequel les utilisateurs peuvent librement planifier une route entre un point d'entrée défini et un point de sortie défini, sans référentiel au réseau de routes ATS.

compatibilité des trafics civils et militaires [5, 45, 71].

L'amélioration de la mise en œuvre du concept d'utilisation flexible de l'espace aérien (FUA) sur la base de la coordination civile-militaire de manière à satisfaire les besoins de ces utilisateurs, ainsi que la planification de vol dynamique réduit la consommation de carburant et les coûts d'exploitation, tout en réduisant l'impact sur les émissions de carbone [83, 153, 159]. En outre, par exemple le plan de renforcement des capacités aéronautiques FAA [3] indique que les conditions météorologiques sont la principale cause (65% à 70%) des retards supérieurs à 15 *min*, alors les dangers atmosphériques tels que les éruptions volcaniques [51, 104, 140], ou les perturbations atmosphériques graves telles que les tempêtes de convection, la glace sévère, les orages, les tempêtes de poussière, les cyclones tropicaux ou les tempêtes de sable exercent une influence perturbatrice sur l'aviation, à la fois dans la zone terminale et en route, provoquant des retards de vol et des annulations [146]. Ces différents facteurs météorologiques interagissant sur la gestion du trafic aérien à raison de l'augmentation de la charge de travail [82] et qui provoque une situation stressante importante des contrôleurs (la charge mentale), par conséquent affectent le niveau de la sécurité aérienne de tous les aéronefs qui évoluent dans l'espace aérien. Le système de gestion du trafic aérien actuel est efficace et réactif. Néanmoins, certaines zones de l'espace aérien sont déjà régulièrement saturées, mettant ainsi en évidence des limites structurelles liées au modèle. Comme s'est mentionné plus haut, le trafic aérien est quant à lui dans une phase de croissance qui devrait, selon les prévisions réalisées par Eurocontrol [3, 131] dans ses rapports annuels se poursuivre pour les décennies à venir.

Exemple 0.1. *Pour l'ensemble de l'Europe, le scénario régulation et croissance (le plus probable) compteraient 16,2 millions de vols en 2040, 53% de plus qu'en 2017. Cela représente une croissance annuelle moyenne de 1,9% par an sur la période 2017-2040.*

Cette augmentation de la demande risque de saturer de manière rédhibitoire le système actuel. Pour faire face à la future demande en matière de trafic aérien, nous nous placerons dans le cadre d'un filtre long terme avec un horizon très large (macroscopique) destiné à fluidifier l'écoulement du trafic et faciliter la tâche des contrôleurs dans leur exercice c'est-à-dire réduire l'ensemble de la congestion ou bien minimiser les surcharges sectorielles. Nous nous sommes intéressés à développer un modèle exact

basé sur la programmation par contraintes (PPC) pour résoudre le problème de la sectorisation de l'espace aérien en tenant compte des contraintes géométriques de l'espace aérien, tout en assurant l'optimalité de la solution trouvée avec des propriétés formelles. L'optimisation est effectuée en équilibrant la charge de travail des contrôleurs entre les secteurs pour donner plus de flexibilité et efficacité à la gestion de l'espace aérien en Algérie et en France dans un contexte stratégique.

Contributions et objectifs de l'étude

Le travail présenté vise à améliorer la flexibilité et la gestion de l'espace aérien en particulier en Algérie et en France dans un contexte stratégique. Nous nous concentrons sur le développement d'un modèle d'optimisation de la sectorisation pour permettre d'accroître la capacité et l'efficacité de l'espace aérien. Nous développons une méthode efficace basée sur une formulation en PPC et de partitionnement de graphe pour résoudre le problème de la sectorisation tout en respectant les contraintes géométriques de l'espace aérien. Nous proposons une méthode exacte basée sur la modélisation mathématique et des techniques d'optimisation multicritère permettant de générer des charges de travail équilibrées le long des secteurs de contrôle. Afin de garantir des agrégations équitables, une fonction d'agrégation équitable doit se conformer aux trois propriétés d'équité (symétrie, monotonie et principe de transfert). La méthode la plus connue consiste à utiliser la fonction de Schur convexe, qui préserve l'ordre dans les trois propriétés d'équité. Nous avons proposé la méthode de la somme pondérée (ordonnée), dite d'utilité additive, est une approche plus évoluée qui consiste à pondérer les critères (ordonnés dans le cas de la méthode OWA) en leur associant des coefficients. La méthode de la somme pondérée ordinaire garantit que la solution optimale trouvée soit Pareto optimale, à condition que les poids soient positifs [73]. La méthode OWA permet de découvrir des solutions non supportées en cas de non-convexité du front de Pareto.

Les méthodes exactes sont réputées pour l'optimalité des solutions qu'elles fournissent. Cependant, nous avons découvert, que notre méthode donne de bons résultats, tantôt étant systématiquement coûteuse en matière de temps de calcul pour les grandes instances (i.e. FIR Paris, Marseille). Afin de résoudre ce problème nous avons proposé

une approche de type portfolio. Notre formulation est implémentée et testée avec des données réelles sur l'espace aérien algérien au niveau du vol (FL) ≤ 280 sur trois périodes (une journée complète d'un trafic dense, heure de pointe (10h00 à 11h00), heure creuse (03h00 à 04h00) correspondant au 11 décembre 2002) et sur l'espace aérien français à basse altitude (≤ 19500 pieds) sur les FIRs (FIR de Paris, FIR de Marseille, FIR de Bordeaux, FIR de Brest et FIR de Reims).

Nos contributions dans le cadre de cette thèse sont résumées dans les points suivants :

Cette thèse présente plusieurs innovations dont la plus importante est la proposition d'un nouveau modèle exacte basé sur la programmation par contraintes pour assurer l'équité entre les secteurs de contrôle en matière de charge de travail. En particulier, nous avons mis en œuvre différentes stratégies de recherche bien connues disponibles dans la bibliothèque du solveur Choco, telles que (en anglais, *Activity based search strategy (ABS)*, *Restarts strategy : After each new solution*, *No-goods learning strategy*, *Branching on the value with the best objective bound*, *Large Neighborhood Search (LNS) strategy*, *Randomly selects a variable and assigns it to a value randomly*, *Int-VarSearch*, *WDegSearch*) et une heuristique de Kernighan-Li sont utilisées et mise en œuvre en Java sous le logiciel Choco pour le partitionnement de l'espace aérien.

Approche séquentielle : dans le modèle mathématique [150] les auteurs ont proposé d'utiliser une contrainte d'équilibre imposant à chaque secteur de disposer d'une charge de travail comprise entre deux seuils (W_{min} , W_{max}) pour l'étude du problème de sectorisation de l'espace aérien. Cette solution n'a aucune garantie pour trouver les solutions optimales. Un nouveau modèle visant à régler ce problème où nous avons mis en œuvre un nouveau modèle d'équité appelé EQquilibre AirSpace Problem (EQASP) intègre l'approche [150] basé sur l'optimisation multiagents OWA pour garantir un équilibre sectoriel en matière de charges de travail entre les secteurs de contrôle.

Approche parallèle : les grandes instances ont considérablement augmenté la complexité de ce problème. Afin de résoudre efficacement ce problème, nous avons introduit une approche parallèle type portfolio pour concevoir des configurations de secteurs d'espaces aériens opérationnels. En matière de performances, notre technique

a fait des gains significatifs dans le temps de résolution par rapport à l'approche séquentielle. Concernant, les mesures qualitatives, elle a également amélioré l'équilibre sectoriel par rapport à l'approche compétitive de [150]. Enfin, notre méthode proposée a pu trouver à tout moment les solutions optimales pour toutes les grandes instances, une propriété non assurée par le modèle concurrentielle.

Organisation du manuscrit

Le présent manuscrit est structurée de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous exposons de manière détaillée la problématique de la sectorisation de l'espace aérien, la structure de base et contrôle de l'espace aérien, la problématique de la saturation de l'espace aérien et l'intérêt d'aller vers des re-sectorisations équilibrées. Dans le deuxième chapitre. Nous présentons les travaux antérieurs et les méthodes existantes pour traiter ce sujet, avec une discussion sur les avantages et les inconvénients de ces méthodes. À la fin de ce chapitre, nous discutons de l'apport des méthodes d'optimisation par métaheuristiques et les méthodes exactes pour trouver les solutions optimales de la sectorisation. Le troisième chapitre se compose de deux sections. La première section porte sur les outils de modélisation et de résolution, par la PPC, tandis que la deuxième section expose les principales notions du calcul parallèle et l'architecture de type portfolio à mémoire partagée qui a été introduite dans notre étude.

Le quatrième chapitre est dédié à nos contributions et se décompose comme suit : sectorisation équitable de l'espace aérien basée sur la PPC et OWA. À travers ce chapitre, nous donnons la formulation du modèle d'équité proposé en se basant sur l'optimisation multiagents en utilisant l'opérateur d'agrégation OWA pour résoudre le problème de la sectorisation. Pour accélérer les calculs, nous avons présenté l'architecture parallèle type portfolio pour résoudre le problème d'optimisation sous contraintes plus particulièrement les grandes instances. Les formulations mathématiques de contraintes géométriques de l'espace aérien (temps de passage minimum, distance minimale, connectivité, convexité et la contrainte d'équilibre) associées au modèle que nous proposons sont détaillées. Le chapitre 5 présente le volet expérimental.

Notre approche a été appliquée aux données réelles de l'espace aérien algérien sur

trois périodes différentes (heurs de pointe, heures creuse et 24 heures) sur la même journée et la région d'information de vol FIRs (ie, : Paris, Marseille, Reims, Bordeaux, Brest) pour laquelle les résultats ont été comparés aux solutions opérationnelles de [150] et à notre approche séquentielle. Enfin, nous concluons l'ensemble de nos travaux réalisés et nous adressons quelques perspectives pour rendre notre approche encore plus performante et réaliste.

Chapitre 1

Principes généraux d'organisation et de gestion de l'espace aérien

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu général du contrôle et de la gestion des flux du trafic aérien. Ensuite, nous exposons de façon assez détaillée le problème de la conception des secteurs aériens, la problématique de saturation (retards). Enfin, l'importance d'aller vers un équilibre sectoriel en matière de charge de travail pour augmenter la sécurité, la régularité et l'efficacité du transport aérien.

1.1 Structure de base de l'espace aérien

En fait, l'espace aérien est un système complexe divisé suivant une série de raisons, principalement liées au contrôle du trafic aérien, chaque espace aérien souverain, qui lui est délégué par l'OACI, est délimité par des coordonnées géographiques en latitudes et en longitudes de façon à englober les trajectoires des aéronefs auxquelles on désire assurer le contrôle et la gestion des flux de trafic aérien, suivant la structure du trafic aérien qui est caractérisé par l'occupation des niveaux de vol (FL³), c'est-à-dire la densité du trafic mesurée dans un niveau donné de l'espace. Il est découpé en deux niveaux verticaux, généralement au-dessus de FL 195 (= 19500 pieds) appelé espace aérien supérieur (UIR, *Upper Information Region*) et au-dessous qui est l'espace aérien inférieur (FIR, *Flight Information Region*). Au vu du volume de trafic important, il n'est pas envisageable pour un opérateur humain de contrôler l'ensemble des avions alors un découpage horizontal en sous espaces est effectué sous formes de volumes finis appelés secteurs de contrôle.

3. Flight Level (FL) : ou niveau de vol est en aéronautique une altitude exprimée en centaines de pieds au-dessus de la surface isobare 1013,25 hPa.

Définition 1.1 (Secteur élémentaire). *Composante principale de la structure de l'espace aérien, dont un ou plusieurs peuvent être combinés pour former un secteur. Dans certains cas, le secteur élémentaire peut être identique au secteur opérationnel, dans d'autres cas, le secteur élémentaire n'est jamais ouvert sur le plan opérationnel sans être combiné avec un ou plusieurs autres secteurs élémentaires.*

Définition 1.2 (Secteur). *Composant opérationnel principal de la structure de l'espace aérien pouvant être considéré comme une référence de capacité élémentaire du système ATM. Un secteur est composé d'un ou plusieurs secteurs élémentaires.*

À chaque secteur, il est associé une ou plusieurs positions de contrôle qui prend en charge un certain nombre d'avions, et est responsable sur le bon écoulement du trafic dans cette zone. Une coordination entre ces différents secteurs est nécessaire. Par conséquent, tout ceci nous conduira à une reconfiguration de l'espace vertical et avoir deux niveaux de sectorisation, une sectorisation à basse altitude et une sectorisation à haute altitude. Nous nous intéressons principalement dans cette étude à la sectorisation basse altitude à travers l'analyse du volume de trafic mesuré, dont le but d'équilibrer la charge de travail des contrôleurs le long des secteurs dans l'espace aérien. L'application s'est portée sur les études de la FIR d'Alger et aussi sur l'espace aérien Français (FIR Bordeaux, FIR de Brest, FIR de Paris, FIR de Marseille et FIR de Reims).

1.2 Service de la circulation aérienne

Les espaces sont divisés en sept (07) classes appelés «classes d'espaces notés de A à G, les services rendus et les conditions à respecter vont du plus important (classe A) au moins important (classe G). Chaque pays désigne ses propres classes pour la gestion du flux aérien, à titre d'exemple l'Algérie adopte les classes A, D, G et F [2]. Pour plus de détail, le lecteur pourra consulter la publication d'information aéronautique (AIP, *Aeronautical Information Publication*) Algérie partie en route (ENR 1 – 4 – 1).

En matière de services fournis (ATS, *Air Traffic Service*) aux aéronefs afin d'aider à l'exécution sûre, rapide et efficace des vols, l'espace aérien peut être fondamentalement divisé en espace aérien contrôlé et non contrôlé. Selon la partie de l'espace aérien où sont fournis, les ATS dans l'espace aérien contrôlé sont divisés en trois groupes :

1.2. Service de la circulation aérienne

1.2.1 Service de contrôle d'aérodrome

Service du contrôle de la circulation aérienne pour la circulation d'aérodrome (TWR, *Tower*). Deux tâches sont exécutées de la tour de contrôle : le contrôleur au sol émet des directives par radio aux avions et aux véhicules utilitaires circulant sur les pistes d'atterrissage ou à proximité, et le contrôleur d'aérodrome surveille (à vue ou par radar) tous les appareils qui se posent, décollent ou volent dans la zone de contrôle de l'aéroport.

1.2.2 Service de contrôle d'approche

Service du contrôle de la circulation aérienne pour les aéronefs en vol contrôlé à l'arrivée ou au départ (APP, *Approach*) (entre 10 et 30 miles nautiques (nm) des pistes). Pour les avions au départ, le contrôle d'approche vise à amener l'avion de son point de sortie de la zone de contrôle d'aérodrome à sa route en phase de croisière. Pour les arrivées, le contrôle d'approche a pour fonction de disposer les avions les uns derrière les autres en direction des pistes afin de faciliter le travail du contrôle d'aérodrome. Par exemple le contrôle d'approche au niveau de l'espace aérien algérien est actuellement fourni à Alger, Annaba, à Constantine, à Oran, et Hassi Messaoud.

1.2.3 Service de contrôle régional

Service du contrôle de la circulation aérienne rendu pour les aéronefs contrôlés volant en règle de vol aux instruments (IFR, *Instruments Flight Rules*) à l'intérieur des régions de contrôle spécifiées (CCR ou ACC pour *Area Control Center*) lorsque les conditions météorologiques sont dégradées et qualifient des conditions météorologiques aux instruments (IMC, *Instruments Meteorological Conditions*) et aux règles de vol à vue (VFR, *Visual Flight Rules*), si les conditions météorologiques sont qualifiées de conditions météorologiques à vue (VMC, *Visual Meteorological Conditions*) et sont définies en fonction de la visibilité horizontale et de la distance par rapport aux nuages. Alors le contrôleur régional guide les appareils IFR dans les voies aériennes qui relient la plupart des aéroports d'espace aérien nationaux (NAS) du pays ou débouchent sur les routes suivies par les vols internationaux. Ces routes aériennes déterminées par les aides à la radionavigation, appelée aussi balises (*Waypoints*) situés au sol constituent le réseau des routes aériennes du NAS.

La figure 1.1 est un extrait d'une carte répertoriant les routes aériennes de l'espace aérien Nord de la FIR d'Alger (FL \leq 195).

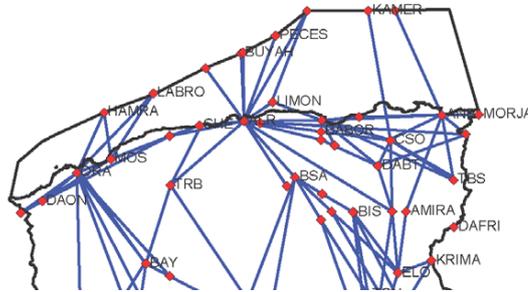


Figure 1.1 Extrait d'une carte répertoriant les routes aériennes de l'espace aérien Nord de la FIR d'Alger (FL \leq 195).

1.3 Gestion de l'espace aérien (ASM) et conception

À l'étranger, par exemple aux États-Unis, la FAA est chargée de la gestion de l'espace aérien et de la conception des routes, tandis que dans le système ATM européen fusionné, la gestion de l'espace aérien était traditionnellement la prérogative de chaque État. En Algérie, l'ENNA⁴ est chargée de l'exploitation et de la sécurité du transport aérien. Dans le système actuel, la conception de l'espace aérien et les procédures associées ne sont plus réalisées ou mises en œuvre isolément en Europe ou d'autres pays. L'inefficacité de la conception et de l'utilisation du réseau de routes aériennes est considérée comme un facteur contribuant à l'inefficacité des vols.

Le développement d'une conception des réseaux de routes ou une configuration de l'espace aérien en fonction de l'itinéraire préféré de l'utilisateur, dans un environnement de route libre avec suffisamment de flexibilité pour répondre aux changements de la demande de trafic, aux événements imprévus, notamment les conditions météorologiques, et à toute modernisation de l'espace aérien de la meilleure façon possible, tout en maintenant des objectifs de sécurité est donc l'une des tâches confiées au gestionnaire de réseau. Un autre défi consiste à intégrer les objectifs et les exigences militaires, qui doivent être parfaitement coordonnés au sein du système ATM respectif. Pour répondre à leurs besoins en matière de sécurité pour chaque espace aérien et de

4. ENNA : L'établissement national de la navigation aérienne en Algérie chargée de l'exploitation et de la sécurité du transport aérien algérien.

1.3. Gestion de l'espace aérien (ASM) et conception

conception tout en garantissant la sécurité des autres utilisateurs de l'espace aérien, il est parfois nécessaire de restreindre ou de séparer l'espace aérien à des fins exclusives, ce qui peut entrer en conflit avec les objectifs civils afin d'améliorer l'efficacité des vols, les vols devant ensuite être contournés. Les besoins croissants des deux groupes de parties prenantes, en matière de volume et de temps, une coopération et une coordination étroites entre les secteurs civils et militaires, dans toutes les activités liées à l'ATM, constituent une exigence essentielle. À titre illustratif, en ce qui concerne l'organisation de la coopération civilo-militaire, les États-Unis et l'Europe appliquent deux modèles similaires :

- **aux États-Unis**, le conseil de la politique du Département de la Défense (DoD, *Department Of Defense*) pour l'aviation fédérale (PBFA, *Policy Board on Federal Aviation*) est la voix unique des services militaires pour communiquer. La position du DoD sur la politique de l'espace aérien et la gestion du trafic aérien en tant que fournisseur et utilisateur de services de navigation aérienne au niveau mondial, au niveau opérationnel, le siège de la FAA est l'autorité d'approbation finale pour tous les espaces aériens à usage spécial (SUA, *Special use airspace*) permanents et temporaires, et les opérations sont organisées selon un ensemble commun de règles.
- **en Europe**, l'Agence Européenne de Défense (AED) représente les intérêts de l'aviation militaire dans le développement du ciel unique européen, au niveau opérationnel, grâce à la mise en œuvre du concept d'utilisation flexible de l'espace aérien (FUA, *Flexible Use of Airspace*).

Le gestionnaire de réseau coordonne les besoins civils et militaires grâce à un processus dynamique du plan de développement majeur (MDP, *Major Development Plan*) qui aboutit à la publication quotidienne du plan d'utilisation de l'espace aérien européen (AUP, *Airspace User Plan*) le jour J-1 et à la mise à jour des plans d'utilisation de l'espace aérien (UUP, *Updated airspace Use Plan*) le jour de l'opération. L'AUP et l'UUP activent les itinéraires conditionnels et allouent des zones séparées temporaires et des zones transfrontalières pour des périodes spécifiques.

1.4 Charge de travail et contraintes liées à la sectorisation de l'espace aérien

1.4.1 Charges de travail

À chaque secteur de contrôle est associée une position de contrôle. À l'intérieur, le service du contrôle du trafic aérien (ATC, *Air Traffic Control*) prend en charge tous les types du trafic aérien tels que les survols sans atterrissage, survols internationaux avec atterrissage et survols nationaux avec atterrissage, et qui constitue la charge de travail du contrôleur dans un secteur. Plus le nombre d'avions dans un secteur est important, plus la charge de contrôle induite augmente, ce qui provoque un fort stress (principal critère qualitatif) aux contrôleurs qui risque de ne plus pouvoir assurer la gestion du trafic aérien dans des conditions optimales de sécurité. Ce critère qualitatif est lié directement aux critères quantitatifs [47] suivants :

- **Charge de conflit** : deux avions sont dits "en conflit" si leurs trajectoires futures les amènent à se trouver simultanément à des positions ne respectant pas une norme de séparation fixée. Et dans ce cas, il ordonne à l'un des pilotes de modifier sa trajectoire, encore leurs niveaux de vol, afin d'assurer le respect de la norme de séparation horizontale. Par exemple au-dessus du niveau de vol FL 290, si l'espace considéré est : un espace RVSM (*Reduced Vertical Separation Minima*), la séparation verticale est de 1000 ft jusqu'au FL 410, un espace non RVSM, la séparation verticale est de 2000 ft jusqu'au FL 410. Au aucun autre avion ne doit accéder à zone de protection.

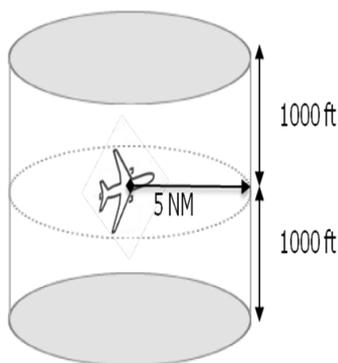


Figure 1.2 Norme de séparation horizontale est de 5 nm et de 1000 ft verticalement jusqu'au niveau FL 290.

1.4. Charge de travail et contraintes liées à la sectorisation de l'espace aérien

- **Charge de coordination** : quand un aéronef doit quitter un espace aérien pour entrer dans un autre, où les services de la circulation aérienne sont assurés par un autre contrôleur, le contrôleur "donneur" (celui qui a le contrôle de l'espace aérien dans lequel l'aéronef se trouve avant le transfert) demande à l'organisme "accepteur" (celui qui a le contrôle de l'espace aérien dans lequel l'avion souhaite pénétrer) s'il peut accepter l'aéronef, et si oui dans quelles conditions. Le contrôleur donneur délivre alors au contrôleur accepteur une clairance pour cet aéronef afin qu'il pénètre dans son espace. Cette clairance comporte une route et un niveau de vol ou une altitude. Elle est retransmise à l'aéronef, qui suivra cette route et atteindra ce niveau. Pendant ce temps il va quitter la fréquence de l'organisme donneur, et contacter la fréquence de l'organisme accepteur, c'est une opération au cours de laquelle des incompréhensions ou des erreurs peuvent se produire causant des pertes accidentelles de séparation.

Dans un réseau de transport sectorisé, la charge de coordination est proportionnelle aux flux coupés par les frontières des secteurs.

- **Charge de surveillance ou monitoring** : dans un secteur, en dehors de toute action prise sur la trajectoire (conflit ou transfert), le contrôleur doit vérifier que les plans de vol sont suivis correctement sur l'image radar et déterminer le risque potentiel de collision (conflit) avec l'avion environnant.

La surveillance est la tâche de base des contrôleurs, mais elle est essentielle. Une source majeure de stress pour eux. Cette charge de travail est directement liée au nombre d'avions dans le secteur. Il existe d'autres charges de contrôle facilement quantifiables [152], mais leur impact sur l'ensemble de la charge de contrôle d'un secteur est négligeable par rapport aux trois précédentes.

1.4.2 Contraintes géométriques

De plus, les secteurs sont soumis à certaines contraintes spécifiques au contrôle du trafic aérien, dont des contraintes géométriques, doivent être prises en compte [47, 151] :

Contrainte de temps de passage minimum : cette contrainte exprime qu'un avion doit passer dans chaque secteur, qu'il traverse une durée de temps minimum donné, afin que les contrôleurs aient suffisamment de temps (au moins le temps de

coordination nécessaire à la transmission de l'avion depuis le secteur précédent vers le secteur suivant) pour gérer correctement l'ensemble des avions dans leur secteur.

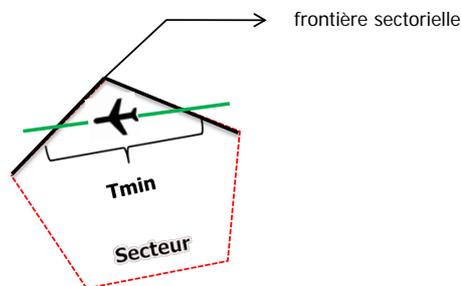


Figure 1.3 Le temps de passage minimum à travers un secteur, l'avion doit rester un temps minimum donné.

Contrainte de distance minimum (au sens des routes) : cette contrainte a pour but d'assurer que la distance entre un point de croisement du réseau de transport aérien et la frontière du secteur doit être supérieure ou égale à une distance donnée. Notons qu'elle est seulement "au sens des routes" pour que les contrôleurs aient suffisamment de temps (à compter du moment où l'avion entre dans leur secteur) pour résoudre les conflits potentiels qui peuvent se produire en ce point.

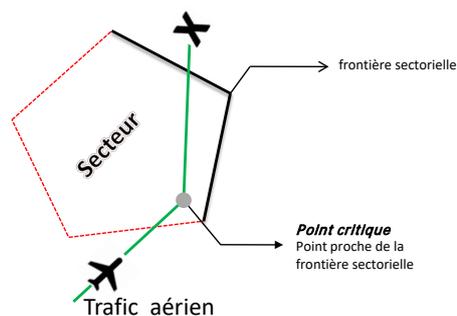


Figure 1.4 La distance minimale pour la conception du secteur de l'espace aérien.

Contrainte de convexité (au sens des routes) : La convexité des secteurs au sens des routes permet d'assurer que, pendant un vol reliant un aéroport de départ et un aéroport de destination, l'avion passe une fois au maximum par secteur. Autrement dit, on veut éviter le cas illustré sur la figure 1.5 où l'avion est sorti du secteur A, puis y entre à nouveau.

1.5. Saturation de l'espace aérien vers une resectorisation équilibrée

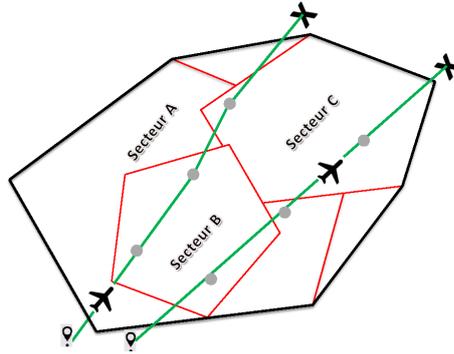


Figure 1.5 La contrainte de convexité pour la conception de l'espace aérien.

Contrainte de connexité de secteur : Elle permet d'éviter la fragmentation des secteurs, que les contrôleurs ne peuvent pas gérer correctement. (Voir 1.6).

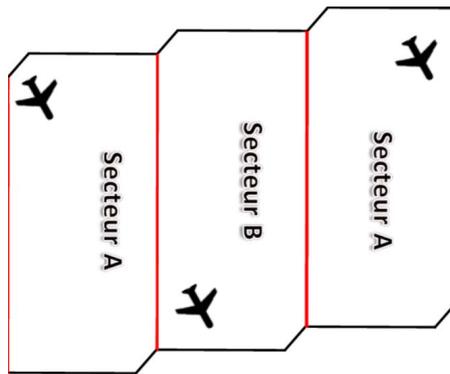


Figure 1.6 La contrainte de connectivité pour la conception de l'espace aérien. Par exemple la solution représentée dans la figure n'est pas acceptable.

1.5 Saturation de l'espace aérien vers une resectorisation équilibrée

1.5.1 La question de la saturation de l'espace aérien

Les capacités actuelles des opérations de trafic aérien ou bien les méthodes de gestion du trafic aérien ont très bien atteint leur objectif jusqu'ici, mais ont besoin d'être modifiées pour satisfaire les demandes des différents types de trafic aérien du futur en Europe, aux États-Unis et même en l'Algérie, y compris la re-sectorisation de l'espace aérien, liées principalement au développement économique global, ceci est principale-

ment dû à la croissance du volume du trafic aérien de manière continue chaque année, nécessitant donc d'améliorer la capacité et l'efficacité régulières de l'espace aérien en prenant en compte la sécurité des vols et l'environnement.

Il existe différentes notions de capacité qui peuvent être déterminées et mesurées de différentes manières et à différents niveaux, parmi lesquels :

Définition 1.1 (Capacité du secteur). *Nombre maximal de vols pouvant entrer dans un secteur par heure, en moyenne sur une période viable (par exemple 3 heures), afin de garantir un flux de trafic sûr, ordonné et efficace.*

Certains ANSP (*Air navigation service providers*) ou prestataire de services de la navigation aérienne (PSNA) gèrent les capacités du secteur de manière tactique sur une période plus courte (par exemple, 15 minutes). Cependant, aux fins de l'évaluation globale, le chiffre horaire est utilisé en standard.

Définition 1.2 (Capacité déclarée du secteur ou valeur de surveillance). *Valeur que l'ANSP déclare au centre d'opérations de gestion de réseau (NMOC, Network Management Operations Center) en tant que nombre maximal de vols par heure pouvant entrer dans un secteur avant que l'application d'un règlement ATFM ne devienne nécessaire.*

Plusieurs valeurs peuvent exister en fonction de l'environnement ATC du moment (espace aérien, équipement, structure de trafic, effectifs, météo, etc.). Le poste de gestion de vol (FMP, *Flight Management Position*) définit ces informations et informe la NMOC afin qu'elle puisse fournir le service ATFM. La valeur peut changer en fonction de la situation à l'ACC.

Définition 1.3 (Capacité cible). *L'amélioration du délai moyen de gestion du flux de trafic aérien (ATFM) en route.*

Par exemple atteindre un retard maximum de 0,5 minute par vol en 2014 par rapport à l'année précédente, un gain de 10% de l'efficacité économique.

Définition 1.4 (Capacité effective). *Définie comme le volume de trafic que le système ATM pourrait gérer avec un retard ATFM moyen en route d'une minute par vol.*

Cet indicateur de capacité est dérivé d'une relation linéaire entre la variation de retard et la variation de trafic. Il sert à comparer l'évolution de la capacité effective et de la demande de trafic aérien sur périodes.

1.5. Saturation de l'espace aérien vers une resectorisation équilibrée

La capacité d'un secteur est liée à la complexité du trafic aérien, appelé aussi densité dynamique (DD, *Dynamic Density*). Premièrement, cette complexité peut être mesurée de différentes manières, selon l'échelle de temps et les caractères géographiques concernés, et selon l'application envisagée [1, 61, 79].

En particulier, il convient de souligner, que l'évaluation de la charge de travail des contrôleurs aériens est une tâche difficile car elle est en fonction de la mesure de l'activité cognitive [32] des contrôleurs. Cette activité est une composante majeure du système d'aide ERASMUS (*En-Route Air traffic Soft Management Ultimate System*) du projet SESAR, un système d'aide visant à réduire la charge mentale en mettant l'activité cognitive des contrôleurs au cœur de l'équation [124].

Deuxièmement, la complexité du trafic est envisagée en relation avec la charge de travail en temps réel du contrôleur, des indicateurs plus fins, parmi lesquels :

- complexité du trafic (vols en croisière ou vols évolutifs en montée ou en descente) ;
- taille du secteur, complexité du réseau de routes et du nombre de croisements ;
- nombre des vols militaires (l'activité des zones militaires ou non),... etc.

Cette liste n'est pas exhaustive car les facteurs sont multiples [97, 99].

En effet, si le nombre d'avions dans un secteur de l'espace devient trop important, les contrôleurs aériens ne sont plus capables de gérer l'écoulement du trafic dans des conditions optimales de sécurité. Un secteur dans telle situation est dit saturé.

Il traduit ainsi un déséquilibre de la charge de travail des contrôleurs (*surcharge/Overload*) à travers les différents secteurs de contrôle. Une telle situation de saturation réduit considérablement l'efficacité, la sécurité et la sûreté des passagers ainsi les usagers (compagnies aériennes) qu'ils servent, d'où vient le rôle de l'ATFM afin d'adapter le flux de trafic à la capacité en prévenant les surcharges et en lissant l'écoulement du trafic.

1.5.2 Situation actuelle en matière de retards

Les retards ont de profondes répercussions sur la rentabilité et la sécurité du système et contribuent à l'impact négatif du transport aérien sur l'environnement.

Exemple 1.1. *En termes monétaires, par exemple les retards ont coûté plus de 1,3 milliard d'euros aux pays européens compagnies aériennes en 2007 [39].*

Exemple 1.2. *À la fois au sol et en vol les retards impliquent une utilisation de carburant ayant un impact direct sur l'environnement par le biais des émissions de CO et de N_{O_x} . Pour illustrer, 1 min de retard au sol implique une consommation de carburant comprise entre 1 kg et 4 kg, un ordre de grandeur supérieur dans le cas d'un retard en vol [31].*

1.5.3 Causes principales contribuant au retard

Les détails de la cause des retards sont analysés à la fois dans les documents d'évaluation des performances (*Performance Review*) et de gestion du réseau (NM)⁵, parmi lesquelles on peut citer : les retards réactionnaires, retards dus aux opérations de la compagnie aérienne, retards ATFM en route, les retards dus au non-ATFM (les problèmes de capacité (capacité de l'aéroport, personnels contrôleurs insuffisants et météo en route de l'ATC).

Dans le reste de cette section, on s'intéresse principalement que pour des études du retard ATFM-en route. Elle expose brièvement les travaux du retard du trafic en route.

1.5.4 Retards ATFM -En route

Les retards représentent un défaut moyen à ce secteur. Certaines zones de l'espace aérien peuvent être saturées pendant certaines périodes de temps. Ceci est dû à la forte demande de vol qui est contrôlés. Les services du contrôle aérien recourent à la régulation des vols en leurs attribuant des retards au décollage où on dit qu'il y a un retard ATFM. Plusieurs études ont largement contribué à l'analyse et la caractérisation des retards, les contributions englobent la quantification de l'impact des retards [41–43, 58], l'évaluation des causes de retard [125], prévision des retards [132] et la conception de stratégies pour leur atténuation [122, 170]. Le lecteur pourra trouver une revue de littérature approfondie des approches utilisées pour construire des modèles de prévision des retards de vol [147].

Exemple 1.3. *Dans une publication de la conférence européenne de l'aviation civile*

5. NM : Ceci est le résultat de la nomination d'Eurocontrol le 1^{er} septembre 2011 comme "Network Manager" européen, conformément à la législation Single European Sky II (SES). Le nom de la CFMU (*Central Flow Management Unit*) est progressivement remplacé dans les publications Eurocontrol par *Network Manager* (NM).

1.5. Saturation de l'espace aérien vers une resectorisation équilibrée

(ECAC, European Civil Aviation Conference). Les vols européens (CEAC) ont augmenté en moyenne de 4,3% par jour en 2017 par rapport à 2016 est un facteur sous-jacent commun aux principales causes signalées (voir (section 1.5.3) plus haut causes principales contribuant au retard), ce qui représente une hausse d'une augmentation de 1,1 min par vol par rapport à 2016.

Pour mieux illustrer les principales causes de ces retards. La figure 1.7 représente une histoire de retards accrus se traduisant par un retard moyen de départ toutes causes confondues de 12,4 minutes pour l'année 2017 qui présente une augmentation de 9,6% par rapport à 2016. L'analyse des raisons de retard montre que les retards réactionnaires ont contribué le plus au retard moyen, la gestion des flux aériens pour le trafic en-route a augmenté de 21,6% par rapport à l'année 2016. ce qui constitue un coût non négligeable. On s'aperçoit, aussi au regard global qu'elle a contribué de 7% des causes totales des retards.

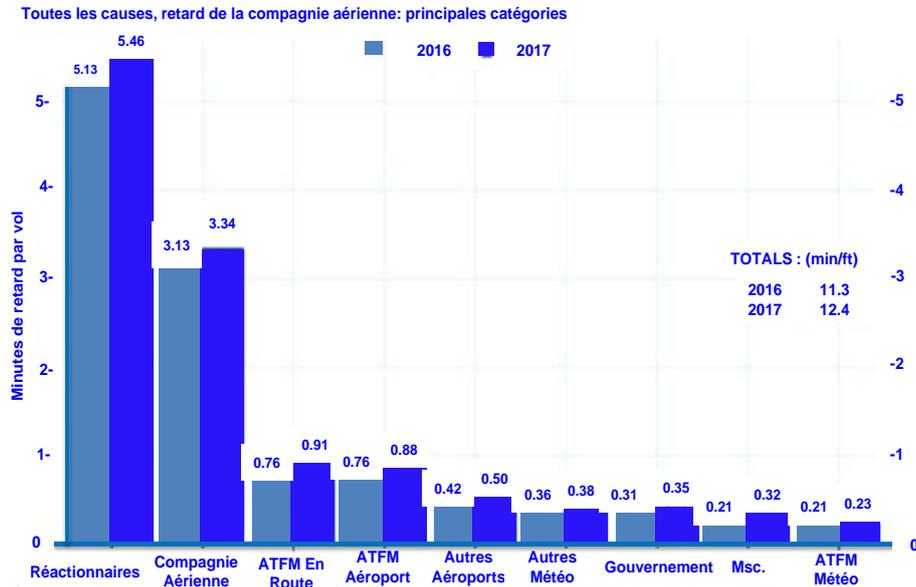


Figure 1.7 Répartition du retard moyen (retard 2016 par rapport à 2017 en Europe). © Eurocontrol.

Pour maintenir un niveau de sécurité élevé tout en accompagnant cette augmentation de trafic un redécoupage, c'est-à-dire le nombre et la forme des secteurs changent au cours de la journée suivant un schéma d'ouverture quotidienne. Ce processus s'ap-

pelle sectorisation dynamique de l'espace aérien (DAC, *Dynamic Airspace Sectorisation*) [98] (régulation pré tactique, voir section (section 1.5.3) au-dessous). La configuration des secteurs de contrôle pouvant évoluer dans la journée, la « capacité globale » de l'espace peut varier, même si la capacité d'un secteur de contrôle donné, elle, n'évolue pas. Chaque centre de contrôle (NMOC, *Network Manager Operations Center*) effectue une prévision (schémas d'ouvertures), des manœuvres de regroupement et de dégroupement qui devront avoir lieu le jour suivant, en fonction des prévisions de trafic et des ressources disponibles (nombre de contrôleurs notamment).

1.6 Application de régulations ATFM

Le mécanisme de contrôle du trafic ATFM est appelé pour éviter de surcharger les contrôles et pour garantir l'utilisation appropriée des ressources de contrôle disponibles. En d'autres termes, il vise à trouver dynamiquement le bon équilibre entre la demande des compagnies aériennes et capacités disponibles du contrôle de l'ATC. En Europe, c'est l'agence Eurocontrol qui est en charge de fournir les services ATFM à travers la CFMU ou NM. Cet organisme, en coordination avec les centres de contrôle et les compagnies aériennes, veille à ce que la charge de trafic pour chaque secteur de contrôle ou aéroport ne dépasse pas une limite qui mettrait la sécurité en jeu.

La gestion des flux et de la capacité se fait en trois étapes :

1.6.1 Planification stratégique

C'est l'organisation à long terme de la structure de l'espace aérien (routes, secteurs, zones militaires, etc.) et de l'affectation des flux de trafic sur le réseau de routes pour équilibrer la demande et les capacités.

1.6.2 Planification pré tactique

Au jour J-2 est défini un schéma de prérégulation du trafic pour le jour «J», en fonction du trafic prévu et d'un schéma prévisionnel d'ouverture des secteurs aériens par les centres de contrôle.

1.6. Application de réglementations ATFM

1.6.3 Planification tactique

Équilibre en temps réel de l'offre et de la demande, y compris la gestion de crise (coordination et résolution des conflits en cas d'événements imprévus de toutes sortes (grèves, météo, contraintes de sécurité, etc.).

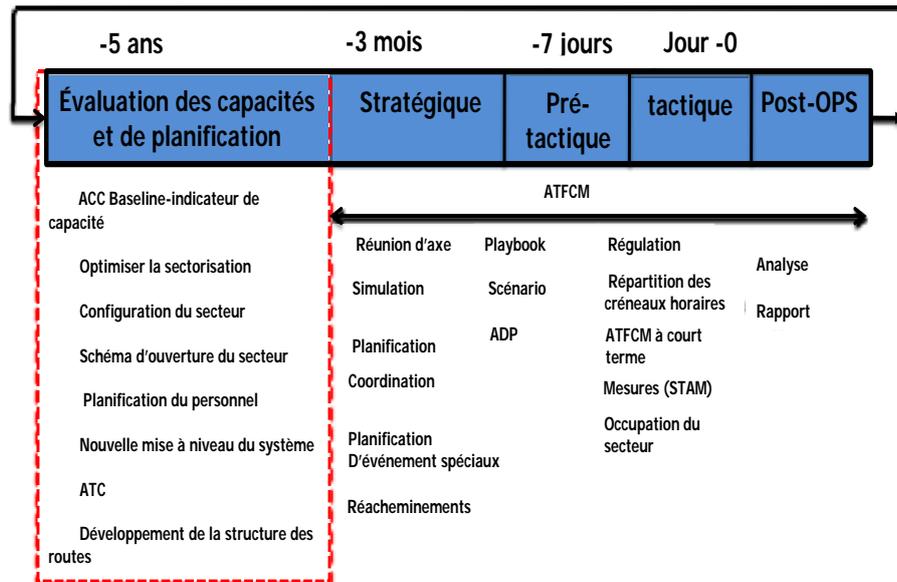


Figure 1.8 Évaluation de la capacité et portée de la planification.

Dans la phase prétactique, on considère un espace aérien avec des zones critiques telles que des zones avec une mauvaise météorologie ou des zones congestionnées, c'est-à-dire des zones parcourues par un trafic non organisé, avec un nombre suffisamment important d'aéronefs. Le but de la planification prétactique est de rechercher, pour un avion donné dans cet espace, une trajectoire optimale évitant ces obstacles, en tenant compte d'une métrique donnée (temps, distance, consommation de carburant, etc.). Dans ce premier cadre, les obstacles seront considérés comme statiques. Dans la phase tactique, on considère un ensemble d'avions en conflit, pour lesquels, on recherche de nouvelles trajectoires sans conflit. À l'inverse du cas prétactique, les obstacles à éviter (les autres avions) sont considérés dynamiques. De plus, ici la décision d'un avion influence la décision des autres.

Un certain nombre de méthodes ont été proposées pour automatiser la détection et la résolution des conflits de la circulation aérienne [101, 112]. Récemment, une pers-

pective évolutive des techniques de gestion des flux de trafic aérien examine de manière critique le domaine afin de déterminer quels efforts de recherche et de développement de l'ATFM sont les plus prometteurs pour des implémentations technologiques pratiques, offrant des avantages évidents en matière d'amélioration de la sécurité et de l'efficacité en période de croissance du trafic aérien [93].

Selon ce qui a été susmentionné, l'ensemble de ces difficultés ouvre la voie à des améliorations du système actuel, tant sur le plan de la modélisation (découpage de l'espace en secteurs de contrôle, organisation du réseau de routes, définition des capacités) que sur celui des outils d'aide aux contrôleurs (visualisation, algorithme de régulation, communication).

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a commencé par rappeler les éléments élémentaires de la structure d'un espace aérien, les notions de capacité qui peuvent être déterminées et mesurées de différentes manières et à différents niveaux, les facteurs peuvent contribuer à la surcharge des secteurs. La problématique de la répartition de la charge de travail des contrôleurs, les contraintes liées à la sectorisation et la complexité du trafic est envisagée en relation avec la charge de travail en temps réel ont été introduites. Ceci est fait en vue de préparer la suite de l'étude consacrée à la résolution de la problématique de la sectorisation de l'espace aérien.

Chapitre 2

Techniques d'optimisation de la sectorisation de l'espace aérien

Sommaire

1.1	Structure de base de l'espace aérien	9
1.2	Service de la circulation aérienne	10
1.2.1	Service de contrôle d'aérodrome	11
1.2.2	Service de contrôle d'approche	11
1.2.3	Service de contrôle régional	11
1.3	Gestion de l'espace aérien (ASM) et conception	12
1.4	Charge de travail et contraintes liées à la sectorisation de l'espace aérien	14
1.4.1	Charges de travail	14
1.4.2	Contraintes géométriques	15
1.5	Saturation de l'espace aérien vers une resectorisation équilibrée	17
1.5.1	La question de la saturation de l'espace aérien	17
1.5.2	Situation actuelle en matière de retards	19
1.5.3	Causes principales contribuant au retard	20
1.5.4	Retards ATFM -En route	20
1.6	Application de régulations ATFM	22
1.6.1	Planification stratégique	22
1.6.2	Planification préactique	22
1.6.3	Planification tactique	23
1.7	Conclusion	24

Ce chapitre présente, en premier lieu la sectorisation statique de l'espace aérien, ensuite nous citons les méthodes, les outils de modélisation et de résolution les

plus utilisés dans la littérature, dont nous allons nous servir à tirer les avantages et les inconvénients de chaque méthode d'optimisation multicritère en tenant compte des mesures de complexité de la densité du trafic, la compréhension et la modélisation de l'espace aérien ainsi que les charges de travail des contrôleurs. Une dernière section sera consacrée aux méthodes issues de la PPC pour la sectorisation aérienne.

2.1 Introduction

Le trafic aérien a connu une progression très importante pendant les dernières années et toutes les prévisions tendent à montrer que dans les prochaines années cette croissance ne devrait pas se ralentir. Les capacités actuelles d'exploitation du trafic ainsi que le schéma de sectorisation aérienne doivent répondre aux demandes futures. Face à cette évolution, un processus de développement du plan de sectorisation est utile pour permettre d'accroître la capacité de l'espace aérien.

2.2 Sectorisation de l'espace aérien

Le processus de création d'un plan de sectorisation ou d'une nouvelle sectorisation de l'espace aérien au cours de la phase stratégique est appelé conception sectorielle ou sectorisation statique de l'espace aérien. L'objectif de la conception du secteur est d'adapter l'espace aérien en fonction de l'évaluation de la complexité du trafic aérien enregistrée depuis plusieurs jours sur lequel on attribue une capacité. Dans chaque secteur exercent un ou deux contrôleurs qui sont soumis à une charge de travail qui dépend de trois éléments : la surveillance du trafic, la résolution des conflits et la coordination entre secteurs. Une sectorisation bien équilibrée est une sectorisation qui distribue la charge de travail de manière égale entre les unités de contrôle. Les contrôleurs sont considérés comme surchargés lorsque leurs charges de travail dépassent les capacités du secteur. Dans une telle situation un transfert ou changement d'avion entre deux secteurs a un impact néfaste sur la sécurité du vol. Cela exige d'accorder une plus grande attention à la réduction de la coordination entre contrôleurs. Parallèlement, une bonne gestion des coordinations entre les secteurs réduit au minimum la charge de travail et les conflits potentiels.

2.3 Techniques de résolutions des problèmes de la SEA

Dans la littérature il existe de nombreux travaux traitant le problème de la sectorisation de l'espace aérien (SEA), comme un problème d'optimisation multiobjectif sous des contraintes géométriques telles que la contrainte de convexité, la contrainte de distance minimum et la contrainte de temps minimum de passage dans le secteur, vise à équilibrer la charge de travail le long des secteurs et à minimiser la charge de travail totale des contrôleurs. Le modèle [48], peut-être le premier, avait été systématiquement développé. Puis, de nombreuses approches ont été développées. Les principaux travaux peuvent se résumer en trois catégories : méthode cellulaire, méthode des algorithmiques géométrique et méthodes de graphe basées sur le partitionnement des flux du trafic aérien. Cette section est organisée comme suit : les sections donnent un bref aperçu des algorithmes pour résoudre la sectorisation de l'espace aérien, la section 2.3.4 une revue de la littérature des techniques de la sectorisation utilisant la PPC.

2.3.1 Les approches basées sur le modèle cellulaire

Le modèle cellulaire hexagonal classique est un modèle cellulaire, où une cellule (Cell Growin Up) est approximée par un hexagone. L'objectif de ce modèle est la répartition uniforme de la charge de travail sur tout le territoire à couvrir.

Le travail de l'auteur [168] repose sur ce modèle. Le principe de cette méthode est fondé sur la division de l'espace aérien en trois (03) couches avec différents niveaux d'altitude (FL0 – FL210, FL210– FL310, FL310 et plus), et chaque couche a été discrétisée en cellules hexagonales avec des informations de la charge de travail des contrôleurs qui dépendent de la somme de quatre (04) éléments : le mouvement horizontal de l'avion, conflit et la résolution des conflits, la coordination entre contrôleur et le changement d'altitude). Ensuite, ces cellules hexagonales ont été regroupées en secteurs à l'aide d'un algorithme basé sur la programmation linéaire pour explorer les nouvelles limites du secteur ATC. L'outil modélisateur des opérations aux aéroports et dans l'espace aérien (TAAM, *Total Airspace and Airport Modeller*) est utilisé pour simuler le trafic produit des estimations de la charge de travail basées sur un modèle de

charge de travail de contrôle. Un nouveau mécanisme potentiel a été proposé par [94], où il a utilisé une grille hexagonale à haute résolution et un algorithme appelé (SRG, *Seeded Region Growing*) pour équilibrer la masse du trafic de chaque secteur. Un autre processus a été proposé par [40]. Le principe de l'algorithme repose sur trois étapes : une modification de l'algorithme de k-Moyennes (*k-means*) pour produire une sectorisation initiale, une recherche locale stochastique (SLS, *stochastic local search*) pour améliorer l'équilibre de la charge de travail, et le redressement des limites du secteur. Aussi, l'auteur [52] présente une amélioration à un modèle existant en programmation mixte en nombres entiers (PLNE). Il a utilisé une méthode de lissage des limites pour éliminer les segments de frontière en dents de scie (formes irrégulières) produit une géométrie de secteur plus réaliste. La métrique d'utilisation ou bien la charge de travail du secteur est le nombre maximum d'aéronefs présents simultanément dans le secteur sur un intervalle de 15 minutes, de plus, chaque secteur a une valeur appelée paramètre d'alerte de moniteur (MAP⁶, *Monitor Alert Parameter*) qui désigne la capacité du secteur en nombre instantané d'aéronef. Dans le contexte de la mise en œuvre du DAC, afin d'éviter des changements de limites de secteur perturbateur dans les périodes de pointe ou les variations de la demande, les auteurs [149] ont proposé une utilisation plus efficace des équipes de contrôleurs multiples pour augmenter les capacités du secteur. Un modèle en PLNE a été développé, qui est similaire à celui de [168], sauf que certains nœuds fictifs sont incorporés pour permettre de sélectionner et définir le nombre de contrôleurs. Des résultats numériques ont été présentés pour illustrer l'approche, à la fin une heuristique a été recommandée pour le développement futur dont le but de contourner le temps d'exécution maximum requis par le modèle PLNE.

6. MAP : numéro désigné pour être utilisé dans le traitement des alertes par le système de gestion de la sécurité. Le MAP est désigné pour chaque secteur opérationnel par incréments de 15 minutes.

2.3. Techniques de résolutions des problèmes de la SEA

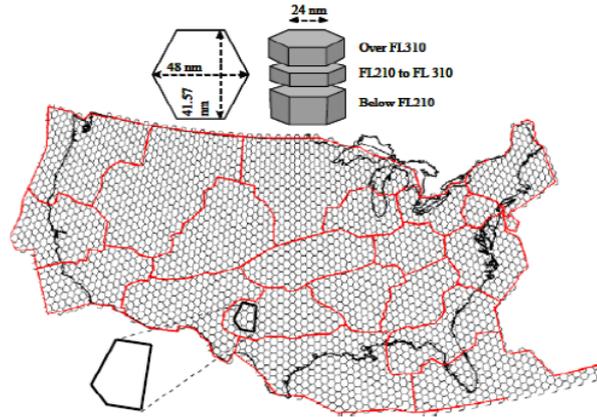


Figure 2.1 Exemple de partitionnement de l'espace aérien à trois niveaux (FL0-FL210, FL210-FL310, plus de FL310) et la structure hexagonale des cellules [168].

L'auteur [107] présente une méthodologie, qui repartitionne l'espace aérien en ajustant les niveaux de vol tout en maintenant les limites horizontales, appelées (FL-DAC, *Flight Level-based Dynamic Airspace Configuration*). L'algorithme utilise l'heuristique ascendante et descendante (bottom-up and top-down) et choisit la solution qui produit moins de secteurs, par exemple l'approche ascendante (bottom-up) l'algorithme commence au FL240 et fonctionne en altitude, combinant des niveaux de vol jusqu'à ce que le nombre total d'aéronefs dépasse le MAP (un MAP supposé à 21 avions). Une fois le MAP dépassé, le niveau de vol immédiatement supérieur devient le début d'un nouveau secteur et le processus de combinaison se répète jusqu'à ce que le niveau de vol FL410 soit atteint, mais ce coût de transition n'est pas inclus dans le calcul de nouveaux secteurs. Bloem et Gupta [27] ont proposé une nouvelle formulation du problème de la conception des secteurs tactiques, les auteurs ont utilisé comme entrée un ensemble de blocs fonctionnels des données (secteurs élémentaires) et le nombre de postes ouverts à chaque pas de temps. Une sortie était un ensemble de secteurs contrôlés regroupés dans des configurations. La charge de travail d'un secteur correspond au nombre maximal d'aéronefs dans le secteur pendant l'intervalle de temps calculé, divisé par la limite supérieure du secteur (MAP). Le coût de la transition entre deux secteurs correspond au nombre de nouveaux secteurs de contrôle par rapport à la période précédente. Le problème également a satisfait de nombreuses contraintes liées à la sectorisation (i.e., convexité, connectivité et délimitation de la charge de travail (MAP)), l'incertitude de la prédiction de trajectoire est explicitement prise en compte.

Le modèle est résolu à l'aide d'un algorithme de programmation dynamique approximatif basé sur une heuristique myopique. Pour ces expériences, les données de trafic historiques ont été utilisées depuis trois jours jeudi en février 2007 et dans les huit zones spécialisées du centre de contrôle du trafic aérien de Cleveland pour créer 19 problèmes différents. Le travail du [68] présente plusieurs algorithmes (algorithme génétique, algorithme de séparation & évaluation (Branch & Bound) et A*) qui construisent de bonnes configurations pour les secteurs de contrôle opérationnels, en tenant compte des prévisions de trafic, des capacités du secteur et du nombre de positions de contrôle de la configuration (également utilisés dans [158]).

Le problème consiste à optimiser une fonction de coût afin d'atteindre une configuration de secteur pour laquelle la charge de trafic est aussi proche que possible de la capacité de chaque secteur ou groupe de secteurs de la configuration. La fonction de coût est la combinaison de secteurs en pondérant deux objectifs de conception, à savoir le nombre de positions de contrôle du secteur ainsi que les surcharges et sous charges de capacité du secteur, les résultats n'étaient pas suffisamment réalistes (voir [69]). La conclusion était que les algorithmes proposés pourraient également être envisagés, avec une définition adaptée de la charge de travail et des seuils et contraintes, pour proposer en temps réel des configurations de secteurs aux chefs de salles de contrôle. Dans un autre travail [67] la charge de travail d'un secteur est définie à l'aide d'un réseau de neurones formé aux données de trafic historiques et aux sectorisations.

Le travail considère des combinaisons de modules d'espace aérien élémentaires pour construire une partition optimale de l'espace aérien. Un réseau de neurones permet de prévoir les charges de travail liées aux configurations et à la recherche dans l'arbre, ainsi que des techniques reliées entre elles permettent d'explorer intelligemment toutes les combinaisons possibles de secteurs élémentaires afin de trouver la combinaison optimale. Les auteurs [102] ont proposé des méthodes de programmation dynamiques approximatives, ils ont conçu une approche par région en décomposant tout l'espace aérien en cellules hexagonales, la méthodologie se compose de cinq (05) étapes :

- **Étape 01** : discrétisation de l'espace aérien avec des cellules hexagonales ;
- **Étape 02** : identification des nœuds, les balises ou les aides à la radionavigation (NAVAIDS) et les points d'intersection des routes aériennes (*Jet Way*) ;
- **Étape 03** : développement d'un algorithme *knapsack* pour regrouper ces cellules

2.3. Techniques de résolutions des problèmes de la SEA

hexagonales autour des nœuds identifiés à l'étape 2, de sorte que la charge de travail des clusters soit maximisée ;

- **Étape 04** : formulation d'un algorithme de recouvrement des ensembles pour trouver le nombre minimum de graines, pour un centre de contrôle du trafic aérien (ARTCC, *Air Route Traffic Control Centers*) donné, qui agira essentiellement comme un point de nucléation du secteur.
- **Étape 05** : formulation d'un algorithme de recouvrement d'ensemble (*set covering*) pour combiner les grappes obtenues à l'étape 3 afin de former des secteurs de sorte que le MAP entre les secteurs adjacents soit équilibrés.

La simulation a été exécutée uniquement pour les secteurs de haute altitude (FL 240 et plus). L'inconvénient majeur de cette méthode, est qu'elle produit des formes indésirables pour les frontières de secteurs (irrégulières). De plus, elle est sensible à l'emplacement initial de motif. Elle n'a pas des règles valides pour le choix initial de motif.

2.3.2 Les approches basées sur le modèle des algorithmiques géométriques

Dans la littérature, le modèle des algorithmiques géométrique (CG, *Computation Geometry*) a été utilisé par plusieurs auteurs pour résoudre le problème de sectorisation. Les recherches menées par [50] pour minimiser les flux de trafics à travers les frontières des secteurs de contrôle s'appuient sur le diagramme de Voronoï pour configurer les secteurs initiaux. Le résultat de la sectorisation finale est obtenu par un algorithme évolutionnaire (EAs, *Evolutionary Algorithms*) sous des contraintes géométriques. En outre, [164] a amélioré l'approche de Delahaye *et al.* Il a utilisé l'algorithme d'approfondissement itératif (IDA, *Iterative Deepening Algorithm*) pour optimiser la SEA. La fonction fitness de l'équilibre de l'algorithme génétique a été définie comme une combinaison des coûts par l'équation suivante :

$$\mathcal{F} = C_1 \times F_{bi} + C_2 \times F_c + C_3 \times F_t \quad (2.1)$$

où :

- C_1, C_2, C_3 sont des coefficients positifs ;

- F_{bi} est la somme de deux (02) charges de travail où ;
 - F_{b1} est la charge de travail de surveillance ;
 - F_{b2} est la charge de travail basée sur le nombre maximum des avions ;
- F_c est la charge de coordination ;
- F_t est la charge du temps minimum de séjour de l'avion.

Par la suite, l'auteur a étendu la méthode à la partition tridimensionnelle [165]. Récemment, l'objectif du travail présenté dans les travaux [143] est de proposer une nouvelle méthode globale de sectorisation de l'espace aérien européen basé sur une nouvelle modélisation mathématique de l'espace aérien et des méthodes d'optimisation heuristiques basées sur (*EA*) pour l'équilibre de la charge de travail et qui serait en mesure de créer des secteurs acceptables du point de vue opérationnel.

Le diagramme de Voronoï est appliqué pour diviser l'espace aérien en un groupe de polygones convexes sans chevauchement. L'algorithme génétique (GA) est utilisé pour effectuer l'optimisation multiobjectif. Dans ce travail, les objectifs suivants ont été inclus : minimiser la variation de la charge de travail liée à la surveillance, minimiser la coordination de la charge de travail et maximiser le temps de séjour dans un secteur. Les nouvelles conceptions peuvent éliminer les secteurs surchargés, mais pas dans tous les cas, réduire le nombre de secteurs nécessaires et se conformer aux principaux modèles de trafic.

En se basant sur la méthode des algorithmes géométriques, les auteurs [30] ont développé une approche qui a formé des frontières de secteur autour des trajectoires des avions préférés des utilisateurs qui ont été regroupés à l'aide d'un algorithme de clustering des k -moyennes tout en maintenant des niveaux acceptables de densité dynamique. Dans un autre travail, et afin de satisfaire aux limitations de charge de travail des contrôleurs, selon la structure du trafic des vols, de sorte qu'aucun secteur ne soit pas surchargé, les chercheurs [18] ont développé un algorithme géométrique qui partitionne des données constituées de trajectoires de points en mouvement, plutôt que d'un partitionnement statique d'ensemble de points couramment étudié.

Tout d'abord, ils ont formulé et résolu la version 1 Dimension (1D) du problème, en montrant comment partitionner une ligne en «secteurs» (intervalles) en fonction des données des trajectoires historiques. Ensuite, ils ont appliqué le cadre de la solution 1D pour concevoir une heuristique de sectorisation 2D basée sur des partitions d'espaces

2.3. Techniques de résolutions des problèmes de la SEA

binaires. Ils ont conçu également des partitions basées sur des «partitions à secteurs» équilibrées d'un type polygone convexe. Puis ils ont comparé la charge de travail de leurs méthodes à celle de l'ensemble de secteurs existant pour l'espace aérien américain. Certaines méthodes DAS ont également introduit un modèle basé sur l'agent (ABM, *Agent based Model*) pour partitionner l'espace aérien en trois dimensions. Dans les études de [92] ont étendu la méthode de sectorisation de l'espace aérien 2D de [118] au partitionnement 3D à l'aide d'une méthode heuristique.

Cette approche est présentée comme une méthode de partitionnement heuristique de l'espace aérien, combinant un GA et un modèle à base d'agent. Le GA est utilisé pour déterminer les emplacements initiaux des agents, et le modèle basé sur les agents est utilisé pour déterminer le groupement de cellules. L'espace aérien est pavé de cellules de grille uniformes en trois dimensions. Les limites des secteurs sont déterminées en regroupant des cellules selon deux objectifs : la charge de trafic cumulative présente la charge de la tâche ATC dans un intervalle de temps donné et la similitude cumulative mesure l'alignement entre les secteurs redéfinis et les principaux flux de trafics.

Cette approche partitionne l'espace aérien en fonction du regroupement des cellules de la grille 3D. Il ne peut pas garantir de produire des formes de secteur qui répondent aux exigences du prisme correct. Des algorithmes génétiques ont été utilisés pour améliorer le secteur. Toutefois, le secteur de l'espace aérien présenté dans leur papier ne présente aucune amélioration, ce qui signifie que cette approche ne permet pas de fournir des solutions DAS optimales. Une autre étude de la littérature, basée sur le modèle de la géométrie, les auteurs [148] ont utilisé les types de la méthode de coupe géométrique pour générer des secteurs finaux. Dans leurs travaux une approche multiobjectif pour la sectorisation dynamique de l'espace aérien a été utilisée. Un modèle amélioré basé sur les agents (iABM, *improved Agent Based Model*) est appliqué à la sectorisation dynamique de l'espace aérien. Les auteurs ont proposé également trois modèles supplémentaires : KD-Tree (*k-dimensional tree*), bisection et diagramme du Voronoï pour partitionner l'espace aérien en 3D, et satisfaire la contrainte de convexité et réduire les coûts de calcul. Un algorithme évolutif multiobjectif qui utilise (04) quatre objectifs : minimiser la variance de la charge de travail du contrôleur dans les secteurs, maximiser le temps de vol moyen du secteur, minimiser la distance entre les points de passage du flux de trafic et les frontières des secteurs est formulé pour optimiser

la sectorisation de l'espace aérien. Les résultats expérimentaux montrent que (iABM) offre les meilleures performances en matière d'équilibre de la charge de travail, mais qu'il est restrictif en ce qui concerne la contrainte de convexité. Les modèles basés sur les diagrammes de bisection et de Voronoï sont moins performants que l'iABM en matière d'équilibre de la charge de travail, mais améliorent le temps de vol moyen par secteur et peuvent satisfaire la contrainte de convexité.

Le modèle basé sur l'arbre KD a un coût de calcul inférieur, mais une performance médiocre sur les objectifs donnés. Récemment, les auteurs [65] ont proposé une sectorisation dynamique de l'espace aérien (*AutoSec, Automatic Sectorization*) pour les vols centrés sur la charge des tâches du contrôleur, sur un échantillon de trafic de la zone EDYYDUTA (*EDYY Deco Sectors, Maastricht*) en trois étapes consistant à : grouper de manière floue le flux de trafic le jour des opérations, à générer une nouvelle structure sectorielle basée sur des diagrammes de Voronoï et à appliquer un algorithme évolutif afin d'ajuster et d'optimiser la nouvelle structure sectorielle en fonction de la demande dynamique en trafic aérien. Par conséquent, ils ont suffisamment résolu le problème des frontières non convexes et d'une transition harmonieuse entre deux sectorisations pour différentes demandes de trafic aérien.

Dans la littérature disponible, les secteurs finaux, basés sur des algorithmes géométriques, avaient encore des formes indésirables. La figure 2.2 donne un exemple de partitionnement via l'algorithme géométrique. Aussi, les deux (02) approches, citées ci-dessus, n'utilisent pas l'information de la structure de l'espace aérien. De plus, les frontières des secteurs conçus ne respectent pas les contraintes géométriques.

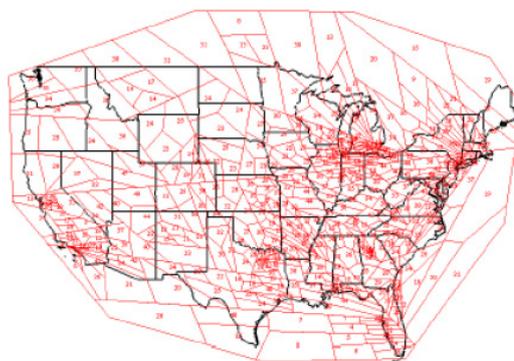


Figure 2.2 Résultats de partitionnement de l'espace aérien "USA" en 412 secteurs à l'aide d'un algorithme géométrique (pie-cut).

2.3. Techniques de résolutions des problèmes de la SEA

2.3.3 Les approches basées sur le modèle de graphe

Ce modèle de partitionnement prend en compte les informations de la structure de l'espace aérien, où les sommets représentent les aéroports, les balises et les points de croisement, tandis que les arêtes représentent des routes aériennes. La figure 2.3 ci-dessous illustre un exemple d'un graphe pondéré à la fois aux sommets et aux arrêtes.

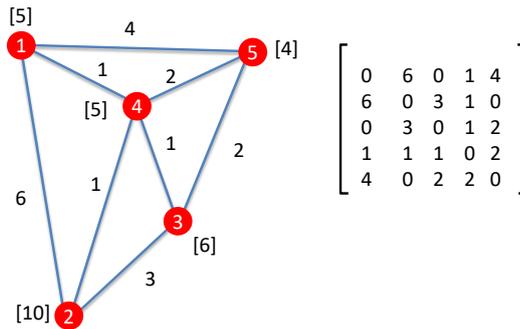


Figure 2.3 Représentation d'un graphe pondéré avec sa correspondante matrice des poids.

Une heuristique basée sur des techniques spectrales de la théorie des graphes a été utilisée par [113]. Le principe de cette méthode est de diviser le flux de trafic en sous-graphes de plus en plus petits jusqu'à ce que tous les sous-graphes aient une charge de travail au-dessous d'un certain seuil. Dans cette approche, quelques limitations de l'algorithme de sectorisation ont été indiquées à titre d'exemple, l'algorithme a produit de petits secteurs qui étaient inclus dans de plus grands secteurs, de plus des secteurs ovales ont été créés parfois. Une autre approche a été proposée par [169], basée sur un algorithme de bisection spectrale de graphe pondéré non orienté qui représente avec précision les aéroports, les points de passage (*waypoints*) et les routes aériennes, et le diagramme de Voronoï pour équilibrer la charge de travail dans les secteurs et minimiser la coordination entre contrôleurs, tout en respectant les contraintes géométriques. Les auteurs [95] ont développé une méthode pour ajustements dynamiques des limites de secteur qui maintient la charge de travail. L'approche repose sur des blocs fondamentaux d'espace aérien, appelés zone d'affichage fixe (FPA⁷, *Fix Posting Area*) pour définir les limites des secteurs et équilibrer la charge de travail des secteurs.

Les FPA sont supposés être créés. Ensuite, ces zones sont regroupées pour concevoir

7. Fix Posting Area : l'unité fondamentale de l'espace aérien gérée par un (ARTCC, *Air Route Traffic Control Centers*) est une zone d'affichage fixe (FPA).

une configuration optimale des secteurs. Pour la métrique de complexité, plutôt que d'utiliser des nombres d'occupations absolus, une mesure relative est calculée, c'est-à-dire le nombre d'occupants (le nombre d'aéronefs dans le secteur) sous forme de pourcentage de la valeur MAP du secteur. Le concept dynamique de FPA est une forme de gestion flexible de l'espace aérien. Les secteurs sont construits à partir de FPA.

Les FPA peuvent être affectés dynamiquement d'un secteur à un autre lors d'événements de sectorisation planifiés. Si le secteur est surchargé au cours d'une période donnée (15 minutes), l'algorithme essaie de réaffecter certains FPA du secteur à un secteur voisin, si cela est possible. Si le secteur n'est pas suffisamment chargé en une période donnée et qu'il a un secteur voisin suffisamment petit, alors ce secteur avec tous ses FPA peut être combiné avec ce secteur voisin. Cette procédure est répétée pour tous les secteurs et tous les FPA. Il fonctionne bien dans un espace 3D, permettant à la fois des modifications de limites et des combinaisons de secteurs selon les besoins. De plus, les ajustements dans l'espace aérien sont effectués par étapes discrètes et prédéfinies, plutôt que par des étapes continues.

Enfin, les auteurs ont noté que cette méthode pourrait être utilisée conjointement avec des algorithmes de sectorisation basés sur l'optimisation dans lesquels l'espace aérien initial représente une configuration optimisée, les adaptations dynamiques étant gérées à l'aide du concept de partage. Plusieurs méthodes de partitionnement de graphe sont étudiées dans les travaux de Bichot : [21–24] pour résoudre le problème du découpage de l'espace aérien européen en centres et en zones de qualification : parmi lesquelles on cite le partitionnement classique, comme l'expansion de région, les multi niveaux ou les algorithmes du type Kernighan-Lin, les métaheuristiques comme le recuit simulé, les algorithmes de colonies de fourmis, les algorithmes évolutionnaires et la nouvelle méthode fission fusion. Cette dernière est inspirée des phénomènes correspondants de la physique nucléaire, semble particulièrement appropriée pour résoudre ce problème.

Dans l'étude [110] la charge de travail d'un secteur est la somme pondérée de sa charge de travail de surveillance, sa charge de conflit et de sa charge de travail de coordination construit un modèle de graphe pondéré qui représente avec précision le réseau de routes aériennes. Le problème de la sectorisation a ensuite été formulé sous forme de problème de coupe de graphe (*cut-graph*) et résolu par bissection spectrale

2.3. Techniques de résolutions des problèmes de la SEA

itérative. Un soin particulier est apporté à l'étape de post-traitement géométrique, avec le graphe étant en entrée, un nouvel algorithme itératif de bisection utilisant la recherche sur le chemin le plus court est proposé, afin que les nouveaux secteurs aient des bordures lisses et de bonnes formes géométriques. Les limites de secteur satisfont également à l'exigence de distance minimale. Les résultats de la simulation montrent que l'algorithme proposé peut générer des secteurs en réponse à l'évolution du trafic aérien et ainsi gérer plus efficacement la capacité de l'espace aérien, et que les nouveaux secteurs calculés à l'aide de l'algorithme proposé surpassent les secteurs d'exploitation existants (ZTL, *centre d'Atlanta*) presque toutes les mesures dans le cas moyen et dans le cas le plus défavorable.

L'auteur [138] présente une méthode de sectorisation utilisant des techniques de géométrie computationnelle (méthode de graphe et modèle des algorithmes géométriques) pour concevoir des secteurs conformes aux flux de trafic importants, tout en tenant compte des exigences opérationnelles en matière de forme et de géométrie du secteur. Leurs modèles reposent sur une conception de flux identique, en tenant compte les contraintes suivantes : les flux standard doivent traverser une limite de secteur presque orthogonalement, flux traversant (dans le cas de trafic traversant à l'intérieur d'un secteur, le trafic arrivant au point de passage doit avoir suffisamment de temps dans le secteur avant d'atteindre le point de passage, de manière à ce que des conflits potentiels avec le trafic de passage puissent être résolus), intersections transfrontalières, angle de rotation à un sommet le long de la coupe polygonale, interactions de coupe de l'espace aérien à usage spécial (SUA, *Special Use Airspace*) et convexité. Les auteurs utilisent une méthode de discrétisation de l'espace de recherche, et une autre méthode de rechercher pour équilibrer la charge de travail le long des secteurs après avoir discrétisé l'espace de recherche.

Les résultats expérimentaux indiquent que les techniques présentées équilibrent avec succès la charge de travail entre les secteurs et satisfont les exigences de forme opérationnelle, le modèle, ensuite a été étendu à la sectorisation 3D par coupes d'altitude. Il a toutefois été démontré que la méthode appliqué à la sectorisation 3D ne fournit pas de résultats significatifs. De plus, les auteurs ont appliqué les techniques de géométrie computationnelle pour optimiser localement et lisser les secteurs créés à l'aide d'autres méthodes de sectorisation (MIP basée sur des modèles de cellules).

Les résultats de la méthode locale de post-traitement de la sectorisation MIP basés

sur les cellules semblent prometteurs, car la forme souhaitée et les contraintes de flux sont satisfaites du coût d'un léger déséquilibre de charge de travail. Les auteurs [9] ont utilisé la recherche locale intégrée, un algorithme évolutionnaire NSGA-II pour développer les secteurs initiaux et ils ont proposé plusieurs façons de produire la première génération. Également une nouvelle méthode basée sur la structure concave pour décrire automatiquement les limites exactes du secteur. Outre le problème sectoriel, ils ont également résolu le problème de transition de configuration (CTP, *Configuration Transition Problem*), qui a généré une série de liaisons de configurations non dominées pour plusieurs périodes de temps consécutives. Récemment un modèle a été proposé par [66].

La métrique de charge de travail est considérée comme le nombre d'aéronefs et la charge de travail équilibrée indique le nombre moyen d'aéronefs entre les secteurs. Pour résoudre le problème, l'auteur a utilisé la méthode multi-niveaux pour le partitionnement de graphe et une optimisation par l'essaim de particules (PSO, *Particle Swarm Optimization*) a été utilisée pour trouver la configuration de l'espace aérien.

2.3.4 Sectorisation de l'espace aérien par la PPC

L'auteur [85] présente une approche basée sur le modèle cellulaire utilisant la PPC sous langage Comet (un langage de style C pour la résolution de problèmes combinatoires, un produit de (Dynadec) : des cellules hexagonales sont fusionnées pour créer des secteurs à l'aide de contraintes sur la charge de travail, les points d'entrée, etc.

En veillant à une charge de travail équilibrée pour tous les secteurs et en respectant plusieurs autres contraintes pour la qualité de la conception des secteurs. La méthode de sectorisation a principalement été testée à l'aide des paramètres par défaut, qui divisent l'espace aérien en cellules hexagonales d'un diamètre de cinq nautiques milles et d'une hauteur de 1000 pieds (normes de séparation voir 1.2). Chaque cellule est dotée de deux éléments de données clés qui ayant donné la charge de travail de la cellule : le nombre de conflits se produisant dans cette cellule et le temps total de vol passé par les avions dans cette cellule.

Afin d'avoir une sectorisation acceptable, l'auteur a pris en considération six (06) contraintes géométriques (voir chapitre 1, sous-section 1.4.2, page 15) :

1. la charge de travail du secteur doit être équilibrée ;

2.3. Techniques de résolutions des problèmes de la SEA

2. le nombre de points d'entrée devrait être minimisé ;
3. convexité (évite que les avions entrent deux fois au même secteur) ;
4. temps de passage minimum (évitez les vols de passage court) ;
5. distance minimale pour assurer une distance suffisante entre les conflits potentiels et la limite du secteur ;
6. distance minimale en sens des routes (assurer une distance suffisante entre les trajectoires et les limites des secteurs).

Plusieurs propagateurs sont conçus pour assurer l'exactitude de la sectorisation :

- **Le propagateur de contiguïté** (*the contiguity propagator*) : le propagateur qui veille à ce que les vols ne se chevauchent pas, identifie les parties de la séquence qui doivent contenir une valeur donnée et les parties de la séquence pouvant contenir cette valeur.
- **Le propagateur** (*the sliding sum propagator*) : ce propagateur, qui élimine les vols de croisement courts, comme le propagateur de contiguïté, commence par rechercher les limites maximales possibles de la sous-séquence avec laquelle il travaille.
- **Le nombre de propagateurs de sous-séquences** (*the number of subsequences propagator*) : le propagateur du nombre de points d'entrée, comme le propagateur de contiguïté, concerne les sous-séquences d'itinéraires de vol.

Les données pour la sectorisation sont fournies via *Arithmetic Simulation Tool for ATFCM and Advanced Concept* (ASTAAC), l'outil de simulation fourni par le centre expérimental Eurocontrol (EEC, *Eurocontrol Experimental Centre*). Les expériences ont été menées sur quelques centaines de milliers de cellules, pour être regroupées en cinq sections. Les résultats proviennent de l'utilisation de cellules d'une taille comprise entre 5 et 7 nm, mais à 20 nm et au-delà, le solveur de contraintes ne trouve généralement aucune solution qui satisfait toutes les contraintes.

L'auteur [85] a conclu pour ces résultats préliminaires que le modèle présenté dans cette étude produirait généralement des sectorisations assez bonnes en termes numériques (charge de travail, points d'entrée, rentrée de vols, temps de passage des avions notamment dans le centre de contrôle de Paris-EST) par rapport aux résultats de l'algorithme *NEVAC Sector Builder* fourni avec ASTAAC. L'auteur [85] a noté que la

sectorisation résultante, en pratique, il est difficile de la comprendre ou de la mettre en œuvre (parfois déconnectés ou de formes très irrégulières). Par la suite, ils ont testé plusieurs méthodes pour améliorer la compacité des secteurs (compacité via la contrainte de contiguïté, compacité basée sur la distance et compacité par connectivité). Les solutions trouvées ont été décevantes et les propagateurs sont inefficaces. Il est possible que ces contraintes puissent imposer ou faire partie de l'application de bonnes solutions, mais n'a guère pas de façon significative pour tenir compte de la compacité des secteurs de contrôle.

Dans la littérature citée dans ce rapport [57], les auteurs ont appliqué une recherche locale basée sur des contraintes des données réelles en combinant le modèle de graphe et l'approche cellulaire en utilisant le moteur (CBLS) du solveur *OscAR* et en le comparant à l'outil de sectorisation (ASTAAC) pour de nombreuses contraintes pertinentes détaillées dans [59]. Dans ces travaux, seules les contraintes (charge de travail équilibrée, connectivité, convexité basée sur la trajectoire, temps de passage minimum) ont été incluses initialement dans le modèle, sans la mise en œuvre de la contrainte de compacité.

Les recherches ont été autorisées à exécuter au maximum 30000 itérations, une sectorisation supplémentaire marquée CBLS* dans laquelle la valeur de seuil de construction des blocs est augmenté (la valeur par défaut est de 3 vols augmentée à 5), les paramètres de la recherche ont été définis sur les valeurs par défaut décrites dans un algorithme de recherche, à l'exception de la première expérience sur le CCR Sud de Madrid, où le facteur de charge de travail a été réduit à 0,005 par rapport à la valeur par défaut de 0,05 en raison d'une erreur.

Dans leur conclusion préliminaire, l'auteur a noté que les contraintes de [59] semblent permettre de minimiser leurs valeurs respectives, mais devraient amener les secteurs à obtenir des formes particulières. La contrainte connectée implicite fournit des secteurs connectés, mais requiert également que les cellules vides soient quelque peu incluses dans la recherche. Une autre approche consisterait à ne prendre en compte que les trajectoires lors de la recherche et à essayer en quelque sorte de construire des composants compacts et connectés dans le post-traitement. Un post-traitement pour améliorer la forme des secteurs via la contrainte de compacité. Cela a donné certains résultats positifs, mais semble avoir eu un impact négatif sur les autres contraintes du modèle.

Aussi, les résultats de compacité semblent quelque peu dépendre de la qualité des

2.3. Techniques de résolutions des problèmes de la SEA

sectorisations initiales telles que construites lors de l'étape de prétraitement. Dans une autre étude menée par [59], les chercheurs ont étudié les contraintes liées à la sectorisation de l'espace aérien, en donnant à chaque contrainte une analyse des algorithmes et propriétés nécessaires à la recherche systématique et à la recherche locale stochastique. En s'appuyant sur le modèle de graphe. Les auteurs [150] ont proposé une approche, héritée à la fois des techniques de partitionnement de graphes et des techniques de PPC, pour diviser l'espace aérien en un nombre souhaité k - secteurs afin d'équilibrer la charge de travail, et minimiser les coordinations entre les contrôleurs, tout en respectant les contraintes géométriques. La fonction objectif consiste à minimiser la somme des évaluations des routes coupées (coordination), tout en respectant la contrainte d'équilibre et autres contraintes géométriques.

Elle est donnée par l'équation suivante (2.2) :

$$\min \sum_{\substack{i \in V_p \\ j \in V_q \\ i \neq j}} \omega_{ij} \quad (2.2)$$

La somme des poids des sommets dans les sous-ensembles est équilibrée avec un taux de tolérance $0 \leq \delta \leq 1$.

$$\forall p \in [1, k] : \left| \sum_{v_i \in V_p} \omega_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \omega_i \right| \leq \delta \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (2.3)$$

où :

- V_p, V_q sont des sous-ensembles de graphe ;
- ω_{ij} est le poids des arêtes de graphe entre deux sommets ;
- k est le nombre des secteurs ;
- ω_i est le poids du sommet.

Elle a permis de trouver la solution optimale de bissection pour les petites instances (graphes jusqu'à 100 sommets). Pour résoudre les grandes instances dont la taille est plus importante, le problème est résolu avec une méthode en deux temps. Tout d'abord, une bonne solution est cherchée par le schéma de bissection récursive et à chaque étape de bissection, celle-ci (bissection) est améliorée par l'heuristique de Kernighan/Lin restreinte. Dans un deuxième temps, une amélioration par un processus d'optimisation locale randomisée : les résultats obtenus sont prometteurs, cependant, pour la rendre

plus performante, certaines perspectives (tels que : la parallélisation de la recherche de solution, l'optimisation de la forme géométrique, la construction dynamique de la triangulation, la prise en compte de la troisième dimension des secteurs) doivent être prises en compte.

2.4 Conclusion

Cette première partie recense et analyse les principales techniques ayant été développées pour optimiser la sectorisation de l'espace aérien en tenant compte des contraintes opérationnelles plus réalistes. La sectorisation dépend fortement de la demande de trafic et du flux de trafic, un processus en incessante évolution. Pour la mise en œuvre de l'optimisation d'espace aérien, la plupart des travaux ont décrit l'espace aérien comme un modèle, puis calculer la charge de travail ou la tâche du contrôleur en tenant compte de plusieurs mesures de complexité de la densité de trafic (voir chapitre 1), ensuite adopter une métaheuristique appropriée (par exemple, le recuit simulé, les algorithmes de colonies de fourmis, les algorithmes évolutionnaires et la nouvelle méthode fission fusion) ou sur des bases d'optimisation (programmation linéaire (PL), PLNE ou PPC) pour découper l'espace aérien en secteurs de contrôleurs. Le principal avantage des méthodes heuristiques réside dans leur capacité à appliquer plusieurs critères de conception complexes basés sur la géométrie des secteurs ainsi que sur les schémas de circulation du trafic aérien, les méthodes d'optimisation métaheuristiques peuvent apporter des solutions optimales ou quasi optimales au problème de la sectorisation de l'espace aérien dans un délai de calcul raisonnable. Contrairement aux méthodes heuristiques, des méthodes exactes telles que PLNE, programmation dynamique et méthodes PPC peuvent garantir la convergence vers un optimum global pour ce type des problèmes, mais le temps de calcul nécessaire pour obtenir un optimum global augmente exponentiellement avec la taille du problème où il pourrait y avoir plusieurs solutions optimales globales.

Chapitre 3

Méthodes de modélisation et de résolution par la programmation par contraintes

Sommaire

2.1	Introduction	26
2.2	Sectorisation de l'espace aérien	26
2.3	Techniques de résolutions des problèmes de la SEA	27
2.3.1	Les approches basées sur le modèle cellulaire	27
2.3.2	Les approches basées sur le modèle des algorithmiques géométriques	31
2.3.3	Les approches basées sur le modèle de graphe	35
2.3.4	Sectorisation de l'espace aérien par la PPC	38
2.4	Conclusion	42

Le chapitre présente deux sections principales qui décrivent les outils utilisés dans notre recherche : dans la première section nous présentons les principes de base de la PPC, qui seront ensuite utilisés pour modéliser et résoudre le problème de sectorisation équilibrés. La deuxième section sera consacrée à la description des modèles du calcul parallèle qui traitent de façon structurée les problèmes de satisfaction de contraintes, de réduction du nombre total de nœuds explorés et d'accroître les performances de la PPC.

3.1 Introduction

La programmation par contrainte [105, 133, 136] est un paradigme puissant qui consiste à trouver des solutions aux problèmes combinatoires où ils sont classés dans

la catégorie des problèmes NP-Complets⁸, se basant sur des techniques issues de l'intelligence artificielle ou de la recherche opérationnelle. Ces problèmes se produisent dans de nombreuses situations réelles comme les problèmes d'ordonnancement, allocation des ressources, planification, le transport et la gestion des flux. Le principe de la PPC consiste dans un premier temps : (1) à modéliser les problèmes sous forme d'un ensemble de variables prenant leurs valeurs dans un ensemble fini, liées par un ensemble de contraintes ; (2) trouver des solutions en intégrant la propagation de contraintes à la recherche, un algorithme de recherche arborescente est appliqué pour trouver une solution [119], qui est formellement défini par le triplet $\langle X, D, C \rangle$.

3.2 Programmation par contraintes

3.2.1 Problème combinatoire

Définition 3.1 (Problème de Satisfaction de Contraintes : CSP). *Un CSP est un tuple $\langle X, D, C \rangle$ tel que :*

- $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ est un ensemble de n variables de décision ;
- $D = \{D_1, \dots, D_n\}$ est l'ensemble des domaines des variables, où D_i est un domaine fini de valeurs ; on note aussi $D(x_i)$ le domaine D_i de la variable x_i ;
- $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ est un ensemble fini de m contraintes. Pour $i \in [1, \dots, m]$, C_i est une paire (P_i, R_i) , telle que $P_i = (x_{i_1}, \dots, x_{i_k})$ est un tuple de variables de X , appelé la **portée** de C_i , $R_i \subseteq D_{i_1} \times \dots \times D_{i_k}$ un ensemble de tuples satisfaisant C_i . $|X(C)|$ représente l'arité de C . C est dite :
 - **unaire** si son arité $|X(C)| = 1$;
 - **binaire** si son arité $|X(C)| = 2$;
 - et **n-aire** si $|X(C)| = n$, (elle met en relation un ensemble de n variables), dans ce cas la contrainte est dite globale [133], par exemple, **alldifferent** (x_1, \dots, x_n) et **regular** (x_1, \dots, x_n) .

La notion d'instanciation est fondamentale en PPC :

8. Étant donné un problème NP-complet, on peut vérifier en temps polynomial toute solution proposée, mais trouver une solution se fait en temps exponentiel dans le pire des cas. C'est le cas, par exemple, du problème du voyageur de commerce ou de celui du problème du sac à dos.

3.2. Programmation par contraintes

Définition 3.2 (Instanciations). Une **instanciation** I d'un ensemble de variables $X' \subseteq X$, une fonction I qui associe à chaque variable $x \in X$ une valeur $I(x) \in D(x)$. La portée d'une instanciation I est notée $\text{var}(I)$.

Une **instanciation complète** est une instanciation qui porte sur l'ensemble des variables, c'est-à-dire une instanciation I pour laquelle $\text{var}(I) = X$. Une **instanciation partielle** est une instanciation qui n'est pas complète. Une **instanciation singleton** est une instanciation qui porte sur une seule variable $x \in X$, c'est-à-dire une instanciation I pour laquelle $\text{var}(I) = x$. Une valeur d'une instanciation I est une paire (x, v) avec $x \in \text{var}(I)$ et $v \in D(x)$. Une variable $x \in X$ est instanciée dans une instanciation I si $x \in \text{var}(I)$, et est dite **non instanciée** sinon. L'**ensemble des instanciations** sur des variables $x' \in X$ est noté $\mathbb{D}(X)$, ou bien simplement $I(X)$ lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté.

Une propriété élémentaire mais importante des ensembles d'instanciations des variables d'un CSP est que leur cardinalité est finie.

Propriété 3.1 (Nombre d'instanciations). Soient $P = \langle X, D, C \rangle$ un CSP, et $X' \subseteq X$ un sous ensemble des variables de P . Alors le nombre d'instanciations sur X' est donné par [55] :

$$|I(X')| = \prod_{(x \in X')} |D(x)| \quad (3.1)$$

Nous définissons maintenant la notion de **solution d'un CSP** en termes d'instanciations.

Définition 3.3 (Solution d'un CSP). Une **solution** S de $P = \langle X, D, C \rangle$ est une instanciation consistante de toutes les variables ($X_p = X$). On dit alors que l'instanciation S satisfait P . L'ensemble des solutions de P est noté $\text{Sol}(P)$.

Définition 3.4 (Satisfaction). Soit $P = \langle X, D, C \rangle$ un CSP. Une contrainte $c \in C$ est satisfaisable s'il existe une instanciation I d'un sous-ensemble de X' satisfaisant X . Un CSP P est satisfaisable s'il existe une solution de P , c'est-à-dire si $\text{Sol}(P) \neq \emptyset$. Une contrainte et un CSP sont insatisfaisables s'ils ne sont pas satisfaisables.

Exemple 3.1 (Exemple de modèles PPC). Trouver une affectation de modèle CSP suivant :

- Les variables x_1, x_2, x_3 (entières).
- Les domaines $D_{x_1} = [1, 3], D_{x_2} = [1, 3], D_{x_3} = [1, 3]$.
- La contrainte $x_1 = x_2 + x_3$.

Ce CSP admet comme solutions : $\langle x_1, x_2, x_3 \rangle : \langle 2, 1, 1 \rangle, \langle 3, 1, 2 \rangle, \langle 3, 2, 1 \rangle$.

Exemple 3.2 (Coloriage d'une carte). *Il s'agit de colorier les sept (07) villes d'un pays, de sorte que deux villes ayant une frontière en commun soient coloriées avec des couleurs différentes. On dispose pour cela de quatre (04) couleurs suivantes : {bleu, rouge, vert, jaune}.*

On définit le CSP $\langle X, D, C \rangle$ tel que :

- $X = \{x_1, x_2, \dots, x_7\}$.

(On associe une variable x_i différente par région i à colorier.).

Pour tout x_i élément de X , $D(x_i) = \{\text{bleu, rouge, vert, jaune}\}$. (Chaque région peut être coloriée avec une des 4 couleurs).

- $C = \{x_i \neq x_j / x_i \text{ et } x_j \text{ sont 2 variables de } X \text{ correspondant à des régions voisines}\}$.
- (02 régions voisines doivent être de couleurs différentes.).

3.2.2 Principe de filtrage et de consistance locale

Un filtrage permet d'établir ce qu'on appelle la **consistance de domaine**. Les méthodes de filtrage peuvent être utilisées soit avant de mener une recherche de solutions, ou bien pendant la recherche (consistance). Dans ce dernier cas, l'idée de base de l'algorithme de filtrage consiste à éliminer du domaine des variables de sa portée les valeurs localement incohérentes, ne pouvant pas mener à une solution. Il est alors inutile d'explorer le sous-arbre associé au nœud courant. Le nœud est dit en échec et la recherche se poursuit par **retour-arrière**.

Définition 3.5. *Une contrainte C est consistante si et seulement s'il existe un tuple t de $T(C)$ valide. Une valeur $a \in D(x)$ est consistante avec C si et seulement si $x \notin X(C)$ où il existe un tuple t valide de $T(C)$ avec $(x, a) \in t$ (t est appelé support de (x, a) sur C). Les contraintes sont utilisées activement pour supprimer les inconsistances, des nombreuses propriétés de consistance existante, qui varient en fonction du type de contrainte.*

3.2. Programmation par contraintes

Définition 3.6 (Consistance de domaine). *Un CSP est dit consistant de domaine si pour toute variable X et pour toute valeur $v \in D(x)$ l'affectation partielle (x, v) satisfait toutes les contraintes unaires.*

Exemple 3.3. *Soit une contrainte $I_1 > 3$, et si le domaine de I_1 contient les valeurs $\{1, 2, 7, 8\}$, alors le CSP n'est pas consistant de domaine, pour qu'il soit consistant de domaine, il faut retirer du domaine de I_1 les valeurs 1, 2 et 3 qui violent la contrainte $I_1 > 3$.*

Définition 3.7 (k -consistant). *Un CSP est k -consistant si et seulement si toute instantiation partielle de $k-1$ variables consistantes peut être étendue à une instantiation partielle de k variables, en ajoutant n'importe quelle variable non instanciée.*

Définition 3.8 (Arc-consistance (AC)). *Une contrainte est dite arc-consistante si pour chaque valeur de chaque variable, il existe une affectation des autres variables telles que la contrainte soit satisfaite et la valeur est dans le support de la contrainte. Un CSP est arc-consistant si toutes ses contraintes sont arc-consistantes.*

Définition 3.9 (Consistance de bornes). *Étant donné une contrainte c de portée $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ et les domaines $D(x_i)$ ($1 \leq i \leq k$), la consistance de bornes est atteinte pour c si et seulement si pour chaque $D(x_i)$ ($1 \leq i \leq k$) :*

- il existe $(r_1, \dots, r_{i-1}, x_i^{min}, r_{i+1}, \dots, r_k) \in c$ où r_j est une valeur appartenant à l'intervalle $[x_j^{min}, x_j^{max}]$ et :
- il existe $(r_1, \dots, r_{i-1}, x_i^{max}, r_{i+1}, \dots, r_k) \in c$ où r_j est une valeur appartenant à l'intervalle $[x_j^{min}, x_j^{max}]$.

Il existe également d'autres techniques de consistance allant au-delà du schéma de k -consistante (voir définition 3.7), telles que les consistances inverses [157], les consistances inverses de voisinage [62] ou les consistances singleton [127].

3.2.3 Stratégies de recherche

Les solveurs permettent de résoudre un grand nombre d'applications réelles de façon efficace. Les techniques les plus connues reposent sur la *propagation de contraintes* et des *stratégies de recherche* ont pour but de trouver une solution, éventuellement optimale ou bien se termine en cas d'inexistence d'une telle affectation est prouvée

infaisabilité.

Algorithmes simples de recherche

Générer et Tester (generate-and-test) : c'est l'algorithme le plus naïf pour résoudre un CSP. En général, dans ce paradigme, on énumère toutes les affectations totales possibles grâce à une recherche arborescente qui instancie itérativement les variables et on vérifie ensuite leurs consistances (c.-à-d. si chacune des instanciations candidates générées est une solution valide du problème). Si chacun des n domaines de variables a la taille d , alors $D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n$ a d^n éléments. S'il y a c contraintes, le nombre total de contraintes testées est $O(cd^n)$. Quand n devient grand, cela devient très vite intraitable, et nous devons donc trouver des solutions alternatives.

Retour-arrière (Backtrack) : algorithme de base permettant de décider si un CSP a donné une solution. Il est donné par une procédure d'énumération récursive, qui commence avec une affectation vide et dans le cas général, tente d'étendre une solution partielle d'une variable supplémentaire (variable cohérente avec les valeurs de la solution partielle actuelle) à une solution complète. Ce processus s'arrête dès qu'une solution est trouvée, ou bien le retour arrière arrive à la racine de l'arbre de recherche sans qu'une solution ne soit trouvée. Le retour en arrière est strictement meilleur que générer-et-tester, cependant, sa complexité d'exécution pour la plupart des problèmes non triviaux est toujours exponentielle. Trois effets négatifs sont signalés dans l'approche, notamment :

- La **suppression** (thrashing) : défaillance répétée pour la même raison. La suppression est provoquée par le fait que l'algorithme de retour en arrière standard n'identifie pas la véritable raison du conflit, c'est-à-dire les variables en conflit. Par conséquent, la recherche dans différentes parties de l'espace échoue pour la même raison.
- La nécessité de faire du travail **redondant**. Même si les valeurs contradictoires des variables sont identifiées lors du retour arrière intelligent, elles ne sont pas mémorisées pour la détection immédiate du même conflit dans un calcul ultérieur.
- La **détection des conflits trop tard** : l'algorithme de retour arrière basique détecte le conflit trop tard, car il n'est pas capable de le détecter avant que le conflit ne se produise réellement, c'est-à-dire après l'affectation des valeurs à

3.2. Programmation par contraintes

toutes les variables de la contrainte en conflit.

Les recherches ont focalisées sur l'amélioration de l'algorithme basique de retours arrière par d'autres techniques d'exploitation de contraintes afin d'éliminer les inconvénients détectés, par l'application du :

- **Schémas retrospectives** (*ou look-back schemes*) : En général, cette catégorie d'algorithmes de recherche tire parti de l'exploration arborescente, notamment des violations des contraintes, effectuée pendant l'exécution. Pour ce type d'algorithmes, on peut citer *conflict-directed backjumping* [126], *backtrack intelligent (backjumping)*, et *backmarking*). Pour plus de détail, le lecteur pourra consulter [63].
- **Schémas prospectifs** (*ou look-ahead schemes*) : Essentiellement, leurs principe est basé sur la modification du processus d'exploration standard de l'algorithme *Backtrack* afin de détecter en amont les instanciations non globalement consistantes. L'algorithme prospectif le plus courant est *forward checking* [77].

Intégration des heuristiques de l'ordre d'instanciation

L'ordre dans lequel les variables sont choisies pour l'instanciation peut avoir un impact substantiel sur la complexité de la recherche en arrière (*Backtrack*). L'instanciation des variables peut être :

- Un **ordre statique**, dans lequel l'ordre des variables est spécifié avant le début de la recherche et ne change pas par la suite :
- Un **ordre dynamique**, dans lequel le choix de la variable suivante à prendre en compte à tout moment dépend de l'état actuel de la recherche, le plus courant est basé sur le principe "FAIL-FIRST".

Il y a d'autres stratégies de recherche plus complexes, nous nous limitons à quelques stratégies que nous avons mis en œuvre dans notre modèle, elles sont les suivantes :

Domaine sur degré pondéré (domOverWDeg) : c'est une heuristique dynamique proposée par [29] pour les méthodes prospectives, elle peut traiter plus efficacement les problèmes structurés et non structurés en guidant le parcours de la recherche vers les inconsistances du problème. Elle sélectionne la variable en fonction du réseau de contraintes. C'est-à-dire, elle choisit la variable avec le plus petit rapport entre la taille courante du domaine de la variable et son degré pondéré courant $|dom|/wdeg$,

où $|dom|$ dénote la taille de domaine courant d'une variable et $wdeg$ son degré pondéré. Le degré pondéré d'une variable est la somme des poids sur l'ensemble des contraintes impliquées et au moins une autre variable non affectée.

Recherche par activité (*Activity-Based Search*) [117] : c'est une heuristique de recherche, elle exploite les informations du filtrage utilisé par la PPC et conserve pour chaque variable une mesure de la fréquence à laquelle le domaine de la variable courante est réduit pendant la recherche et initialise l'activité des variables en vérifiant l'espace de recherche. La recherche par activité s'appuie sur une somme décroissante pour oublier progressivement les statistiques les plus anciennes, en utilisant une idée de **Vsids** (*Variable State Independent Decaying Sum*) [120].

Recherche à voisinage large (*Large Neighborhood Search*) : proposé pour la première fois par [144]. La LNS est un algorithme à deux phases qui assouplit partiellement une solution donnée et la répare. Si une solution est entrée, la phase de relaxation construit une solution partielle (ou voisinage) en choisissant un ensemble de variables à réinitialiser sur leur domaine initial, les autres sont affectés à leur valeur dans la solution. Ces deux phases sont répétées jusqu'à la fin de la recherche (optimalité prouvée ou limite atteinte). Bien que la mise en œuvre de LNS soit simple, la principale difficulté réside dans la conception d'un voisinage capable de faire avancer la recherche.

Redémarrage après chaque nouvelle solution (Restarts after each new solution) : c'est une technique différente par la recherche où le redémarrage permet de réduire les effets des premières erreurs dans le processus de recherche. Un redémarrage est effectué lorsque la limite du nombre d'échecs de retour est atteinte (c'est-à-dire à un moment donné dans l'arborescence de recherche), avant de redémarrer la recherche, chaque heuristique stocke ses métriques de classement afin de démarrer la recherche suivante sous forme d'arborescence.

3.3 Contraintes globales

Les techniques de consistance plus strictes ne sont généralement pas utilisées dans la pratique en raison de leur complexité temporelle et spatiale et la plupart des solveurs de contraintes sont construits autour d'une consistance d'arc. La puissance de filtrage γ est améliorée via des contraintes dites contraintes globales [133].

3.4. Principe de parallélisme

Définition 3.1 (Contraintes globales). *Contrainte globale est une contrainte dont la spécification s'applique à un nombre variable de variables. Elle est caractérisée par une spécification, sous la forme d'une formule logique ou d'un algorithme permettant d'établir si la contrainte est satisfaite, et par le type des arguments que l'utilisateur doit fournir lors de l'utilisation de la contrainte.*

Typiquement, une contrainte globale est sémantiquement redondante dans le sens où une même relation peut être exprimée sous forme de la conjonction de plusieurs contraintes plus simples. La plupart des solveurs de contraintes fournissent donc une contrainte globale très différente qui se propage de manière efficace et efficiente. On peut citer parmi les nombreuses contraintes globales : ELEMENT [155], CUMULATIVE [4], ALLDIFFERENT [133], et CARDINALITY [86].

3.4 Principe de parallélisme

Le principal défi du développement du matériel actuel consiste à écrire des programmes en combinant les procédures de recherche et le parallélisme pour résoudre efficacement les gros problèmes et réduire considérablement le temps d'exécution. Un parallélisme basé sur une architecture multithread couvrant toutes les fonctionnalités du solveur de contraintes séquentielles.

3.4.1 Solveurs SAT parallèles

Dans le contexte de la résolution parallèle en PPC du problème SAT, nous distinguons deux modèles :

Solveurs de type Portfolio : les solveurs de type Portfolio lancent, sur la formule originale, différentes heuristiques/stratégies en concurrence [11, 13, 25, 75, 76].

Pendant la résolution, les processus échangent des informations (généralement sous la forme de clauses apprises) afin de s'entraider [11, 12, 25].

Solveur basé sur le paradigme «diviser pour régner» est un modèle collaboratif (coopératif) qui divise incrémentalement l'espace de recherche en sous-espaces, successivement alloués à différents processus séquentiels [12, 78]. En général, à chaque fois qu'un solveur a fini de résoudre son sous-problème (tandis que les autres travaillent encore), une stratégie d'équilibre est réalisée afin de transférer dynamiquement un nou-

veau sous-espace à un processus inactif [37, 38].

Dans cette thèse, nous détaillons plus particulièrement le solveur Choco, que nous avons utilisé dans la partie expérimentale de nos travaux.

3.4.2 Langages PPC

Il existe, un certain nombre de langages PPC qui a été introduit pour la modélisation et la résolution des problèmes contraints, une partie de ceux-ci étant commercialisés comme Sicstus Prolog, OPL ou Comet. D'autres sont plus académiques comme Choco, Zinc ou Gecode.

Langage Choco : Le solveur Choco (CHOCO-Team, 2010) est développé en Java sous forme de bibliothèques open-source. Les bibliothèques de Choco sont assez riches avec la possibilité d'exprimer un grand nombre de contraintes et de stratégies de recherche. La mise au point sous Choco se fait sous le jdb de Java avec une analyse syntaxique du code. La mise au point des programmes Choco a fait l'objet de quelques travaux de recherche. Ces travaux ont comme objectif la définition d'un modèle de trace et d'outils d'observation et d'analyser des résultats basés sur l'explication des échecs [89].

3.4.3 Mesure de performance

L'objectif principal de la conception d'applications parallèles est la performance, c'est-à-dire la réduction du temps nécessaire pour résoudre le problème lorsque les ressources informatiques sont augmentées et la possibilité ou bien la capacité d'augmenter les performances lorsque la complexité ou la taille du problème augmente. Dans notre étude, nous nous sommes appuyés sur des métriques de performance pour les applications parallèles, ce qui signifie que l'évaluation des performances d'une application parallèle est effectuée en comparant le temps d'exécution avec plusieurs unités de traitement au moment de l'exécution avec un seul traitement par rapport au temps d'exécution en utilisant une seule unité de traitement. Il existe certaines métriques de performances, les plus connues sont : l'accélération ou le facteur de gain (*speed-up*), efficacité, redondance, utilisation. Dans notre étude, nous utilisons les deux métriques : le temps d'exécution et le facteur de gain (*speed-up*).

Définition 3.1 (accélération/ facteur de gain). *L'accélération notée $speed-up(P)$ entre deux unités de traitement mesure le rapport entre le temps d'exécution séquen-*

3.4. Principe de parallélisme

tielle et le temps d'exécution parallèle. Dans la mesure où cet algorithme s'exécute en S_1 secondes avec une unité de traitement, et S_p avec p unités de traitement. Nous notons que :

$$\text{speed-up}(P) = \frac{\text{Temps}(S_1)}{\text{Temps}(S_p)} \quad (3.2)$$

- où $\text{Temps}(S_1)$ est le temps d'exécution avec une unité de traitement.
- $\text{Temps}(S_p)$ est le temps d'exécution avec p unités de traitement.

3.4.4 Résolution parallèle de contraintes

Dans cette section, nous discutons la résolution de contraintes parallèles. Les principales approches de la résolution de contraintes en parallèle peuvent être grossièrement divisées en catégories principales suivantes : espace de recherche partagé en mémoire, division de l'espace de recherche, algorithmes de Portfolio, problème de division. La plupart des approches nécessitent la communication (la phase de communication permet de mettre à jour des données distantes ou à redistribuer des données pour améliorer l'équilibre de charge entre les processeurs) et la synchronisation, mais le problème le plus important est l'équilibre de la charge, qui consiste à répartir une quantité de travail à peu près égale entre les tâches, de sorte que tous les processeurs restent occupés tout le temps.

3.4.5 Espace de recherche partagé en mémoire

Ces méthodes sont implémentées en ayant plusieurs cœurs partageant une liste de nœuds ouverts dans l'arborescence de recherche (ce parcours essaie toujours de visiter le nœud le plus proche de la racine qui n'a pas déjà été visité). Les processeurs affamés prennent simplement les nœuds les plus prometteurs de la liste et les développent. La première mise en œuvre reposait sur la procédure recherche à divergence bornée (**DBDFS**, *Discrepancy Bounded Depth First Search*) [19] avec un écart maximal généralement défini à 1.

3.4.6 Division de l'espace de recherche

Stratégies de division de l'espace de recherche explorant le parallélisme fourni par l'espace de recherche sont des approches courantes : lorsqu'un branchement est effectué, différentes branches peuvent être explorées en parallèle. La première simulation d'un algorithme parallèle de *Branch and Bound* (*séparation et évaluation*) était conduite par [129]. L'équilibre de la charge constitue un défi : les branches d'un arbre de recherche sont généralement extrêmement déséquilibrées et nécessitent un temps de communication non négligeable. Dans la littérature, différents travaux traitent le problème de parallélisation de l'algorithme *Branch and Bound*, par exemple dans ([103], ont examiné les anomalies de comportement des algorithmes parallèles de séparation et évaluation utilisant la stratégie de sélection « meilleur d'abord ». Ils ont montré que les anomalies d'accélération ne peuvent pas se produire si les valeurs de tous les nœuds internes à l'arbre du *Branch and Bound* sont différentes de la valeur de la solution optimale. Plusieurs travaux pour éliminer ces anomalies [103, 130]. Dans l'étude Corraera et Ferreira ont présenté un état de l'art des anomalies préjudiciables ou accélératrices selon l'ordre de création des sous-problèmes [44].

3.4.7 Division du problème

Dans cette approche de parallélisation, le problème est divisé en différentes parties à résoudre par chaque processeur. L'inconvénient dans cette approche est qu'il est parfois difficile de résoudre le problème dans la situation centrale, car aucun processeur n'a une vision complète du problème. Généralement pour surmonter les solutions partielles de chaque sous-problème. Des cadres (*Framework*) concernent généralement le problème de satisfaction des contraintes distribuées (**DCSP**, *Distributed Constraint Satisfaction Problem*) associé à la division du problème ont été proposés tels que [36, 160, 167].

3.5 Modèles de parallélisation Portfolio

La résolution de Portfolio est une approche commune pour la résolution parallèle de SAT. Comme il est courant dans SAT en parallèle, les solveurs sont diversifiés en initialisant leurs activités variables de manière aléatoire. De plus, nous nous permettons une certaine communication entre les processus de résolution. Une approche Portfolio

3.5. Modèles de parallélisation Portfolio

consiste à exécuter plusieurs stratégies de recherche sur différents cœurs de calcul. La première stratégie qui répond aux besoins de l'utilisateur, arrête toutes les autres stratégies. Le but de Portfolio est de résoudre tous les problèmes le plus rapidement possible, mais l'inconvénient est qu'on utilise beaucoup de ressources de calcul. Il existe plusieurs modèles de Portfolio :

3.5.1 Le premier modèle Portfolio N To N

(N **Stratégies** \times N **Cœurs**) : Il consiste à exécuter N stratégies de recherche séquentielle sur N cœurs de calcul. L'intérêt de Portfolio N to N est que la performance obtenue est celle de la meilleure stratégie, mais la faiblesse est que le nombre de stratégies est limité par comparaison avec le grand nombre de cœurs de calcul utilisés par les machines parallèles. Ce modèle de Portfolio est largement utilisé dans la parallélisation des solveurs SAT [116, 163] et de PPC [123].

La figure 3.1 présente le principe de portfolio (N Stratégies \times N Cœurs), pour résoudre un problème de contraintes en exécutant en parallèle trois stratégies de recherche séquentielles. Chaque stratégie effectue la recherche indépendamment des autres sur un cœur de calcul. À la fin, si une solution est trouvée par l'une des trois stratégies, elle arrête toutes les autres [114].

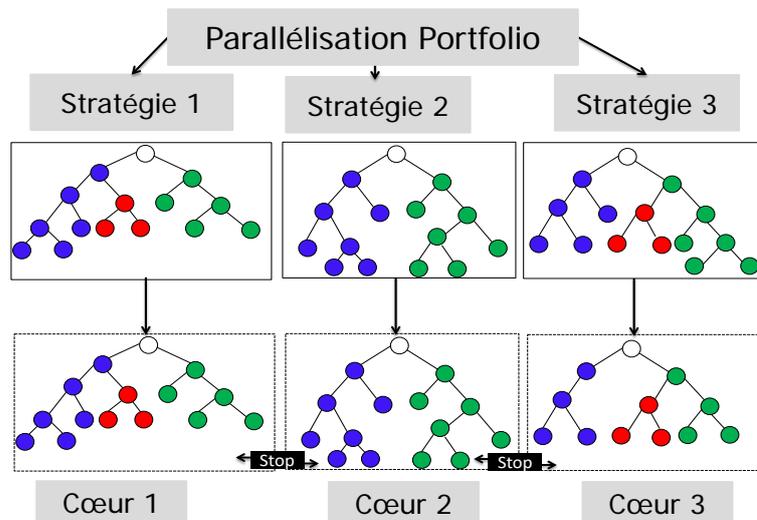


Figure 3.1 Portfolio N Stratégies \times N Cœurs.

3.5.2 Le deuxième modèle Portfolio N To P

N Stratégies \times P Coeurs en utilisant une parallélisation interne pour chaque stratégie de recherche, on peut exécuter N stratégies sur P coeurs ($P \gg N$). La parallélisation interne consiste à partitionner l'arbre de recherche de chaque stratégie en un ensemble de sous-arbres, ensuite affecter ces sous-arbres aux différents coeurs de calcul [115]. La première manière à réaliser ce modèle de Portfolio est de partitionner l'arbre de recherche de chaque stratégie N en P sous-arbres, et ensuite affecter chaque sous-arbre à un coeur de calcul, comme cela est présenté dans la figure 3.2 (pour plus de détail, voir [114]). La deuxième manière, consiste à affecter dynamiquement les P coeurs de calcul à la totalité des stratégies de recherche (N stratégies), en utilisant la technique du vol de travail [84, 134]. Pour réaliser ce modèle de Portfolio, il existe deux méthodes pour affecter les P coeurs de calcul au N stratégies de recherche : affectation statique ou dynamique.

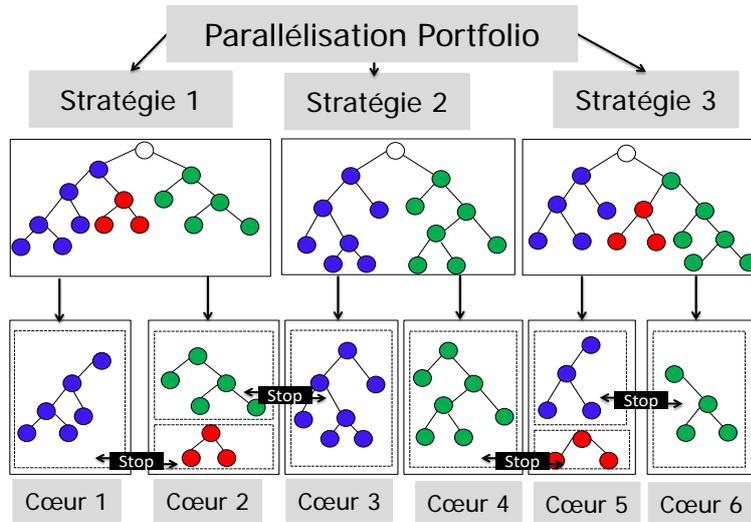


Figure 3.2 Portfolio N Stratégies \times P Coeurs.

Les deux modèles de Portfolio (N To N et N To P) gaspillent beaucoup de ressources de calcul car on ne sait pas décider à priori quelle est la meilleure stratégie, mais pendant la recherche on peut estimer l'avancement respectif des stratégies. Comme toutes les stratégies sont ordonnancées par le même Framework parallèle, donc on peut contrôler l'ordonnancement des N stratégies entre elles et privilégier la stratégie la plus prometteuse, celle qu'on estime avoir l'arbre de recherche le plus petit, et on

3.6. Consistance et propagation parallèles

lui donne plus de cœurs que les autres stratégies. Ce modèle de Portfolio est appelé le *Portfolio adaptatif* [116].

3.6 Consistance et propagation parallèles

3.6.1 Consistance d'Arc parallèle

La consistance parallèle dans PPC signifie que plusieurs contraintes seront évaluées en parallèle. Les contraintes qui contiennent les mêmes variables ont des dépendances de données et leur élagage doit donc être synchronisé. Cependant, étant donné que l'élagage est monotone, l'ordre dans lequel les données sont modifiées n'affecte pas l'exactitude. Cela découle de la propriété que les propagateurs de contraintes doivent être à la fois décroissants et monotones [141]. Il y a un flux constant de travail sur les algorithmes de consistance distribuée. Les auteurs [139] ont introduit plusieurs versions parallèles d'algorithmes de consistance d'arc. Ils supposent que leur machine dispose d'un nombre infini de processeurs dans un environnement de mémoire partagée. Les auteurs [139] utilisent une version parallèle de *Mackworth Revise*, appelée *Previsé*. Dans *Previsé*, tous les contrôles de consistance d'un seul arc sont exécutés simultanément. L'auteur [74] a développé plusieurs algorithmes de consistance d'arc qu'il appelle (*algorithmes de relaxation discrète*) conçu pour fonctionner sur des architectures informatiques spéciales.

3.6.2 La recherche parallèle

La recherche parallèle signifie que nous divisons D_i (D_i est le domaine de X_i) en sous-ensembles et les attribuons à différents processeurs. Chaque branche de l'arbre de recherche commençant par un nœud est indépendante de toutes les autres branches. Par conséquent, il n'y a pas de dépendance de données entre les différentes parties de l'espace de recherche. La consistance parallèle signifie la mise en parallèle des méthodes de renforcement de consistance.

Par exemple, les auteurs [135] ont utilisé une technique en partitionnant C (C étant un ensemble de contraintes primitives ou globales contenant plusieurs des variables de X) en sous-ensembles, chacun étant géré par un processeur différent.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de la PPC et du parallélisme. Tout d'abord, la PPC a été utilisée avec succès pour résoudre de nombreux problèmes NP-complets tels que la coloration et l'ordonnancement de tâches. Formellement, la modélisation utilise généralement un langage déclaratif en posant des contraintes sur les valeurs que peuvent prendre les différentes variables, la résolution est effectuée par un cadre (Framework) de contraintes qui effectuent la consistance et la recherche. En deuxième étape, une solution alternative permettant de résoudre rapidement les instances de grande taille consiste à utiliser les méthodes du parallélisme. Ces méthodes du parallélisme permettent de résoudre rapidement les problèmes de satisfaction de contraintes, réduire le nombre total de nœuds explorés et d'améliorer encore les performances de la PPC. Pour nos calculs parallèles, nous avons utilisé une architecture type Portfolio à mémoire partagée pour trouver la sectorisation équilibrée de l'espace aérien.

Chapitre 4

Sectorisation optimisée équitale de l'espace aérien

Sommaire

3.1	Introduction	43
3.2	Programmation par contraintes	44
3.2.1	Problème combinatoire	44
3.2.2	Principe de filtrage et de consistance locale	46
3.2.3	Stratégies de recherche	47
3.3	Contraintes globales	50
3.4	Principe de parallélisme	51
3.4.1	Solveurs SAT parallèles	51
3.4.2	Langages PPC	52
3.4.3	Mesure de performance	52
3.4.4	Résolution parallèle de contraintes	53
3.4.5	Espace de recherche partagé en mémoire	53
3.4.6	Division de l'espace de recherche	54
3.4.7	Division du problème	54
3.5	Modèles de parallélisation Portfolio	54
3.5.1	Le premier modèle Portfolio N To N	55
3.5.2	Le deuxième modèle Portfolio N To P	56
3.6	Consistance et propagation parallèles	57
3.6.1	Consistance d'Arc parallèle	57
3.6.2	La recherche parallèle	57
3.7	Conclusion	58

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle PPC de Trandac *et al.* [150] utilisé pour résoudre le problème de la sectorisation aérienne. Le problème est formulé sous forme d'un graphe pondéré à la fois aux sommets et aux arêtes, et permet de résoudre le problème de sectorisation en respectant toutes les contraintes. Cette formulation inclut des stratégies de recherche et une heuristique permettant de trouver une bonne solution à différentes instances. De plus, nous introduisons une formulation basée sur la méthode OWA pour améliorer l'équité entre les secteurs tout en minimisant la charge de coordination entre les secteurs adjacents. Nous décrivons aussi une méthode de parallélisme dite Portfolio à mémoire partagée afin d'améliorer les performances des calculs.

4.1 Introduction

Le trafic aérien a augmenté de plus en plus et devrait encore augmenter, à titre d'exemple en Europe dans son ensemble, les prévisions prévoient que le scénario de régulation et de croissance (le plus probable) prévoit 53% plus que l'année 2017, d'ici 2040, pour atteindre 16,2 millions de vols par an (croissance de 1,9% par an) [131]. En conséquence, le nombre d'aéronefs dans chaque secteur de contrôle augmente également, et la charge de travail fréquente est plus souvent surchargeant les capacités du contrôleur, il en résulte des charges de travail déséquilibrées dans les secteurs, exerçant ainsi des retards excessifs sur le trafic aérien dans les aéroports. Le plan de la sectorisation actuel qui est une caractéristique architecturale fondamentale du système de la gestion de la circulation aérienne devrait répondre aux besoins en capacité, à la croissance future et doivent être ajusté de façon plus optimisée au sens de charge de travail des contrôleurs dans chaque secteur de contrôle, ce qui réduit l'efficacité et la sécurité aérienne.

4.2 Contribution de la PPC à la gestion du trafic aérien

La gestion du trafic aérien est structurée en plusieurs filtres fonctionnant à différents horizons temporels (stratégiques, prétactiques et tactiques) qui sont nécessaires pour

4.3. Modèle de sectorisation de l'espace aérien

contrôler le trafic tout en prévenant les surcharges, comme s'est mentionné dans la section 1.6 du chapitre 1.

La PPC est une technique qui est largement utilisée pour résoudre le problème de la gestion du trafic aérien. Dans la littérature disponible sur l'utilisation de la PPC pour la modélisation et la résolution de problèmes ATM, nous trouvons par exemple les questions stratégiques de la conception du réseau de routes (itinéraires plus courts, charge de travail réduite, etc.) [15, 17, 54]; planification d'urgence suite à une perturbation du système CFMU [27, 28], les questions tactiques, à savoir la conception du schéma d'ouverture du secteur [33, 49, 50, 68, 70, 90]; gestion de la charge de travail des contrôleurs aériens [16, 59, 60, 80, 81]; attribution des créneaux horaires [26, 46, 88]; le réacheminement, qui est considéré comme faisant partie de la gestion des flux pré tactiques [14, 20], les questions opérationnelles sont la gestion des départs et allocation de piste [106], gestion des arrivées [10] et résolution de conflit en temps réel avec des manœuvres horizontales, verticales et rapides pour automatiser l'ATC [56] basé sur des métaheuristiques, recherche opérationnelle [156] ou systèmes experts [7]. Finalement, les travaux connexes liés à la sectorisation de l'espace aérien en PPC sont décrits dans la section 2.3.4 du chapitre 2. Le lecteur peut se référer à [6] pour plus de détails.

4.3 Modèle de sectorisation de l'espace aérien

4.3.1 Modélisation de l'espace aérien et partitionnement de graphes

Comme nous avons mentionné dans le chapitre 2, section 2.3. L'espace aérien est représenté par des réseaux des routes aériennes reliant un aéroport de départ et un aéroport de destination tout en passant par les points de cheminements. Le trafic aérien ou bien les vols passant à travers ces routes et au-dessus de ces aéroports constituent la charge de travail des contrôleurs. Le problème de la sectorisation consiste à partitionner de manière optimale (bien équilibrée du point de vue de la charge de travail des contrôleurs) l'espace aérien en secteurs de contrôleur en tenant compte de la structure de routes existantes. La problématique consiste à équilibrer au maximum les charges entre les secteurs.

Notre modèle repose sur le modèle de PPC de [150]. Le problème de sectorisation de l'espace aérien (PSA) peut se formuler comme un problème de partitionnement d'un ensemble de nœuds et d'arêtes. Le flux de trafic aérien peut-être modélisé par un graphe $G = (S, U)$ où :

- S est un ensemble fini de sommets (aéroports, balises, points de cheminement et points de comptes rendus), soit w_i le poids de s_i , associé au sommet i .
- U est un ensemble d'arêtes non ordonnées de sommets $(s_i, s_j) \in S$ et w_{ij} étant le poids associé à l'arête $e = (u_i, u_j)$. Soit w_{ij} le poids de l'arête (s_i, s_j) , qui est la charge de travail à cette arête.

Définition 4.1 (Contrainte de triangulation). *Étant donné un graphe planaire $G = (S, U)$, une contrainte de triangulation d'un graphe G , dénotée par $CT(S)$, est une triangulation $T(S)$ telle que toutes les arêtes de U sont également des arêtes de $CT(S)$. La figure 4.1 donne un exemple de contrainte de triangulation [34].*

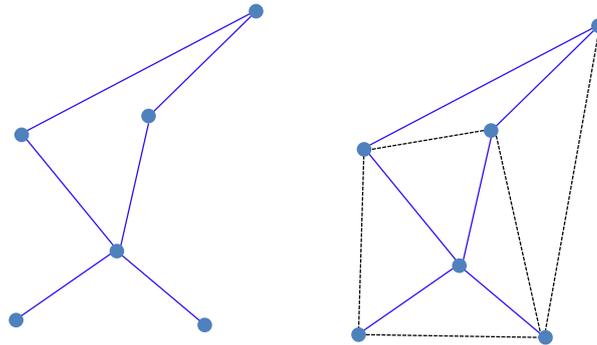


Figure 4.1 Exemple d'une contrainte de triangulation (à droite) d'un graphe donné (à gauche).

Le problème de la sectorisation optimisée de l'espace aérien optimisé (EQASP) consiste à partitionner les sommets S en k sous-ensembles équilibrés (secteurs) (S_1, \dots, S_k) . Nous adoptons le modèle de PPC de [150] qui prend en compte les contraintes géométriques liées à la sectorisation de l'espace aérien (voir la section 1.4.2 du chapitre 1, page 15).

4.3.2 Variables

Nous introduisons n variables x_i , qui prennent leurs valeurs dans $1, \dots, k$, $x_i = j$ signifie que le sommet s_i appartient à la partition S_j . Pour faciliter la définition du

4.3. Modèle de sectorisation de l'espace aérien

modèle, nous introduisons également un ensemble de variables auxiliaires :

$$\begin{cases} n \times n \text{ variables } c_{ij} \in \{0, 1\} & \text{où } c_{ij} = 0 \iff x_i = x_j \\ n \text{ variables } x_i \in \{1, \dots, k\} \\ n \times k \text{ variables } y_{ij} \in \{0, 1\} & \text{où } y_{ij} = 1 \iff x_i = j \end{cases} \quad (4.1)$$

Il en résulte que $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$:

$$\sum_{j=1, \dots, k} y_{ij} = 1 \quad (4.2)$$

Exemple 4.1. Soit un plan de vol F^i qui est donné par une suite de sommets $S = (s_1^i, \dots, s_l^i)$ qui signifie que chaque sommet s doit être affecté à une partition S (s_1^i, \dots, s_l^i) représentent les aéroports ou les points de croisements des routes principales du graphe G dont les variables sont $x_1^i, x_2^i, \dots, x_l^i$. Les routes aériennes $E = (e_1^i, \dots, e_{l-1}^i)$ sont des arêtes reliant ces aéroports où $e_j^i = (s_j^i \rightarrow s_{j+1}^i)$. L'espace aérien est divisé en ($k = 5$) secteurs, la figure 4.2 ci dessous illustre un plan de vol donné par le schéma 4.3 :

$$F^i \equiv \begin{cases} s_1^1 \rightarrow s_2^1 \rightarrow s_5^1 \rightarrow s_8^1 \rightarrow s_9^1 \\ s_4^2 \rightarrow s_3^2 \rightarrow s_5^2 \rightarrow s_6^2 \\ s_9^3 \rightarrow s_8^3 \rightarrow s_5^3 \\ s_7^4 \rightarrow s_8^4 \rightarrow s_5^4 \rightarrow s_3^4 \rightarrow s_4^4 \end{cases} \quad (4.3)$$

Dans cet exemple, l'espace aérien est représenté par le graphe $G = (S, E)$, où $|S| = n$ avec $n = 9$, $|E| = m$, avec $m = 8$. Le problème de sectorisation de cet espace en k secteurs peut être modélisé comme un problème de satisfaction de contraintes en introduisant n variables x_i dont le domaine est $D(x_i) = [1, k]$, avec $k = 5$. La variable x_i prend la valeur j si et seulement si le sommet s_i est dans le sous-ensemble (secteur) S_j .

La variable c_{ij} correspond à l'arête (s_i, s_j) et prend la valeur 0 si les deux extrémités de l'arête sont dans le même secteur ($x_i = x_j$), sinon elle vaut 1, à partir de notre exemple, on peut déduire que nous avons 81 variables c_{ij} ($n \times n = 9^2$).

Pour chaque variable x_i , on introduit k variables y_{i1}, \dots, y_{ik} et seule la variable y_{ij} prend la valeur 1 si et seulement si $x_i = j$. Aussi on peut déduire que nous avons (45) variables y_{ij}

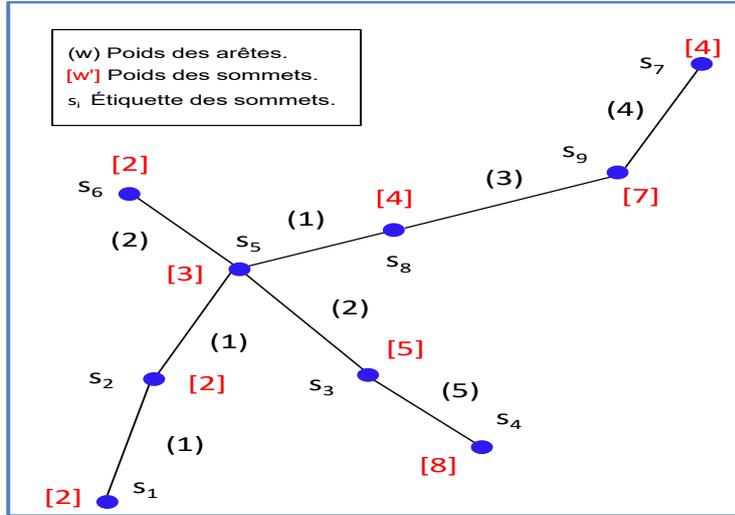


Figure 4.2 Exemple d'un extrait d'un plan de vol illustrant des sommets et des routes aériennes dans un espace aérien.

4.3.3 Contraintes

Nous énumérons brièvement les contraintes qui modélisent les exigences de sectorisation de l'espace aérien formulées par [150] donné à la section 1.4.2 du chapitre 1 :

- **Contrainte de temps de passage minimum** : L'aéronef doit rester dans chaque secteur franchi au moins une durée de temps donné, qui est reformulée en fonction d'une distance minimale l_{min1} (voir figure 1.3).

$$\forall i, \forall a < b < c, l(s_a^i, s_c^i) < l_{min1} \implies (x_a^i = x_b^i) \vee (x_b^i = x_c^i) \quad (4.4)$$

où pour tout vol i , tout triplet a, b, c si la distance entre a et c est inférieure à l_{min1} , les sommets ne peuvent pas être dans trois secteurs différents.

Exemple 4.2. Soit un plan de vol F^i qui est donné par une suite de sommets $S = (s_1^i, \dots, s_l^i)$ représentent les aéroports ou les points de croisements des routes principales du graphe G dont les variables sont $x_1^i, x_2^i, \dots, x_l^i$. Prenons par exemple le plan de vol suivants :

$$F^1 = s_1^1 \rightarrow s_2^1 \rightarrow s_5^1.$$

Pour vérifier que cette contrainte est respectée, on calcule la longueur totale pour chaque triplet (a, b, c) :

4.3. Modèle de sectorisation de l'espace aérien

$\forall i, \sum_{p=a}^c l(s_p^i)$ où $\sum_{p=a}^c l(s_p^i) = l(s_a^i, s_b^i) + l(s_b^i, s_c^i)$. Si la longueur totale est inférieure à l_{min1} , le triplet doit être dans le même secteur.

À titre d'illustration, on suppose que nous voulons sectoriser F^1 en $k = 3$, et nous avons les distances géodésiques suivantes en (unité de distance) :

$$- l(s_1^1, s_2^1) = 3, l(s_2^1, s_5^1) = 4.5.$$

On suppose que $L_{min1} = 8$, alors :

$$- l(s_1^1, s_2^1) + l(s_2^1, s_5^1) < L_{min1} \text{ car } 7.5 < 8; \rightarrow \text{les trois sommets } (s_1^1, s_2^1, s_5^1) \text{ doivent être dans le même secteur;}$$

- **Contrainte de distance minimum** : La distance entre une frontière de secteur et un nœud du réseau doit être supérieure à une valeur donnée l_{min2} . Ceci peut être défini comme imposant que la distance entre deux nœuds quelconques soit supérieure à $2 \times l_{min2}$ (voir figure 1.4).

$$\forall i, \forall s_a^i, s_b^i, l(s_a^i, s_b^i) \leq 2 \times l_{min2} \implies x_a^i = x_b^i \quad (4.5)$$

Exemple 4.3. Soit un plan de vol F^i qui est donné par une suite de sommets $S = (s_1^i, \dots, s_l^i)$ représentent les aéroports ou les points de croisements des routes principales du graphe G dont les variables sont $x_1^i, x_2^i, \dots, x_l^i$. Prenons par exemple le plan de vol suivants :

$$F^3 = s_4^3 \rightarrow s_3^3 \rightarrow s_5^3 \rightarrow s_6^3.$$

La frontière du secteur doit être supérieure ou égale à une distance minimum L_{min2} donnée, pour satisfaire cette contrainte, toute arête (s_i^i, s_j^i) ayant une longueur $l(s_i^i, s_j^i)$ inférieure ou égale à $2 \times L_{min2}$ doit avoir ses deux extrémités dans le même secteur. Autrement dit, si la moitié de la longueur d'une arête est inférieure à L_{min2} alors la distance entre une frontière de secteur et les noeuds i et/ou j est nécessairement inférieure à L_{min2} . Par conséquent, les noeuds i et j doivent appartenir au même secteur. Nous prenons par exemple le plan de vol F^3 , alors on donne les distances géodésiques (en unité de distance) les couples (s_i^3, s_j^3) suivants :

$$- l(s_4^3, s_3^3) = 2; l(s_3^3, s_5^3) = 4.75; l(s_5^3, s_6^3) = 5.1.$$

Chapitre 4. Sectorisation optimisée équitable de l'espace aérien

- On suppose que $L_{min2} = 1.5$, il est facile de remarquer que le couple $l(s_4^3, s_3^3) < 2 \times L_{min2}$, ce qui signifie que les sommets (s_4^3, s_3^3) doivent être dans le même secteur.
- **Convexité** : Pendant un vol, un avion ne peut pas entrer deux fois dans le même secteur.

$$\forall F^i, a, b, c, (a < b < c) \wedge x_a^i = x_c^i \implies x_a^i = x_b^i \quad (4.6)$$

où F^i est un plan de vol et a, b, c sont trois sites. Cependant, si nous considérons tous les plans et tous les triplets $a < b < c$, le nombre de contraintes générées par 4.6 peut être important (voir figure 1.5). Pour éviter ces nombreuses contraintes, nous utilisons une contrainte globale (voir algorithme 1). L'algorithme, présenté ci-dessous, est défini [151] comme suit :

Algorithme 1 : Procedure ConvexConstraintPropag (C, idx).

Entrées : variables de décision représentant les sites $i \in 1..n$ d'un plan de vol

idx : indice d'une variable (site) instanciée

Sorties : les variables i filtrées

pour toutes les variables i avant idx en C **faire**

si $val(i) \neq val(idx)$ **alors**

| Enlever $val(i)$ des domaines de toutes variables après idx en C ;

sinon

| Instancier à $val(idx)$ toutes les variables entre i et idx ;

fin

fin

pour toutes les variables j après idx en C **faire**

si $val(j) \neq val(idx)$ **alors**

| Enlever $val(idx)$ des domaines de toutes variables après j en C ;

sinon

| Instancier à $val(idx)$ toutes les variables entre idx et j ;

fin

fin

retourner i

$val(i)$ représente le secteur du site i . Donc, si le secteur du site i est différent du secteur du site idx alors toutes les variables (sites) ne peuvent pas avoir la valeur du site i (on ne retourne pas à un site déjà visité). Sinon, si le secteur du site i est égale au secteur du site idx alors tous les points intermediaires doivent avoir la même valeur (secteur).

4.3. Modèle de sectorisation de l'espace aérien

Exemple 4.4. Soit un plan de vol F^i qui est donné par une suite de sommets $S = (s_1^i, \dots, s_l^i)$ représentent les aéroports ou les points de croisements des routes principales du graphe G dont les variables sont $x_1^i, x_2^i, \dots, x_l^i$. Prenons par exemple le plan de vol suivants :

$$F^4 = s_7^4 \rightarrow s_9^4 \rightarrow s_8^4 \rightarrow s_5^4 \rightarrow s_6^4.$$

Supposons que l'on souhaite sectoriser l'espace aérien donné par la figure 4.2 et le schéma 4.3. Dans le cas où la variable x_8^4 est instanciée à la valeur $(j = 2)$, l'algorithme va chercher la première variable x_7^4 qui est avant x_8^4 et qui est instanciée à la même valeur $(j = 2)$ pour déduire que toute variable x_c^4 entre x_8^4 et x_7^4 doit être aussi instanciée à $j = 2$. Ce n'est pas le cas et que x_7^4 est instanciée à la valeur $d = 4$ qui n'est pas dans $D(x_8^4)$, c'est-à-dire que l'avion a changé de secteur, donc qu'il ne reviendra plus, on peut enlever la valeur $d = 4$ dans les domaines de toute variable : $(x_9^4, x_8^4, x_5^4, x_6^4)$ qui est après x_7^4 . Ensuite, on applique le même principe de déduction pour les variables après x_8^4 .

- **Contrainte de connectivité** : Cette contrainte garantit que les secteurs doivent être géométriquement connectés (et ne sont pas fragmentés). Comme mentionné ci-dessus dans la figure 4.1, étant donné un espace aérien représenté par $G = (S, U)$ et une triangulation contrainte $CT(S)$ par rapport à G , l'espace aérien sera divisé en un certain nombre de sous-ensembles S_i et la contrainte de connectivité tient si tous les sous-graphes S_i de $CT(S)$ sont connectés. Par exemple, la solution de la figure 4.3 correspond à une solution non acceptable. Formellement, la contrainte de connectivité $Connect(G, x)$ est définie comme suit :

$$Connect(G, x) \iff \forall j = 1, \dots, k, \text{ vertices } \{s_i \mid s_i = j\} \text{ are connected.} \quad (4.7)$$

Exemple 4.5. Soit un plan de vol F^i qui est donné par une suite de sommets $S = (s_1^i, \dots, s_l^i)$ représentent les aéroports ou les points de croisements des routes principales du graphe G dont les variables sont $x_1^i, x_2^i, \dots, x_l^i$. Nous rappelons que notre modèle PPC de sectorisation, nous introduisons pour chaque sommet s_i une variable x_i dont le domaine est $D(x_i) = [1, k]$, $x_i = j$ signifiant que le sommet s_i est dans le secteur j . Prenons la figure 4.2 ci dessus qui illustre le plan de vol donné par le schéma 4.3. On

Chapitre 4. Sectorisation optimisée équitable de l'espace aérien

cherche l'existence de la variable x_i instanciée à j , autrement dit ($j \in D(x_i)$), alors l'ensemble des sommets qui peuvent être dans le secteur j . En supposant qu'après le partitionnement en $k = 5$ secteurs, l'algorithme donne les résultats suivants :

$$- S_1 = \{s_1, s_5\}; S_2 = \{s_2, s_8, s_9\}; S_3 = \{s_3, s_4\}; S_4 = \{s_5, s_6\}; S_5 = \{s_7, s_9\}.$$

Le sous-graphe du graphe $CT(S)$ correspondant à S_j peut être décomposé en plusieurs composantes connexes, maintenant on cherche la connexité des sommets dans le $CT(S)$:

$$- S_1 = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_6\}, S_2 = \{s_1, s_2, s_3, s_5, s_6\}, S_3 = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_8\}, S_4 = \{s_4, s_3, s_1, s_9\};$$

$$- S_5 = \{s_2, s_5, s_3, s_8, s_6\}, S_6 = \{s_6, s_9, s_7, s_8, s_5, s_2, s_1\}, S_7 = \{s_6, s_7, s_9\}, \dots, S_j = \{s_i, s_j, s_k, \dots\}.$$

à partir de la figure 4.3, on peut remarquer que le sommet s_1 dont la variable x_1 est instanciée à la valeur $j = 1$, ainsi que le sommet s_5 dont la variable x_5 est instanciée à la même valeur $j = 1$, et les leurs sous graphes $CT(S)$ ne sont pas connexes, pour éviter cette situation (fragmentation du secteur), la contrainte globale de connectivité intervient pour enlever la valeur $j = 1$ de tous les domaines des variables dans les autres composantes.

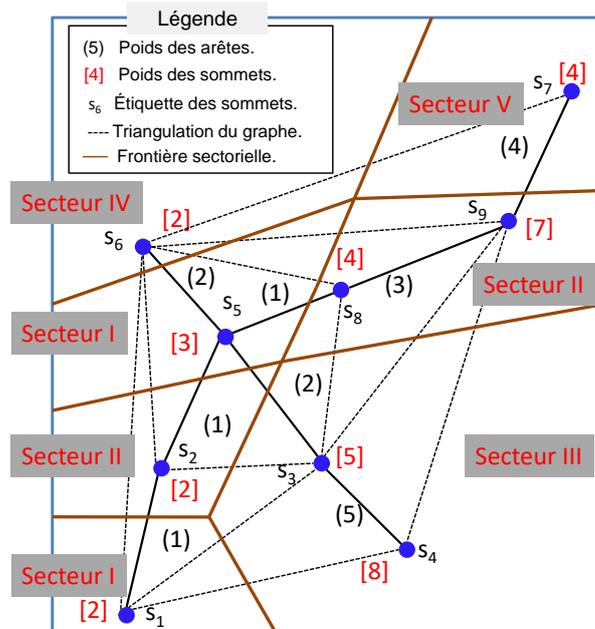


Figure 4.3 Exemple d'application d'une sectorisation fragmentée (non acceptable) sur un réseau de trafic aérien.

4.3. Modèle de sectorisation de l'espace aérien

- **Contrainte d'équilibre** Deux types de pondérations sont utilisés pour évaluer la charge de travail des contrôleurs aérien dans un secteur :

- ω_i , désigne le poids du sommet i , qui correspond à la partie de charge de monitoring et la charge de résolution de conflits potentiels.
- ω_{ij} désigne le poids de l'arête $e = (s_i, s_j)$, qui correspond à la charge de coordination.

Pour obtenir une distribution équilibrée entre les secteurs de contrôle, une contrainte d'équilibre est utilisée dans [150] par rapport à un taux de tolérance : $0 \leq \delta < 1$:

$$\forall j \in [1, \dots, k]; W_{min} \leq \sum_{i=1}^n y_{ij} \omega_i \leq W_{max} \quad (4.8)$$

où la somme des poids de chaque sous-ensemble (secteur) est délimitée par :

$$- W_{min} = (1 - \delta) \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \omega_i$$

$$- W_{max} = (1 + \delta) \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \omega_i$$

La fonction objectif utilisée par ce modèle de PPC tend à minimiser la charge de travail de coordination entre des paires de secteurs. Elle est donnée par :

$$\min \sum c_{ij} \omega_{ij} \quad \forall i, j, (s_i, s_j) \in S \quad (4.9)$$

Exemple 4.6. Soit un plan de vol F^i qui est donné par une suite de sommets $S = (s_1^i, \dots, s_l^i)$ représentent les aéroports ou les points de croisements des routes principales du graphe G dont les variables sont $x_1^i, x_2^i, \dots, x_l^i$. Étant donné δ , à titre exemple, $\delta = 0.05$, $k = 3$ on définit :

1. un poids minimum qui est égal à $W_{min} = (1 - 0.05) * (1/3) * (2 + 2 + 3 + 2 + 4 + 5 + 8 + 7 + 4) = 11.71$;

2. un poids maximum qui est égal à $W_{max} = (1 + 0.05) * (1/3) * (2 + 2 + 3 + 2 + 4 + 5 + 8 + 7 + 4) = 12.95$;

La contrainte d'équilibrage qui est exprimée dans [150] est calculée comme suit :

1. $W_{min} \leq ((y_{11} \times \omega_1 + y_{12} \times \omega_1 + y_{13} \times \omega_1) + (y_{21} \times \omega_2 + y_{22} \times \omega_2 + y_{23} \times \omega_2) + (y_{51} \times \omega_5 + y_{52} \times \omega_5 + y_{53} \times \omega_5) + (y_{81} \times \omega_8 + y_{82} \times \omega_8 + y_{83} \times \omega_8) + (y_{61} \times \omega_6 + y_{62} \times \omega_6 + y_{63} \times \omega_6)) \leq W_{max}$

$$2. W_{min} \leq ((y_{31} \times \omega_3 + y_{32} \times \omega_3 + y_{33} \times \omega_3) + (y_{41} \times \omega_4 + y_{42} \times \omega_4 + y_{43} \times \omega_4)) \leq W_{max}$$

$$3. W_{min} \leq ((y_{71} \times \omega_7 + y_{72} \times \omega_7 + y_{73} \times \omega_7) + (y_{91} \times \omega_9 + y_{92} \times \omega_9 + y_{93} \times \omega_9)) \leq W_{max}$$

Nous rapellons de la variable auxiliaire y_{ij} définie dans l'équation 4.1

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ssi } s_i \in S_j \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Après le calcul de la sectorisation proposée, le résultat de la charge de travail dans chaque secteur est : Secteur-1 = 13, Secteur-2 = 13, Secteur-3 = 11. Mais, il est noté qu'il est très difficile de fixer les bornes (W_{min} , W_{max}) lorsqu'il s'agit d'une sectorisation plus grande, par exemple $k = 5$.

Maintenant on calcule le coût de coupe, où le terme c_{ij} représente une arête entre deux nœuds du graphe G . Il prend la valeur 1 ssi les nœuds $(s_i, s_j) \notin S_j$, sinon 0. En respectant le découpage précédent (celui donné pour trouver l'équilibre), le terme 4.9 peut être réécrit (en respectant une coupe minimum) comme suit : $(c_{89} \times \omega_{89} + c_{35} \times \omega_{35})$, la valeur de coupe est égale à 5.

Il est facile de constater que la qualité de la sectorisation de l'espace aérien équilibré est fortement liée au choix des bons paramètres des contraintes d'équilibre (4.8).

Malheureusement, la définition de ces paramètres est loin d'être évidente dans la pratique. Pour améliorer ce modèle PPC, nous proposons un moyen de tirer parti d'une formulation efficace du critère d'équilibre en utilisant de nouvelles contraintes et une nouvelle fonction objectif, qui sont établis avec propriétés théoriques solides (voir la section 4.4).

4.4 Optimisation multiagent équitable

Soit $N = \{1, \dots, n\}$ un ensemble de n agents. Une solution d'un problème d'optimisation multiagents est caractérisée par un vecteur de coût $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}_+^n$, où x_i représente le coût (ou un degré d'insatisfaction) du $i^{\text{ème}}$ agent. Les vecteurs

4.4. Optimisation multiagent équitale

de coûts sont couramment comparés à l'aide de la relation de dominance de Pareto (P-dominance).

La **P-dominance faible** \leq_P entre deux vecteurs de coût x, x' est défini comme suit :

$$x \leq_P x' \Leftrightarrow [\forall i \in N, x_i \leq x'_i]. \quad (4.10)$$

La **P-dominance stricte** $<_P$ entre x et x' est donnée par :

$$x <_P x' \iff [x \leq_P x' \wedge \text{not}(x' \leq_P x)] \quad (4.11)$$

Une solution x^* est Pareto-optimale (c-à-d. efficace) si et seulement s'il n'y a pas de solution x qui domine x^* . La P-dominance peut être formulée comme suit : $\min\{(x_1, \dots, x_n) : x \in Q\}$ où Q est l'ensemble des solutions réalisables. La P-dominance peut conduire à un grand nombre de solutions incomparables.

Pour limiter la P-dominance, nous devrions spécialiser une relation de dominance de manière à favoriser des vecteurs de coûts équitables. L'intuition principale derrière le critère d'équité fait référence à l'idée de choisir des solutions qui partagent équitablement et minimisent l'insatisfaction entre agents [142]. Formellement, une relation de dominance équitale \leq_{\parallel} devrait remplir trois propriétés principales [72, 111] :

1. **Symétrie.** Soit $x \in \mathbb{R}_+^n$ pour toute permutation σ de $[1, \dots, n]$, $(x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(n)}) \sim (x_{(1)}, \dots, x_{(n)})$, où \sim est la relation d'indifférence définie comme la partie symétrique de \leq . On note $\langle x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(n)} \rangle$ le vecteur $\langle x_{(1)}, \dots, x_{(n)} \rangle$ obtenu par réarrangement des éléments du vecteur par ordre non croissant (i.e., $x_{\sigma(1)} \geq \dots \geq x_{\sigma(i)} \geq \dots \geq x_{\sigma(n)}$).
2. **P-Monotonie.** Un vecteur qui améliore la valeur de l'un des ses éléments est préférable, à condition que les valeurs des autres éléments ne sont pas détériorées. Cet axiome correspond en réalité à la propriété d'efficacité. Il garantit que seules les solutions efficaces seront choisies comme solutions équitables. L'axiome peut être exprimé comme suit :

$$\forall x, y \in \mathbb{R}_+^n, x \leq_P y \implies x \leq_{\parallel} y \text{ et } x <_P y \implies x <_{\parallel} y.$$

Par exemple, soient w, y deux vecteurs : $w = \langle 8, 10, 9, 10 \rangle$, $y = \langle 9, 10, 9, 10 \rangle$, w domine y au sens P-monotonie, notée $w < y$ car $\langle 8, 10, 9, 10 \rangle <_P \langle 9, 10, 9, 10 \rangle$.

3. **Principe de transfert** (ou le transfert de Pigou-Dalton) qui implique que la mesure de l'inégalité soit sensible aux transferts qui s'opèrent dans la distribu-

tion.

L'équité exige des résultats équitables, ce qui oblige le modèle de préférence à respecter le principe de transfert (Pigou-Dalton). Le principe des transferts stipule qu'un transfert d'une petite quantité d'un résultat à un autre résultat relativement moins favorable aboutit à un vecteur de résultat plus préféré. Cet axiome peut être exprimé comme une propriété de la relation de préférence :

Soit $x \in \mathbb{R}_+^n$ tel que $x_i < x_j$ pour certains indices $i, j \in N$ et pour tout ε tel que $0 < \varepsilon < x_i - x_j$, $x - \varepsilon e^i + \varepsilon e^j \leq_{\parallel} x$ où e^i (resp. e^j) est le vecteur dont la $i^{\text{ème}}$ (resp. $j^{\text{ème}}$) composante est à 1, et les autres sont nulles. Intuitivement, tout rapprochement entre deux composantes d'une solution, mène vers une solution plus équitable.

Cet axiome exprime l'idée centrale de l'équité. En fait, toute légère amélioration de x_j au détriment de x_i , tout en préservant la moyenne des coûts, produirait une meilleure répartition des coûts entre les agents et réduirait par conséquent l'inégalité de la répartition des coûts entre eux (voir [142]). Par exemple, si nous considérons deux vecteurs de coûts $x = (11, 10, 7, 10)$ et $y = (9, 10, 9, 10)$, alors le principe de transfert implique que $y \leq_{\parallel} x$, car il existe un transfert de taille $\varepsilon = 2$ (c'est-à-dire $(x_1 - x_3)/2$), ce qui permet d'avoir y à partir de x .

Il est important de noter que le principe de transfert est impraticable lorsque les vecteurs ont des coûts moyens différents. Il est intéressant de noter que la possibilité de discriminer est améliorée en combinant la P-monotonie et le principe de transfert, ce qui conduit à ce que l'on appelle la dominance généralisée de Lorenz définie dans [35] (pour plus de détails, voir, [72, 111]) :

Définition 4.1 (Opérateur et dominance de Lorenz). *Pour tout $x \in \mathbb{R}_+^n$, le vecteur généralisé de Lorenz associé au vecteur des coûts x est le vecteur :*

$$L(x) = (x_{(1)}, x_{(1)} + x_{(2)}, \dots, x_{(1)} + x_{(2)} + \dots + x_{(n)}) \quad (4.12)$$

où $x_{(1)} \geq x_{(2)} \geq \dots \geq x_{(n)}$ représente les composantes de x triées par ordre décroissant. La $j^{\text{ème}}$ composante de $(L(x))$ est $L_j(x) = \sum_{i=1}^j x_{(i)}$.

4.4. Optimisation multiagent équitable

Par exemple, soit $x = \langle 2, 8, 10, 7, 9, 15, 13, 14 \rangle$, pour calculer le vecteur de Lorenz associé à x qui est défini par des sommes cumulées du tri en ordre non croissant : $L(x) = \langle 15, (15 + 14) + (15 + 14 + 13) + (15 + 14 + 13 + 10) + (15 + 14 + 13 + 10 + 9) + (15 + 14 + 13 + 10 + 9 + 8) + (15 + 14 + 13 + 10 + 9 + 8 + 7) + (15 + 14 + 13 + 10 + 9 + 8 + 7 + 2) \rangle$, ce qui donne un vecteur de Lorenz $L(x) = \langle 15, 29, 42, 52, 61, 69, 76, 78 \rangle$.

La relation de dominance de Lorenz (L-dominance) sur \mathbb{R}_+^n est définie par :

$$\forall x, y \in \mathbb{R}_+^n, x \leq_L y \iff L(x) \leq_P L(y) \quad (4.13)$$

Dans un ensemble X , on dit que l'élément x est dominé selon L quand $y <_L x$ pour un certain y dans X , et L -non dominé quand il n'y a pas de y dans X tel que $y <_L x$.

La notion de domination de Lorenz a été introduite à l'origine pour comparer des vecteurs ayant le même coût moyen et son lien avec le principe de transfert a été établi sur le théorème de Hardy, LittleWood et Polya [145]. La version généralisée de Lorenz permet de comparer aussi les vecteurs qui n'ont pas la même moyenne. Le théorème suivant annonce cette propriété :

Proposition 4.1. *Pour toute paire de vecteurs $x, y \in \mathbb{R}_+^n$; si $x <_P y$, ou que x est obtenu de y en utilisant le principe de transfert, alors $x <_L y$. L'inverse est aussi vrai.*

Exemple 4.1. *Par exemple, prenons les deux vecteurs x, y de l'exemple mentionné ci-dessus (principe de transfert) où $x = \langle 11, 10, 7, 10 \rangle$ et $y = \langle 9, 10, 9, 10 \rangle$ Pour comparer $w = \langle 8, 10, 9, 10 \rangle$ et $z = \langle 11, 10, 7, 12 \rangle$, on remarque que :*

- $y < x$ par le principe de transfert (voir l'exemple ci dessus).
- $w < y$ par P -monotonie car $\langle 8, 10, 9, 10 \rangle <_P \langle 9, 10, 9, 10 \rangle$
- $x < z$ par P -monotonie car $\langle 11, 10, 7, 10 \rangle <_P \langle 11, 10, 7, 12 \rangle$

En conséquence, à partir de la relation de dominance généralisée de Lorenz $L(w) = \langle 10, 20, 29, 37 \rangle <_P L(z) = \langle 12, 23, 33, 40 \rangle$ qui prouve directement l'existence d'une suite d'améliorations de Pareto et / ou de transferts admissibles passant de z à w . Ce théorème établit la L -dominance comme la relation transitive minimale (vis-à-vis de l'inclusion des ensembles) satisfaisant simultanément la monotonie, la symétrie et le principe de transfert. Par conséquent, le sous-ensemble d'éléments L -non dominés décrit les meilleurs candidats à l'optimum dans les problèmes d'optimisation.

En raison de la P-monotonie, l'ensemble des éléments non dominés par Lorenz est inclus dans l'ensemble des vecteurs optimaux de Pareto.

Un raffinement de la dominance de Lorenz peut être obtenu en itérant sur la transformation $L(\cdot)$ pour obtenir un opérateur d'ordre supérieur. Si x et y ne peuvent être comparés en termes de P -dominance, on peut comparer $L(x)$ et $L(y)$. Si aucune dominance de Pareto n'est établie, cette indétermination peut être résolue, en faisant appel à $L^2(x) = L(L(x))$ et $L^2(y) = L(L(y))$. Ce processus peut être répété. On obtient ainsi l'opérateur de Lorenz d'ordre k , noté :

$$L^k(x) = \begin{cases} x & \text{si } k = 0 \\ L(L^{k-1}(x)) & \text{si } k > 1 \end{cases} \quad (4.14)$$

Et l'opérateur de comparaison

$$\forall x, y \in \mathbb{R}_+^n, x \leq_L^k y \iff L^k(x) \leq_P L^k(y) \quad (4.15)$$

Exemple 4.2. *Par exemple, considérons un problème de 4 agents avec 3 vecteurs faisables de Pareto optimal $x = \langle 3, 2, 3, 2 \rangle$, $y = \langle 3, 3, 3, 0 \rangle$ et $z = \langle 1, 3, 2, 4 \rangle$. On a $L(x) = \langle 3, 6, 8, 10 \rangle$, $L(y) = \langle 3, 6, 9, 9 \rangle$ et $L(z) = \langle 4, 7, 9, 10 \rangle$. Par conséquent, nous obtenons $x <_L^\infty z$ et $y <_L^\infty z$. Il nous faut un ordre plus pour comparer x et y . Nous obtenons $L^2(x) = \langle 10, 18, 24, 27 \rangle$ et $L^2(y) = \langle 9, 18, 24, 27 \rangle$, donc $y <_L^\infty x$.*

Il est important de noter que la formulation de la dominance de Lorenz d'ordre infini [72] suppose que les vecteurs à comparer sont des **vecteurs de coûts**. Il existe une manière simple d'adapter l'approche présentée ici pour comparer deux vecteurs d'utilités (u_1, \dots, u_n) et (v_1, \dots, v_n) selon la dominance infinie de Lorenz. Elle consiste à vérifier si $(M - u_1, \dots, M - u_n) <_L^\infty (M - v_1, \dots, M - v_n)$ pour une valeur M arbitraire plus grande que tous les u_i et v_i , $i = 1, \dots, n$. Cette adaptation est conforme à la définition de $<_L^\infty$ pour des vecteurs de coûts et ne dépend pas du choix de M .

Malheureusement, dans les problèmes d'optimisation combinatoire multi-objectifs, l'ensemble des solutions non dominées par L peut être énorme (voir [121]). Ce problème se produit également dans les problèmes d'affectation multi-agents, il existe une famille d'instances dans lesquelles le nombre de vecteurs de coûts L -non dénombrés croît de manière exponentielle avec la taille du problème. C'est la raison pour laquelle nous introduisons des concepts de dominance plus discriminants qui étendent la domination

4.4. Optimisation multiagent équitable

de L aux structures de préférences les plus riches. Le moyen le plus courant est de recourir à une fonction Schur-convexe (également connue sous le nom de fonction de préservation de l'ordre).

Dans la section suivante, nous montrons comment représenter cette relation de dominance à l'aide d'une fonction d'agrégation.

4.4.1 Fonctions d'agrégation équitables

Généralement pour évaluer la qualité d'un vecteur de coût, il consiste à agréger les coûts individuels avec une fonction de coût collective (FCC) [121] $G : R_+^n \longrightarrow R_+$. Étant donné un problème de décision avec n fonctions objectif $P = \{f_i(x) = c^i x \text{ où } x \in \mathbb{R}^m\}$. En se basant sur la formulation donnée par [100], le problème peut être formulé :

$$\min\{G(x) : x \in Q\} \tag{4.16}$$

où G est une matrice $n \times m$ qui fait correspondre l'espace de décision $X = R^m$ à l'espace des critères R^n . Le vecteur des variables de décision $x \in X$ est défini sur un espace faisable $Q \subset X$ donnée par un système de contraintes.

Pour résoudre les contraintes 4.3.3, nous aurons besoin de faire appel à une stratégie pour définir ce que nous entendons par la minimisation de plusieurs fonctions objectif.

La fonction G peut être une combinaison linéaire de coûts individuels (c-à-d. $G \stackrel{\text{def}}{=} \text{sum}(x)$), ce qui ne convient pas au contexte d'équité. Une autre façon de construire G est basée sur la fonction max (c-à-d. $G(x) \stackrel{\text{def}}{=} \max(x)$), mais elle est sensible à l'effet de la noyade [53].

Il existe d'autres moyens d'affiner la domination de Lorenz. Nous pouvons importer certaines idées de la littérature sur la prise de décision sous risque, où les gens sont intéressés à comparer les distributions de probabilité en matière de risque. Dans ce contexte, la contrepartie de la dominance de Lorenz est la dominance stochastique du second ordre (SSD) qui définit un ordre partiel des distributions de probabilité.

Le modèle SSD ne permet de comparer n'importe quelle paire de distributions, mais elle peut être affinée par des dominances stochastiques d'ordres plus élevés, chacune d'elles affinant la précédente. Le résultat final de ce processus est nommé dominance

stochastique d'ordre infini (voir [109]). Dans cette ligne de raisonnement, nous introduisons, dans la prochaine section, une fonction d'agrégation assurant l'équité.

4.4.2 Moyennes pondérées ordonnées

Définition 4.2 (OWA). *Order Weight Average (OWA) signifie moyenne pondérée ordonnée. C'est une famille d'agrégateurs introduite par [166] et définie par :*

$$W(x) = \sum_{k=1}^n w_k x_{(k)} \quad (4.17)$$

W est une fonction symétrique de ses arguments. Les poids w_k ne représentent pas l'importance des agents mais l'attention que nous portons à ceux-ci en fonction de leur rang dans l'ordre de satisfaction.

La fonction d'agrégation OWA est une généralisation de certaines fonctions d'agrégation, paramétrée par $w = \langle w_1, \dots, w_n \rangle \in [0, 1]^n$ avec $\sum_i w_i = 1$. Cette fonction est définie de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} , où n est la taille du vecteur sur lequel elle opère.

On note $\langle x_{(1)}, \dots, x_{(n)} \rangle$ le vecteur $\langle x_1, \dots, x_n \rangle$ obtenu par réarrangement des éléments du vecteur par ordre non-croissant (i.e., $x_{(1)} \geq \dots \geq x_{(i)} \geq \dots \geq x_{(n)}$). Le poids w_1 est associé à la plus grande valeur $x_{(1)}$, alors que le poids w_n est associé à la plus petite valeur $x_{(n)}$. Avec OWA il est possible d'exprimer les opérateurs d'agrégation suivants :

- Le **Maximin** : est un OWA particulier, il suffit de poser $w_n = 1, w_i = 0, i = 1 \dots n - 1$ (ce qui revient à maximiser la valeur minimale des critères, voir la section 4.4.1).
- *La moyenne* : est un OWA particulier avec $w_1 = \dots = w_n = 1/n$.
- La moyenne en ignorant la meilleure composante et la plus mauvaise composante, i.e., avec $w_1 = 0, w_2 = 1/(n - 1), \dots, w_{n-1} = 1/(n - 1), w_n = 0$.
- *La médiane* : $(x_{(n/2)} + x_{(n/2)+1})/2$, si $w_{(n/2)} = w_{(n/2)+1} = 1/2$, quand n est pair.
- *La médiane* : $x_{(n+1)/2}$, si $w_{(n+1)/2} = 1$, quand n est impaire.

Application

La moyenne pondérées ordonnées sont utilisées parfois dans les compétitions sportives. Par exemple, dans les compétitions de patinage artistique, parmi les notes données par

4.4. Optimisation multiagent équitable

les membres du jury, on élimine la plus mauvaise et la meilleure note avant de prendre la moyenne. Dans certains classements de pilotes de planeur, on calcule la somme des points obtenus sur les cinq meilleurs vols de l'année.

Exemple 4.3.

Soient huit vecteurs d'utilités (qui représentent des coûts sur cet exemple) évalués suivant deux critères C_1 et C_2 et essayons d'appliquer l'agrégateur OWA suivant deux pondérations particulières : $w^1 = (\frac{3}{4}, \frac{1}{4})$ et $w^2 = (\frac{1}{4}, \frac{3}{4})$. Les résultats du calcul des valeurs agrégées sont présentés sur le tableau ci-dessous :

Vecteurs :	a	b	c	d	e	f	g	h
(C_1, C_2) :	(15, 15)	(14, 10)	(11, 2)	(10, 5)	(8, 16)	(7, 7)	(5, 9)	(2, 11)
W_{w^1} :	15	13	8.75	8.75	14	7	8	8.75
W_{w^2} :	15	11	4.25	6.25	10	7	6	4.25

Comme on peut le voir à travers ces résultats, la première pondération w^1 a tendance à privilégier les solutions équilibrées (les vecteurs dont leur mauvaise valeur n'est pas critique). La solution optimale donnée par l'opérateur OWA O_{w^1} est atteinte au point $f(7, 7)$ qui représente une solution parfaitement équilibrée. A travers ce tableau, on peut aussi remarquer que la deuxième pondération w^2 favorise les coûts minimaux.

4.4.3 Équité en optimisation multicritère

Dans le cadre de la dominance de Lorenz, nous avons présenté la représentation de la notion d'équité par l'intermédiaire des transferts de Pigou-Dalton. [100] a montré que l'agrégateur OWA respectait ce principe de transfert à condition d'utiliser un vecteur de pondération décroissant. En outre, il est intéressant de noter que OWA peut être reformulée en fonction du vecteur de Lorenz [108]. On a alors :

$$W(x) = \omega \cdot L(x) \tag{4.18}$$

où $\omega = \langle w_1 - w_2, w_2 - w_3, \dots, w_{n-1} - w_n, w_n \rangle$ est un vecteur de pondération positif ; $L(x) = \langle L_1(x), \dots, L_n(x) \rangle$, est le vecteur de Lorenz associé à x défini par $L_k(x) =$

$\sum_{i=1}^k x_{(i)}$ (i.e., l'utilité des k agents les plus pauvres), et $(.)$ est la permutation triant les x_i par ordre non-croissant.

Exemple 4.4. *Étant données trois alternatives ayant les vecteurs d'utilité suivants :*

- $x = \langle 7, 8, 9 \rangle$
- $y = \langle 5, 8, 10 \rangle$
- $z = \langle 15, 11, 2 \rangle$

Les vecteurs de Lorenz sont donnés par :

- $L(x) = \langle 9, 17, 24 \rangle$
- $L(y) = \langle 10, 18, 23 \rangle$
- $L(z) = \langle 15, 26, 28 \rangle$

Il est facile de remarquer que $L(y)$ domine $L(z)$ au sens de Pareto (i.e., $L(y) <_P L(z)$), et donc $y <_L z$. On remarque aussi que le vecteur $L(x)$ est incomparable avec les vecteurs $L(y)$ et $L(z)$ au sens de Pareto, et donc l'alternative x est incomparable avec les alternatives y et z au sens de Lorenz.

Or, si on utilise la formulation OWA (4.18) avec le vecteur de pondération $w = \langle \frac{6}{9}, \frac{2}{9}, \frac{1}{9} \rangle$, on obtient :

$$\begin{aligned}
 W(x) &= \frac{(6-2)}{9} \times 9 + \frac{(2-1)}{9} \times 17 + \frac{1}{9} \times 24 \\
 &= \frac{36 + 17 + 24}{9} \\
 &= \frac{77}{9} \\
 W(y) &= \frac{81}{9} \\
 W(z) &= \frac{114}{9}
 \end{aligned}$$

Ce qui entraîne l'ordre total de préférence : $x < y < z$

Le critère OWA est manifestement plus riche que la dominance de Lorenz. Cependant, OWA impose le choix d'un jeu de poids qui peut s'avérer difficile à déterminer sans informations préférentielles.

On note que les travaux de [72] ont permis d'établir un lien entre l'agrégateur OWA et l'ordre infini de la dominance généralisée de Lorenz (i.e. L^∞ -dominance, voir

4.4. Optimisation multiagent équitale

la définition 4.1). Il résulte de ces travaux un jeu de poids particulièrement adapté à la recherche de solutions équilibrées en posant $w_i = \sin \frac{(n+1-i)\pi}{2n+1}$.

Le théorème suivant, établi par [72], propose des coefficients pour la méthode OWA garantissant la propriété d'équité.

Théorème 4.1. *La L^∞ -dominance a une représentation numérique avec la somme pondérée OWA :*

$$W(x) = \sum_{k=1}^n \sin\left(\frac{(n+1-k)\pi}{2n+1}\right)x_{(k)} \quad (4.19)$$

Cette représentation est donnée par la propriété :

$$\forall x, y \in \mathbb{R}_+^n, x <_L^\infty y \iff W(x) < W(y) \quad (4.20)$$

La représentation géométrique de ces poids OWA est donnée sur la figure 4.4 :

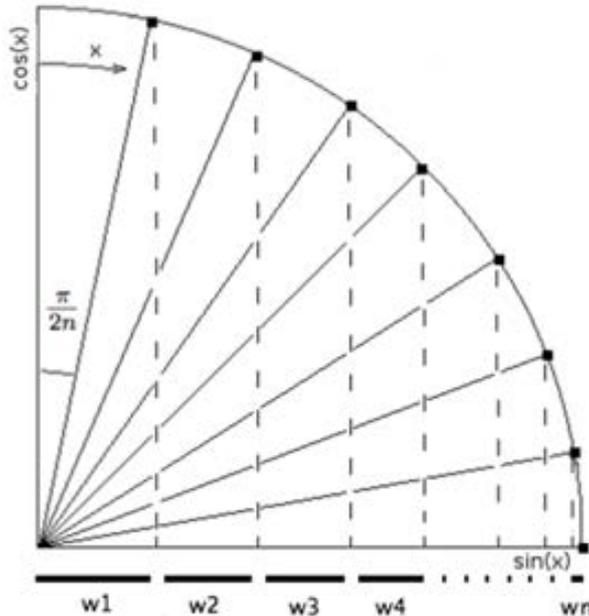


Figure 4.4 Interprétation graphique des coefficients de l'OWA ω .

Après avoir décrit les principales propriétés de l'équité, dans la section suivante, nous présentons plus de détails sur notre modèle proposé de PPC pour trouver la sectorisation équitale de l'espace aérien.

4.5 Sectorisation optimisée équitable

4.5.1 Modèle d'équité EQASP

Le modèle proposé intègre l'équité en se basant sur le modèle de partitionnement de [150], où un modèle de PPC a été établi pour modéliser les contraintes géométriques liées à la sectorisation (c'est-à-dire le temps minimal de traversée de secteur, la distance minimale, les contraintes de convexité et de connectivité). Les auteurs [150] ont suggéré d'utiliser la contrainte d'équilibre 4.8 imposant à chaque secteur de disposer d'une charge de travail comprise entre deux seuils (W_{min}, W_{max}). Mais plus précisément, fixer ces valeurs limites de la charge de travail des contrôleurs n'est pas toujours évident, car nous n'avons aucune garantie valide que les solutions équilibrées optimales (ou réalisables) soient préservées. Cette façon de faire peut être problématique car il peut y avoir plusieurs solutions entre ces limites, et il n'y a aucun moyen de choisir la meilleure. C'est pourquoi, dans cette section, nous proposons un nouveau modèle d'équité EQASP qui garantit les meilleures solutions équitables sans avoir besoin de fixer des paramètres (seuil). En se basant sur l'optimisation multiagents OWA (voir section 4.4), nous proposons ici un modèle qui calcule des solutions équitables optimales. Le modèle EQASP reprend les variables de l'équation 4.1 et les contraintes (4.4-4.7) proposées par [150]. Puisque nous voulons équilibrer la charge de travail entre les secteurs, nous ajoutons de nouvelles variables de décision $z = z_1, \dots, z_k$, où z_j est la charge de travail du $j^{\text{ème}}$ secteur et ω_i est la charge de travail des $i^{\text{ème}}$ sites, telles que $\forall j = 1, \dots, k, z_j = \sum_{i=1}^n y_{ij}\omega_i$. L'opérateur d'agrégation OWA équitable est une somme pondérée des variables objectif triées, où les poids garantissant l'exigence d'équité sont déterminés par le théorème 4.1 et expliqués en détail à la section 4.4. Nous introduisons la contrainte globale de tri qui est donnée comme suit :

$$sort([z_1, \dots, z_k], [s_1, \dots, s_k]) \quad (4.21)$$

où le vecteur de variables s est une permutation de z et s et est trié par ordre décroissant. Le modèle EQASP complet pour trouver une sectorisation efficace (c'est-à-dire Pareto-optimale) et équitable est présenté à la figure 4.5, où $W'_j(x) = \sin(\frac{(n+1-j)\pi}{2n+1})x_{(j)}$ comme proposé par le théorème 4.1, qui donne les conditions nécessaires pour obtenir des solutions équitables. La fonction objectif et les contraintes (C1) implémentent

4.5. Sectorisation optimisée équitable

l'opérateur d'agrégation OWA sur le problème de la partition de l'espace aérien. Précisément, les contraintes de tri (C2) et (C3) sont spécifiquement utilisées lorsque les valeurs de coût sont données en compréhension. Ici, l'étape de tri est appliquée à l'aide de la contrainte globale de tri *sort* [133]. il s'ensuit que la $j^{\text{ème}}$ valeur de coût S_j aura le $j^{\text{ème}}$ plus grand poids w'_k :

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } G^{w'}(s) = \sum_{j=1}^k s_j w'_j \\
 \text{s.t } & \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Sectorisation de l'espace aérien. } \{ (C1) \text{ contraintes (4.4 - 4.7)} \\
 \text{tri OWA } \left\{ \begin{array}{l}
 (C2) \text{ contrainte sur les variables de la charge de travail (4.21)} \\
 (C3) z_j = \sum_{i=1, \dots, n} y_{ij} \omega_i \quad \forall j = 1, \dots, k \\
 x, c \text{ et } y \text{ sont définies dans (4.1)} \\
 z_j, s_j \in \mathbb{R}_+, \quad \forall j = 1, \dots, k
 \end{array} \right.
 \end{array} \right.
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

Figure 4.5 Modèle PPC «OWA» pour une sectorisation équitable de l'espace aérien.

La complexité du modèle de la figure 4.5 avec n sites, e trajectoires de vol et k secteurs. On note F la taille de la trajectoire de vol la plus longue. Pour résoudre ce problème de sectorisation, notre approche construit un modèle PPC qui inclut les variables suivantes :

- Les variables fournies dans l'équation 4.1, qui totalisent $n^2 + (n \times k) + n$ variables.
- k variables sont utilisées pour encoder la charge de travail dans les secteurs (la figure 4.5 - (C3)).
- k variables additionnelles impliquées dans la contrainte globale *sort*, qui est utilisée pour modéliser l'opérateur OWA (la figure 4.5 - (C2)).

En total, notre modèle PPC utilise des variables $\mathcal{O}(n^2 + n(k + 1) + 2k)$ pour coder l'EQASP. À partir de ces variables, nous pouvons définir les contraintes de sectorisation suivantes :

- Deux contraintes globales (i.e. contraintes $\mathcal{O}(1)$) pour imposer les contraintes géométriques de convexité et de connectivité.

- La contrainte globale *sort* (i.e. $\mathcal{O}(1)$) pour encoder le critère d'équité (équation 4.21).
- Au maximum $e \times F(F - 1)/2$ contraintes (i.e. $\mathcal{O}(e \times F^2)$) pour encoder la contrainte de temps de passage minimum dans le secteur, où F limite le nombre d'arêtes dans chaque plan de vol (équation 4.4).
- Au maximum $e \times F^2(F - 1)/2$ contraintes (i.e. $\mathcal{O}(e \times F^3)$) pour encoder la contrainte de distance minimum (équation 4.5).
- n contraintes pour imposer à chaque site d'être exactement dans un seul secteur.
- k contraintes pour évaluer la charge de travail de chaque secteur.

Il est à noter que le modèle de Trandac et *al.* comporte k contraintes supplémentaires pour encoder la charge de travail de chaque secteur (équation 4.8). Dans l'ensemble, pour construire un modèle EQASP basé sur la PPC, nous avons besoin de $\mathcal{O}(e \times F^2(F + 1) + n + k)$ contraintes, dans le pire des cas.

4.6 Approche Portfolio pour une sectorisation équilibrée

Les résultats expérimentaux dans la littérature ont montré que les stratégies de recherche, les techniques de branchement et les heuristiques peuvent avoir un impact significatif sur les performances du solveur séquentiel pour la résolution des différents domaines de l'intelligence artificielle tels que la PPC [136], la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) [162] et la satisfiabilité propositionnelle (SAT) [163]. Pour bénéficier de la variété des stratégies de recherche et de la puissance de calcul, nous exploitons une architecture parallèle. Dans la littérature, on peut distinguer deux approches principales pour explorer le parallélisme : diviser pour régner et stratégie de portfolio coopératif [8].

Dans le premier cas, le problème est divisé en plusieurs sous-problèmes, chaque problème est résolu séparément et le résultat est ensuite combiné pour former les solutions du problème initial, tandis que la stratégie de portfolio parallèle exploite la complémentarité entre les différentes stratégies de résolution séquentielle pour se concurrencer et coopérer sur le même problème. En réalité, il n'a pas été démontré que la technique diviser et conquérir est efficace dans le contexte de la PPC. En effet, il

4.7. Conclusion

n'est pas possible de diviser proprement un problème en sous problèmes indépendants, en présence de contraintes faisant intervenir des variables appartenant à différents sous problèmes [150]. En outre, il est reconnu dans le domaine de la PPC que les paramètres du modèle (c'est-à-dire les stratégies de recherche, les techniques de branchement, les heuristiques) ont un impact important sur l'amélioration des performances. De plus, le théorème "no free lunch" [161] montre succinctement que, sur tous les problèmes possibles, aucun algorithme ne surperformera en moyenne.

En fait, il a été largement observé dans la PPC qu'il n'existe pas de stratégie «dominante» pour résoudre tous les problèmes de la PPC (généralement de nature NP-difficile). Au lieu de cela, différents solveurs fonctionnent le mieux sur des instances différentes. Nous abordons ainsi le problème de la sectorisation équitable de l'espace aérien en utilisant la coopération de différents solveurs de portfolio pour résoudre le problème d'optimisation de contrainte (COP).

Dans l'approche de portfolio proposée, notre modèle de sectorisation basé sur OWA (voir figure 4.5) est introduit dans plusieurs solveurs utilisant différents paramètres prédéfinis et personnalisés (stratégies de recherche (objectifs, par exemple), heuristiques pour la sélection de variables et de valeurs, coupes dynamiques, etc.). Une solution partielle trouvée par un résolveur est un gage de connaissance qui peut être partagée avec un autre résolveur s_j afin d'élaguer son espace de recherche et donc d'accélérer éventuellement le processus de résolution. Il est intéressant de noter que les environnements de programmation par contraintes les plus récents (Gecode, Choco, etc.) sont fournis avec des bibliothèques facilitant la mise en œuvre d'une architecture de portfolio standard.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une formulation basée sur la PPC pour modéliser le problème de sectorisation de l'espace aérien. Le problème de sectorisation consiste donc à diviser un espace aérien en k -secteurs équilibrés en matière de charges de travail des contrôleurs, tout en minimisant les coordinations entre les secteurs, et respectant les contraintes géométriques de l'espace aérien (la contrainte de temps de passage minimum, la contrainte de distance minimum la contrainte de convexité au sens des routes et la connectivité). Dans notre formulation PPC, nous avons défini un

Chapitre 4. Sectorisation optimisée équitable de l'espace aérien

graphe pondéré à la fois sur ses sommets et ses arêtes qui représente l'espace aérien, les contraintes spécifiques de l'ATC en donnant la modélisation PPC. Nous avons proposé un nouveau modèle d'équité qui garantit les meilleures solutions équitables en se basant sur l'optimisation multiagents en utilisant l'opérateur d'agrégation OWA pour trouver une distribution équilibrée entre les secteurs. Afin de bénéficier de la variété des stratégies de recherche et de la puissance de calcul, nous avons proposé une architecture parallèle type portfolio pour résoudre le problème d'optimisation avec contraintes. Dans le chapitre suivant nous allons présenter les résultats expérimentaux de la méthode proposée sur les espaces aériens algérien et français.

Chapitre 5

Étude expérimentale

Sommaire

4.1	Introduction	60
4.2	Contribution de la PPC à la gestion du trafic aérien	60
4.3	Modèle de sectorisation de l'espace aérien	61
4.3.1	Modélisation de l'espace aérien et partitionnement de graphes	61
4.3.2	Variables	62
4.3.3	Contraintes	64
4.4	Optimisation multiagent équitable	70
4.4.1	Fonctions d'agrégation équitables	75
4.4.2	Moyennes pondérées ordonnées	76
4.4.3	Équité en optimisation multicritère	77
4.5	Sectorisation optimisée équitable	80
4.5.1	Modèle d'équité EQASP	80
4.6	Approche Portfolio pour une sectorisation équilibrée	82
4.7	Conclusion	83

Ce chapitre propose d'évaluer expérimentalement le modèle EQASP (standard et portfolio) proposé et de comparer à l'approche basée sur la PPC de [150] dans le cadre de la sectorisation équilibrée de l'espace aérien. La partie expérimentale se décomposera en deux parties. Dans un premier temps nous définirons un protocole expérimental puis dans un deuxième temps, nous détaillerons et discuterons les résultats de nos expérimentations, aussi nous soulignerons l'efficacité de notre approche suivant les qualités d'équilibre et temps de résolution de problèmes.

5.1 Introduction

Cette section présente nos expériences menées sur un ensemble de jeux de données sur le trafic aérien dans le monde réel, obtenu auprès d’Eurocontrol et du LSA, avec différentes caractéristiques (voir : figure 5.1, figure 5.3). Cette étude expérimentale vise à (1) comparer les performances de résolution de notre modèle (EQASP) basé sur OWA (standard et portfolio) à l’approche basée sur la PPC de [150] pour une sectorisation équilibrée de l’espace aérien et (2) évaluer qualitativement les approches de sectorisation en termes de charge de travail équilibrée sur les ensembles de données de référence.

5.2 Protocole expérimental

Nous avons mis en œuvre et testé notre approche PPC basée sur OWA en tant qu’outil baptisé BASS (*Balanced AirSpace Sectorization*) à l’aide de la bibliothèque Choco v.4.0.1 [128]. Pour une comparaison équitable, nous avons également mis en œuvre l’approche PPC originale [150] en utilisant la même bibliothèque Choco v.4.0.1.

5.2.1 Environnement informatique

Les expériences ont été réalisées sur une machine Linux équipée d’un double processeur Intel Xeon E5 – 2660 avec 32 cœurs, fonctionnant à 2.4 GHz et avec une mémoire principale de 48 Go. Le temps limite de la résolution a été défini à 1 heure pour toutes les approches.

5.2.2 Mesures qualitatives

Pour évaluer qualitativement les approches de sectorisation en termes de charge de travail équilibrée, nous utilisons deux mesures : (1) l’écart type (*Std.Dev*) par rapport à la sectorisation idéale équilibrée (c’est-à-dire sans tenir compte des contraintes (4.2 - 4.8) et (2) l’écart entre le plus petit et le plus grand des secteurs en termes de charge de travail.

5.2. Protocole expérimental

5.2.3 Stratégie de portfolio parallèle coopérative et réglage des performances

Pour les instances réelles, l'espace de recherche induit par le domaine des variables est énorme, en général. Ainsi, la plupart du temps, la propagation de contraintes n'est pas suffisante pour générer une solution, c'est-à-dire pour supprimer toutes les valeurs incohérentes des domaines des variables. Ainsi, l'espace de recherche doit être exploré en utilisant une ou plusieurs stratégies de recherche.

Lors de nos expériences, nous avons évalué les capacités d'une architecture de portfolio parallèle afin que notre approche traite efficacement les instances de sectorisation du monde réel. Notre mise en œuvre de l'architecture de portfolio coopérative bénéficie du parallélisme en faisant en sorte que tous les processeurs et tous les cœurs coopèrent à travers la résolution du même problème de sectorisation, chacun avec sa stratégie de recherche spécifique. Des communications intermédiaires entre les cœurs sont effectuées pour échanger de nouvelles limites d'objectif et des valeurs incohérentes des variables non fixes. En particulier, nous avons mis en œuvre différentes stratégies de recherche bien connues disponibles dans la bibliothèque du solveur Choco, telles que :

- stratégie de recherche par activité (*Activity based search strategy, (ABS)*);
- stratégie de redémarrage : après chaque nouvelle solution (*Restarts strategy : After each new solution*);
- Branchement sur la valeur avec le meilleur objectif borné (*Branching on the value with the best objective bound*);
- Branchement sur la variable non instanciée ayant la plus petite taille de domaine à sa limite inférieure (*IntVarSearch*);
- Recherche dans le grand voisinage (*Large Neighborhood Search (LNS)*);
- Sélectionne de manière aléatoire une variable et l'assigne à une valeur de manière aléatoire;
- WDegSearch (heuristique de degré pondéré (wdeg) (*WDegSearch*)).

Nous avons également mis en œuvre une heuristique personnalisée pour la sélection de variable et de valeur. Cette stratégie de recherche a été utilisée pour la première fois par [150] et il est inspiré du célèbre algorithme de [91] pour le partitionnement de graphes. Il a été démontré que cette heuristique réduisait considérablement le nombre

de retours en arrière. Une adaptation détaillée dans le contexte de la sectorisation de l'espace aérien a été donnée par [150].

5.3 Instances de tests : données de trafic aérien

Nous avons évalué et comparé les approches de la sectorisation du PPC avec les données de réseau de trafic aérien réelles de la région d'information de vol (FIR) pour les espaces aériens français et algériens. Dans un premier temps, les données de benchmarking ont été collectées auprès d'Eurocontrol - Direction du gestionnaire de réseau - Relations des prévisions de performances - PRISME, qui nous ont fourni toutes les informations nécessaires, à savoir 37082 points de vol et 253644 profils de route pour les vols traversant des FIR français le 07 juillet 2017. Les données du plan de vol sont fournies pour une journée UTC dans trois récapitulants les numéros de vol, le départ et la destination de chaque aéroport, le type de segment et l'itinéraire suivi, le temps de passage au dessus du point, les coordonnées géographiques, les noms et leurs niveaux de vol (FL). Ces coordonnées nous ont permis, après une étape de prétraitement, de créer nos réseaux de routes. La deuxième étape consiste à identifier les vols entrants ou sortants de la FIR française et à trouver le niveau optimal FL pour la sectorisation de l'espace aérien. Dans ce cas, la meilleure valeur de la sélection FL était fixée à 195 (= 19500 pieds) pour l'espace aérien à basse altitude. Le réseau de trafic aérien à basse altitude qui en résulte à travers les FIR françaises est illustré à la figure 5.3. En ce qui concerne l'espace aérien algérien (voir la figure 6.1), nous avons choisi les données de trafic aérien disponibles fournies par LSA. Le jour choisi est le 11 décembre 2002. Cet ensemble de données est complet et comprend le trafic aérien haut et bas (ascendant et descendant). Nous sélectionnons en outre le FL 280 (28000 pieds) pour la basse altitude. Lors de la dernière étape, nous avons construit un modèle graphique pondéré qui capture la structure de chaque espace aérien étudié, où les aéroports, les points de passage sont modélisés à l'aide de sommets (nœuds), tandis que les routes aériennes sont représentées par des arêtes.

Dans nos expériences, nous avons défini certains paramètres en termes de paramètres globaux. En particulier, nous fixons la distance standard minimale définie l_{min1} à 2 min , entre tous les nœuds du réseau (aéroports, points de passage, etc.) et une frontière de secteur. Nous avons également fixé la limite de secteur l_{min2} , qui est la

5.4. Résultats de la sectorisation

contrainte de temps minimum de franchissement de secteur à $1min$, ce qui permet au contrôleur de disposer de suffisamment de temps pour contrôler l'avion.

5.4 Résultats de la sectorisation

Dans ce qui suit, nous analysons les résultats des approches de sectorisation par PPC, appliquées respectivement aux espaces aériens algérien et français. En réalité, le problème consiste à trouver la meilleure sectorisation de l'espace aérien, ce qui minimise les charges de coordination entre les contrôleurs, tout en mettant l'accent sur des charges de travail de trafic aérien équilibrées le long des secteurs calculés.

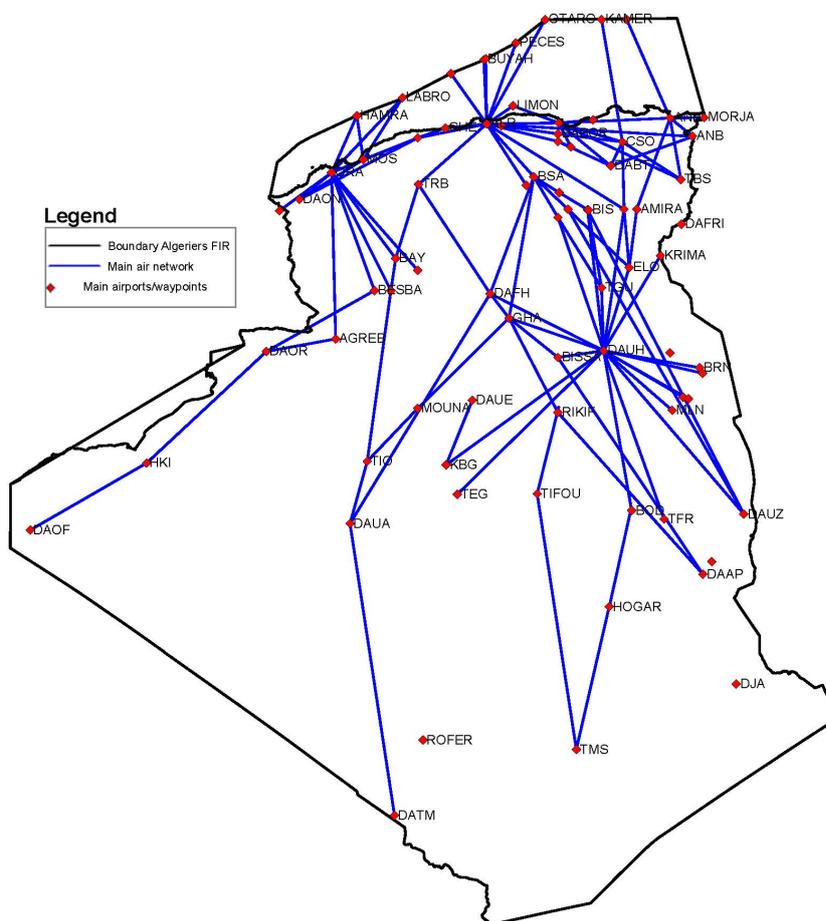


Figure 5.1 Le réseau d'espace aérien à basse altitude à travers la FIR d'Alger pendant 24 heures de la journée du 11 décembre 2002.

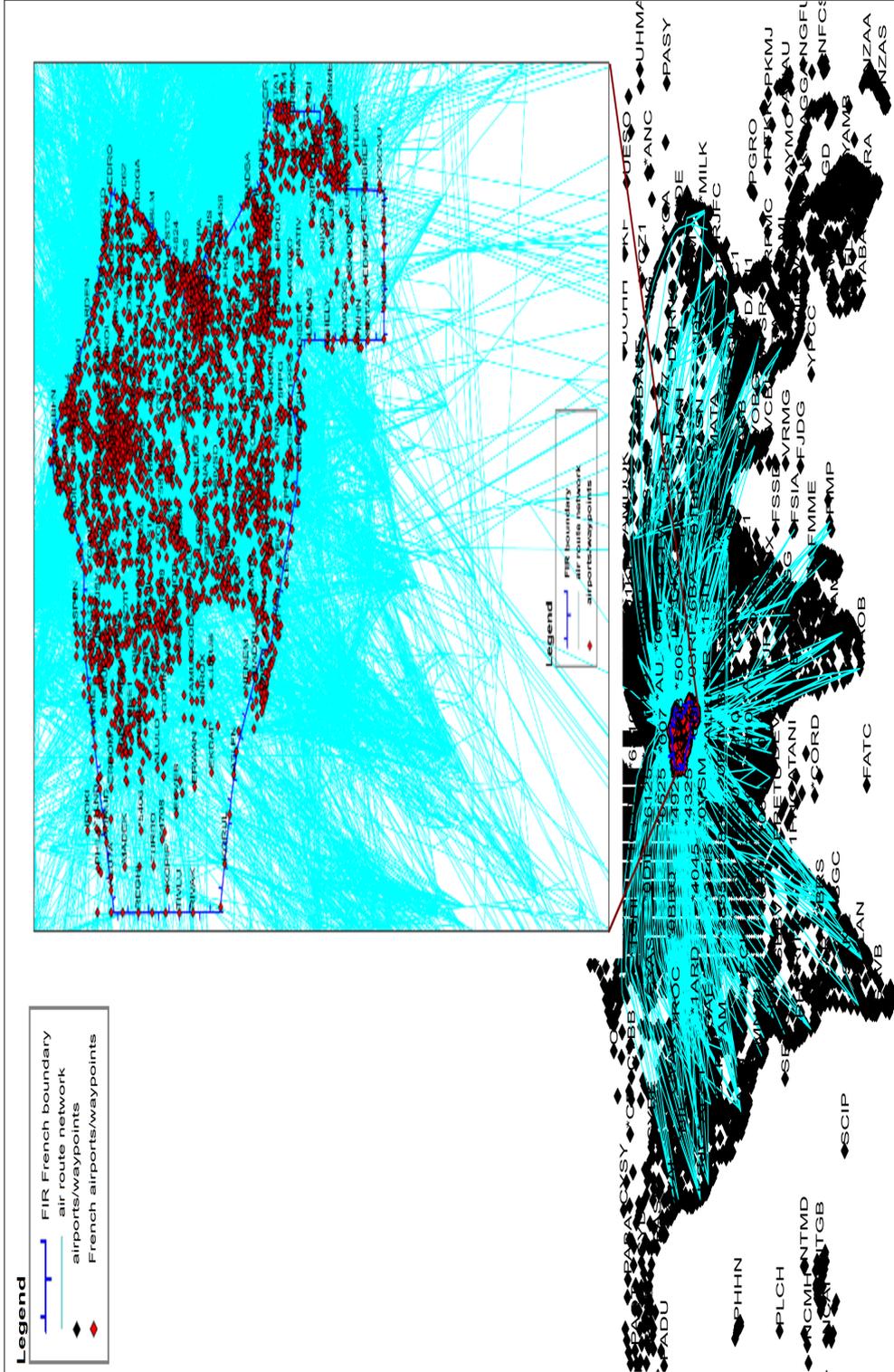


Figure 5.2 Le réseau d'espace aérien en haute et basse altitude à travers la FIR française pendant 24 heures de la journée du 07 juillet 2017.

5.4. Résultats de la sectorisation

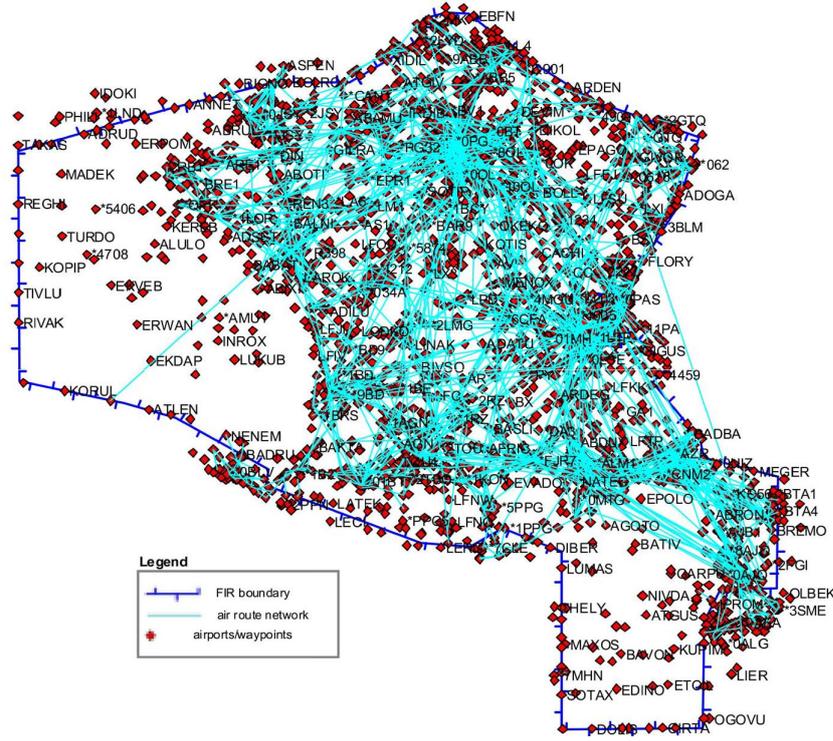


Figure 5.3 Le réseau d'espace aérien à basse altitude passant par la FIR française le 07 juillet 2017.

5.4.1 Résultats initiaux

Les résultats présentés ci-dessous sont donnés en fonction du nombre de secteurs k allant de huit à quinze. Il est important de noter qu'avec une valeur plus grande de k , il est possible d'obtenir une réduction légèrement supérieure de la complexité du problème de la sectorisation. De plus, ce problème devient plus facile à résoudre pour une configuration avec k égal au nombre de sites (c'est-à-dire un site par secteur), mais dans ce cas, la sectorisation qui en résulte reste inapplicable dans la pratique. En outre, des solutions avec un nombre réduit de secteurs peuvent être plus pratiques. Cependant, selon nos ensembles de données de référence, lorsque k se rapproche de neuf valeurs ($k = 9$) aux heures creuses, ou ($k = 8$) pour les heures de trafic intense ou même pour les vols mesurés dans les 24 heures, le problème devient plus difficile à résoudre, conduisant à certaines situations où le solveur ne trouve aucune solution réalisable. Ces grandes instances ont été résolues en modifiant les contraintes de distance, à savoir la distance minimale $l_{min1} = 2$ min et $l_{min2} = 1$ min.

5.4.2 Résultats de la sectorisation de l'espace aérien algérien

Afin de tester les performances de résolution et de nous assurer que notre outil BASS trouve des secteurs mieux équilibrés par rapport à l'approche PPC concurrente, [150], nous avons sélectionné un ensemble d'instances d'analyse comparative relative à l'espace aérien algérien pour trois périodes différentes avec les caractéristiques présentées dans le tableau 5.1 ci-dessous.

Instance	Nombre de noeuds	Nombre d'arêtes	Nombre de variables	Nombre de contraintes
Algérie-24h	52	60	2633	1777
Heures de pointe (10h00-11h00)	27	31	1396	926
Heures creuses (03h00-04h00)	27	29	1390	919

Table 5.1

Caractérisation des instances de benchmarking de l'espace aérien algérien.

Analyse de performance

La figure 5.4 illustre l'accélération des performances comparatives entre les versions séquentielles et Portfolio de notre outil de sectorisation BASS. Ici, nous observons clairement que la stratégie de portfolio surpasse considérablement l'approche classique jusqu'à quatre ordres de grandeur pour les instances des heures creuses avec le nombre de secteurs $k = 11$ et à plus de deux ordres de grandeur pour :

(i) instances heures creuses avec $k = (15 - 17)$, (ii) instances des heures de pointe avec $k = (12, 17)$ et instances de l'Algérie-24h avec $k = 12; (14 - 15); 17$. De même, il est facile de voir à travers la même figure 5.4, pour trois catégories d'ensembles de données, avec respectivement $k_1 = 10; (12-14)$, $k_2 = 10$ et $k_3 = (8 - 12)$, l'approche parallèle apporte une légère amélioration à l'approche séquentielle. Ceci est en partie expliqué par le petit temps de résolution de l'approche séquentielle.

5.4. Résultats de la sectorisation

Dans l'ensemble, la figure 5.4 montre que l'approche du portfolio a permis d'augmenter les performances de résolution de notre outil sur tous les jeux de données d'analyse comparative.

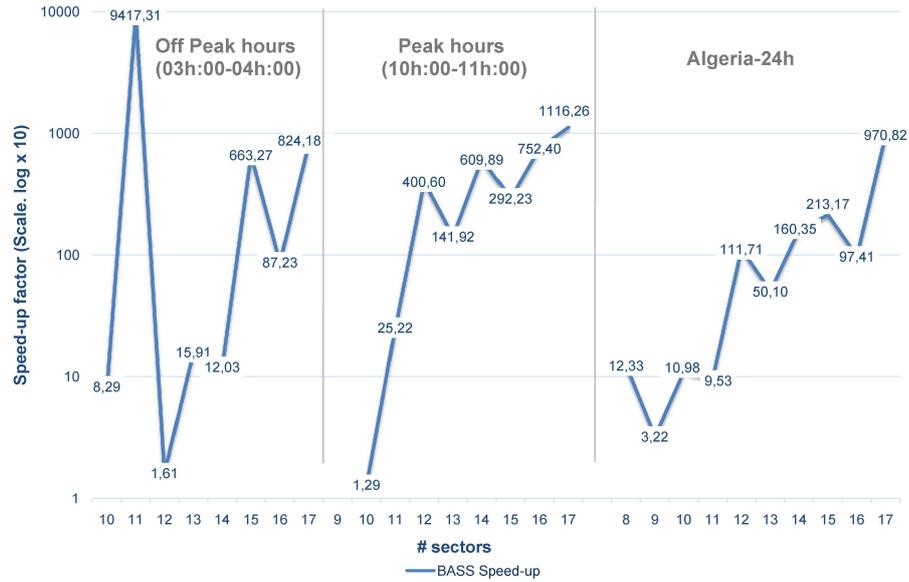


Figure 5.4 Analyse d'accélération de l'outil BASS parallèle dans l'espace aérien algérien.

Nos observations précédentes sont plus accentuées sur la figure 5.5 qui compare les temps (CPU) pour le calcul de secteurs équilibrés optimaux pour différentes valeurs de k . La figure montre une dominance stricte de l'outil BASS avec la stratégie de portfolio parallèle par rapport à l'approche PPC de [150], même pour les grandes instances (c'est-à-dire le jeu de données Alger de 24 h). Il est important de noter ici que l'outil BASS fait beaucoup plus d'efforts pour trouver les meilleures solutions de sectorisation équitables et pour prouver l'optimalité des résultats. C'est pourquoi l'outil Trandac *et al.*, dépasse l'outil BASS classique (sans portfolio) et semble concurrencer la version parallèle en termes de résolution des performances, mais au détriment de la qualité de la solution, comme nous le verrons dans la comparaison qualitative (voir section 5.4.2).

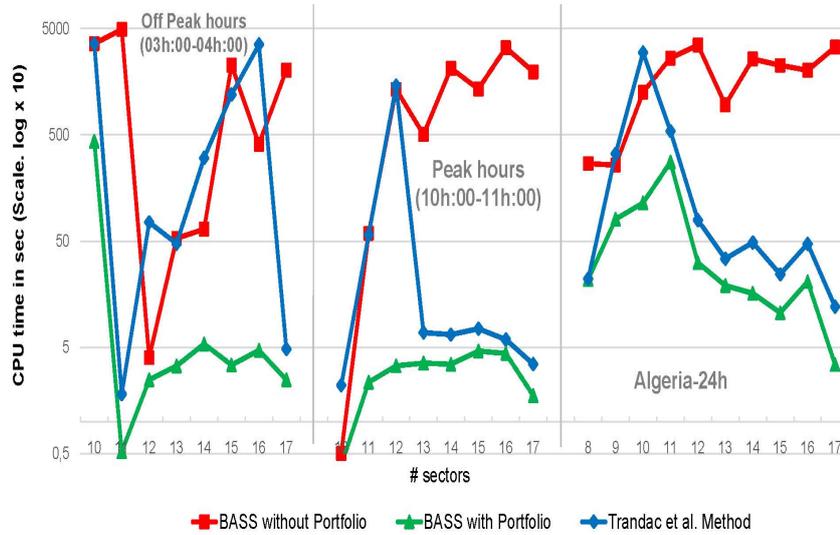


Figure 5.5 Analyse de performance des approches de sectorisation dans l'espace aérien algérien.

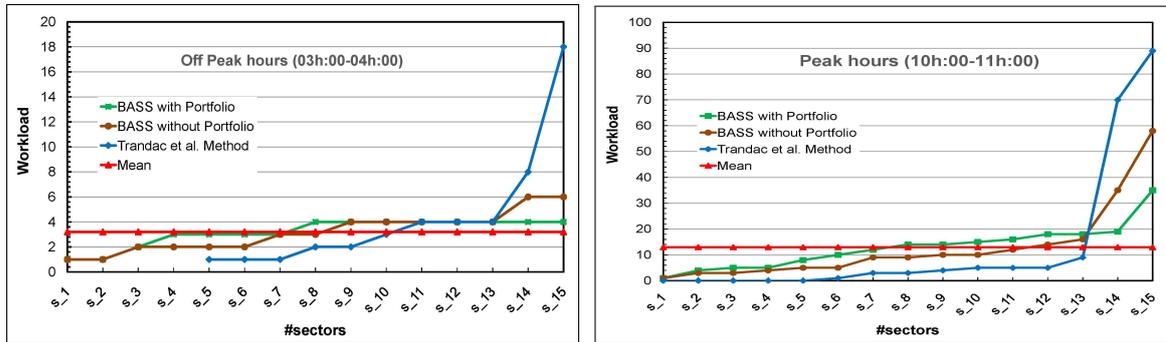
Analyse qualitative de la sectorisation

La figure 5.6 présente une comparaison qualitative en termes d'équilibre de la charge de travail entre toutes les approches de sectorisation basé sur la PPC. Les résultats sont fournis en fonction des trois principales périodes de trafic aérien de l'espace aérien algérien, à savoir une période de 24 heures (figure 5.6(c)), aux heures de pointe de 10h00 à 11h00 (figure 5.6(b)) et en heures creuses de 03h00 à 04h00 (figure 5.6(a)). Les résultats montrent clairement que notre approche de portfolio offre aux secteurs la charge de travail la mieux équilibrée pour la période de 24 heures (voir figure 5.6(c)). Effectivement, il offre une bonne répartition autour de la charge de travail idéale et équilibrée (indiquée par la ligne horizontale), par rapport à Trandac *et al.* Cette approche présente une solution de sectorisation avec les valeurs aberrantes (secteurs surchargés / sous-chargés). Le même comportement est observé en ce qui concerne les distributions d'équilibre de la charge de travail pendant une heure de vol dans la FIR d'Alger (figure 5.6(a), 5.6(b)). Il est noté que les secteurs où leur charge de travail égale à zéro (0) ne sont pas représentés dans les différents graphes de la figure 5.6.

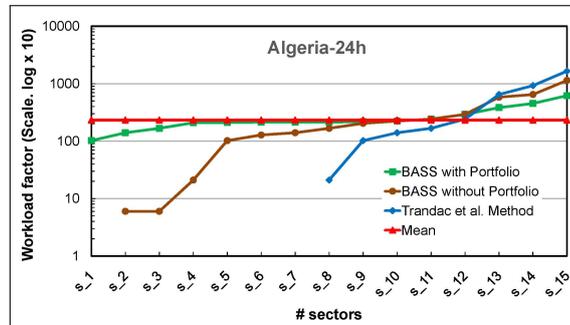
Ici, la disparité entre les deux approches de PPC devient plus prononcée, où les solutions apportées par BASS sont très proches de la sectorisation idéale équilibrée. Pour évaluer plus avant la qualité de la sectorisation équilibrée, nous avons utilisé deux mesures : (i) l'écart type et (ii) l'écart entre le plus petit et le plus grand des

5.4. Résultats de la sectorisation

secteurs. Selon les résultats de l'écart type, illustrés à la figure 5.7(b), nous observons que l'outil de portfolio BASS fournit toujours une sectorisation plus équitable que celle de l'approche de [150]. Maintenant, en examinant la mesure de déviation, nous pouvons aussi voir que l'approche de [150] réussit mal en termes d'équilibre par rapport à notre approche basée sur OWA (voir figure 5.7(a)), qui offrirait l'écart le plus faible sur tous les jeux de données. Ces résultats sont cohérents avec notre support théorique en termes de propriétés d'équilibre décrites dans le chapitre 4, sections (4.4 et 4.5).



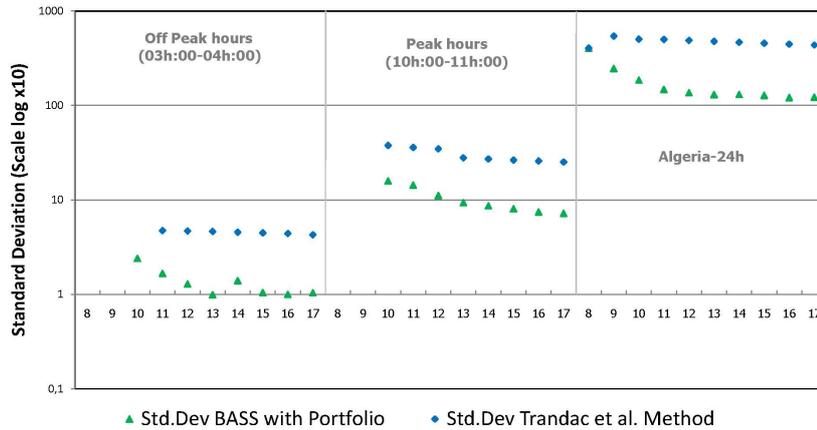
(a) Répartition de la charge de travail pour les heures de pointes. (b) Répartition de la charge de travail pour les heures de creuses.



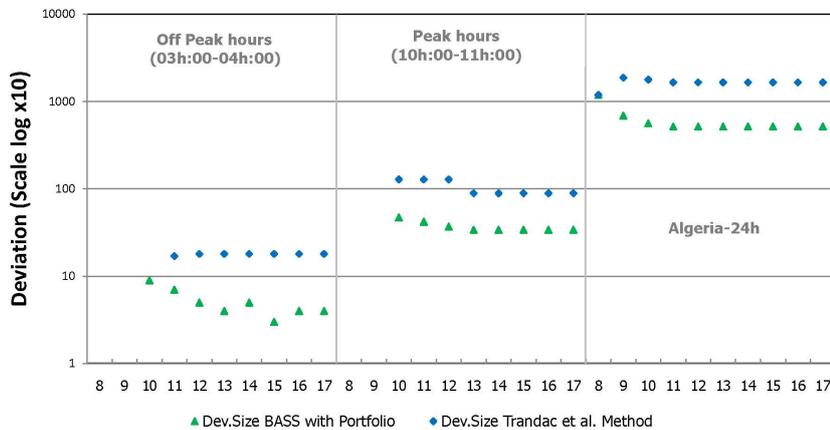
(c) Répartition de la charge de travail pour une journée complète.

Figure 5.6 Qualité de l'équilibre des sectorisations résultantes sur l'espace aérien algérien.

En fait, la fonction d'agrégation équitable (basée sur les pondérations OWA fournies par le théorème [4.1] implémentée dans notre outil BASS optimise efficacement la répartition des charges de travail entre les secteurs en fonction des objectifs choisis et de leurs pondérations respectives. Les valeurs de cette fonction d'agrégation équitable ont tendance à être proches de la valeur moyenne dans les différents secteurs, comme indiqué dans les figures (5.6(a- c)).



(a) Comparaison d'écart minimum.



(b) Comparaison de l'écart type.

Figure 5.7 Comparaison qualitative entre l'outil BASS parallèle et la méthode [150] sur l'espace aérien algérien.

5.4.3 Résultats de la sectorisation de l'espace aérien français

Afin de renforcer nos précédentes évaluations sur les ensembles de données de l'espace aérien algérien (voir la section (5.4.2)), nous avons effectué une deuxième validation expérimentale de l'approche de sectorisation équitable proposée pour la PPC avec les données de trafic aérien de la France décrites à la section (5.3). Les expériences ont été menées sur des jeux de données selon une journée entière le 07 juillet 2017 et couvrant les régions FIR des espaces aériens suivants : Reims, Marseille, Paris, Bordeaux et Brest. Notre évaluation expérimentale est conçue pour répondre aux questions suivantes :

5.4. Résultats de la sectorisation

1. Comment nos modèles PPC se comparent-ils et s'adaptent-ils aux jeux de données considérés ?
2. Comment (en termes de temps CPU) notre modèle de sectorisation Portfolio se compare-t-il au modèle PPC de Trandac *et al.* ?
3. Comment les sectorisations résultantes se comparent-elles qualitativement ?

Les principales caractéristiques de chaque FIR sont présentées dans le tableau 5.2

Instance	Nombre de noeuds	Nombre d'arêtes	Nombre de variables	Nombre de contraintes
Reims	63	92	2270	1539
Bordeaux	73	98	5940	3963
Brest	51	60	1787	1209
Marseille	126	144	20203	13632
Paris	145	158	16405	11098

Table 5.2

Caractérisation des instances de benchmarking du réseau d'espace aérien français.

Analyse de performance

La figure 5.8 montre la variation d'accélération de la version parallèle du portfolio de BASS en fonction de chaque espace aérien (FIR) et du nombre de secteurs. À partir de cette figure, il convient de noter que BASS avec la stratégie de portfolio améliore considérablement les performances de résolution pour la plupart des instances d'analyse comparative. En particulier, pour les FIR Marseille avec $k = (25, 40)$, Bordeaux FIR avec $k = 20$, FIR Brest avec $k = (20, 25, 35)$ et Reims avec $k = 10$, l'outil BASS parallèle réalise des performances supérieures à deux ordres de grandeur par rapport à la version séquentielle. Bien qu'une amélioration des performances inférieure à un ordre de grandeur soit clairement observée sur les FIR Marseille avec $k = 10$, Bordeaux FIR avec $k = (25, 30)$ et Reims avec $k = (5, 15, 40)$, ceci s'explique en partie par les résultats illustrés à la figure (5.9).

Fait intéressant, cette figure montre que, pour des valeurs d'accélération plus faibles, le temps de calcul correspondant est inférieur à 2 minutes, ce qui signifie que le BASS séquentiel est assez rapide et ne tire pas pleinement parti de l'approche parallèle. Cette figure illustre également les performances de résolution de l'approche de Trandac *et al.* basé sur la PPC. Pour les FIR Paris et Marseille, on peut constater qu'aucun résultat n'a été fourni par la méthode Trandac *et al.* car le temps de résolution dépassait la

limite de temps impartie d'une heure.

Nous pouvons également constater que cette approche a une performance quasi linéaire et semble offrir un meilleur comportement par rapport à notre outil. Toutefois, comme nous le verrons dans l'analyse qualitative (section 5.4.3), les solutions optimales trouvées par l'approche de [150] sont loin d'être équitables. Ceci explique très probablement le bon comportement de ce modèle. En outre, en raison de la complexité de calcul induite par la fonction d'agrégation OWA mise en œuvre dans notre outil BASS, il faut plus de temps processeur pour capturer la sectorisation optimale. Néanmoins, notre outil a donné des résultats de performance assez compétitifs.

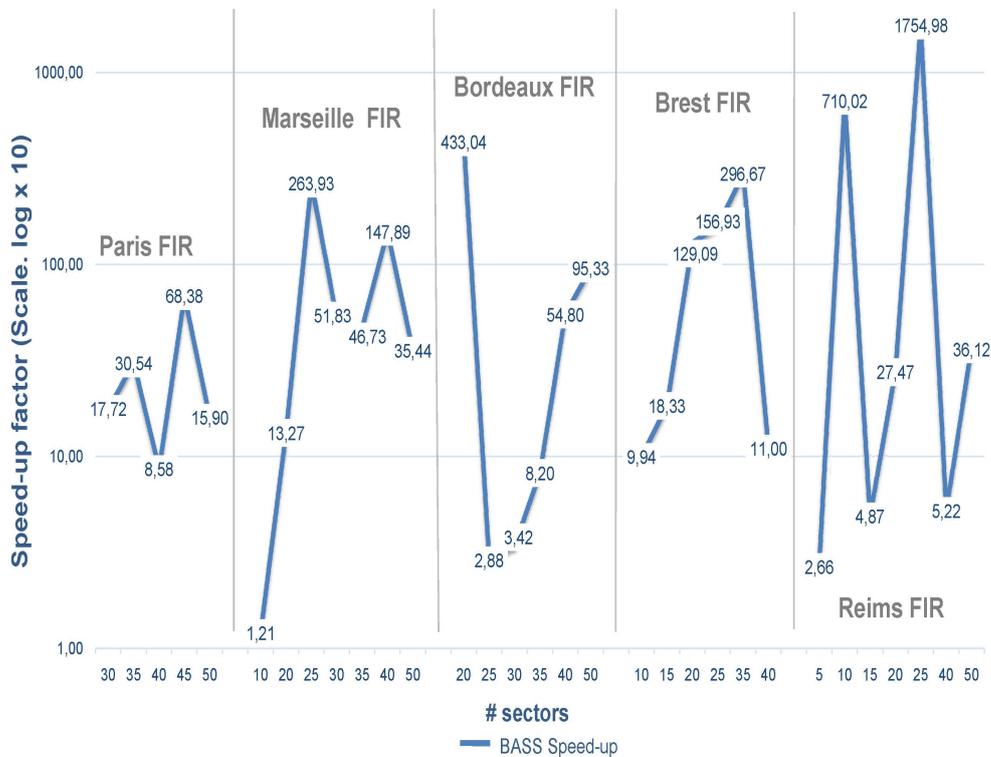


Figure 5.8 Analyse d'accélération de l'outil BASS parallèle dans l'espace aérien de la France.

Sectorisation FIR de Reims pour 10 secteurs avec Portfolio									
<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>	<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>	<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>	<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>	<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>
*0616	1	AKELU	2	KELUK	3	*LFS3	7	SE	9
AKITO	1	SUTAL	2	ALURA	4	HR	7	BAKIX	9
FLORY	1	DILAB	2	*3GTQ	5	LUMEL	7	BERUG	9
BAMEV	1	RESPO	2	GTQ	5	DJL	8	PHALO	9
SOREM	1	DO	2	TIRSO	5	DINOX	8	STR	9
TORPA	1	TUTAX	2	MIRGU	5	SIROD	8	MONCE	9
INTEM	1	GIVOR	2	EPIKO	5	TINIL	8	LFST	9
IXILU	1	SORAL	2	LASAT	5	KASON	8	OBORN	9
LOPSU	1	GIVRI	2	POGOL	5	RLP	8	ARPUS	10
RIGVI	1	LUSAR	2	MAKOT	5	*1239	8	LUL	10
MOROK	1	DIPIR	3	*BN1	6	LERDU	8	LFSB	10
OBAKI	1	LUKID	3	ALTIK	6	LFGJ	8		
EPL	2	IBABA	3	BLM	6	*SAV	9		

Table 5.3

Les résultats de sectorisation de la FIR Reims pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 avec portfolio.

Sectorisation FIR de Reims pour 10 secteurs sans Portfolio									
<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>	<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>	<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>	<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>	<i>Id</i> <i>site</i>	<i>N</i> [*] <i>sec</i>
*0616	1	ARPUS	1	TUTAX	1	IXILU	1	LUKID	3
EPL	1	DJL	1	EPIKO	1	LFST	1	IBABA	3
*3GTQ	1	LUL	1	LASAT	1	LOPSU	1	KELUK	3
GTQ	1	TIRSO	1	POGOL	1	RIGVI	1	*1239	4
*LFS3	1	BAKIX	1	RLP	1	MAKOT	1	KASON	5
HR	1	MIRGU	1	GIVOR	1	MOROK	1	ALURA	6
LUMEL	1	BAMEV	1	PHALO	1	OBAKI	1	LFGJ	7
*SAV	1	BERUG	1	STR	1	OBORN	1	LFSB	8
SE	1	SOREM	1	SORAL	1	LUSAR	1	*BN1	9
AKELU	1	DILAB	1	GIVRI	1	DINOX	2	BLM	9
SUTAL	1	RESPO	1	MONCE	1	SIROD	2	ALTIK	10
AKITO	1	TINIL	1	TORPA	1	LERDU	2		
FLORY	1	DO	1	INTEM	1	DIPIR	3		

Table 5.4

Les résultats de sectorisation de la FIR Reims pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 sans portfolio.

5.4. Résultats de la sectorisation

Sectorisation FIR de Reims pour 10 secteurs [150]									
<i>Id</i>	<i>N'</i>	<i>Id</i>	<i>N'</i>	<i>Id</i>	<i>N'</i>	<i>Id</i>	<i>N'</i>	<i>Id</i>	<i>N'</i>
<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>
*0616	1	SUTAL	1	DILAB	1	SORAL	1	OBORN	1
EPL	1	AKITO	1	RESPO	1	GIVRI	1	LUSAR	1
*3GTQ	1	FLORY	1	TINIL	1	MONCE	1	DINOX	2
GTQ	1	ARPUS	1	KASON	1	TORPA	1	SIROD	2
*BN1	1	DJL	1	DO	1	INTEM	1	LERDU	2
ALTIK	1	LUL	1	TUTAX	1	IXILU	1	LFGJ	2
BLM	1	TIRSO	1	EPIKO	1	*1239	1	DIPIR	3
*LFS3	1	BAKIX	1	LASAT	1	LFST	1	LUKID	3
HR	1	MIRGU	1	POGOL	1	LOPSU	1	IBABA	3
LUMEL	1	BAMEV	1	RLP	1	RIGVI	1	KELUK	3
*SAV	1	BERUG	1	GIVOR	1	MAKOT	1	ALURA	4
SE	1	SOREM	1	PHALO	1	MOROK	1		
AKELU	1	LFSB	1	STR	1	OBAKI	1		

Table 5.5

Les résultats de sectorisation de la FIR Reims pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 avec Trandac *et al.*

Commençons par le réseau d'espace aérien de Reims 5.12a, qui est divisé en dix secteurs $k=10$ pour 63 points (sites) et 92 routes aériennes en utilisant notre approche et celle de [150]. La répartition des charges de travail dans chaque secteur dans les 24 heures est illustrée à la figure 5.12a. En examinant cette figure, nous pouvons constater que l'outil BASS permet d'obtenir de meilleurs résultats d'équilibre de charge de travail par rapport aux charges de travail équilibrées idéales et la méthode [150]. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que notre approche de sectorisation s'appuie sur un résultat théorique fort, sur la manière d'utiliser la fonction d'agrégation OWA avec une pondération spécialisée afin d'assurer des valeurs objectives équitables. Ainsi, notre approche tend à offrir les meilleurs secteurs équitables en termes de charge de travail des contrôleurs en se concentrant sur tous les secteurs calculés, et pas uniquement sur les secteurs adjacents comme la méthode de [150].

En ce qui concerne l'espace aérien de Bordeaux, le réseau de routes aériennes est divisé en 25 secteurs, le résultat de la sectorisation étant présenté à la figure 5.12c. En outre, la figure 5.12b illustre la répartition de la charge de travail du réseau de la FIR Brest divisé en 10 partitions. Le constat que nous pouvons tirer de ces deux figures est que, globalement, notre outil BASS permet de calculer des secteurs toujours plus équitables par rapport à la charge de travail moyenne.

Nous observons également que les solutions de sectorisation de [150] sont loin d'être équitables et conduisent à plusieurs cas extrêmes avec des charges de travail très élevées / faibles.

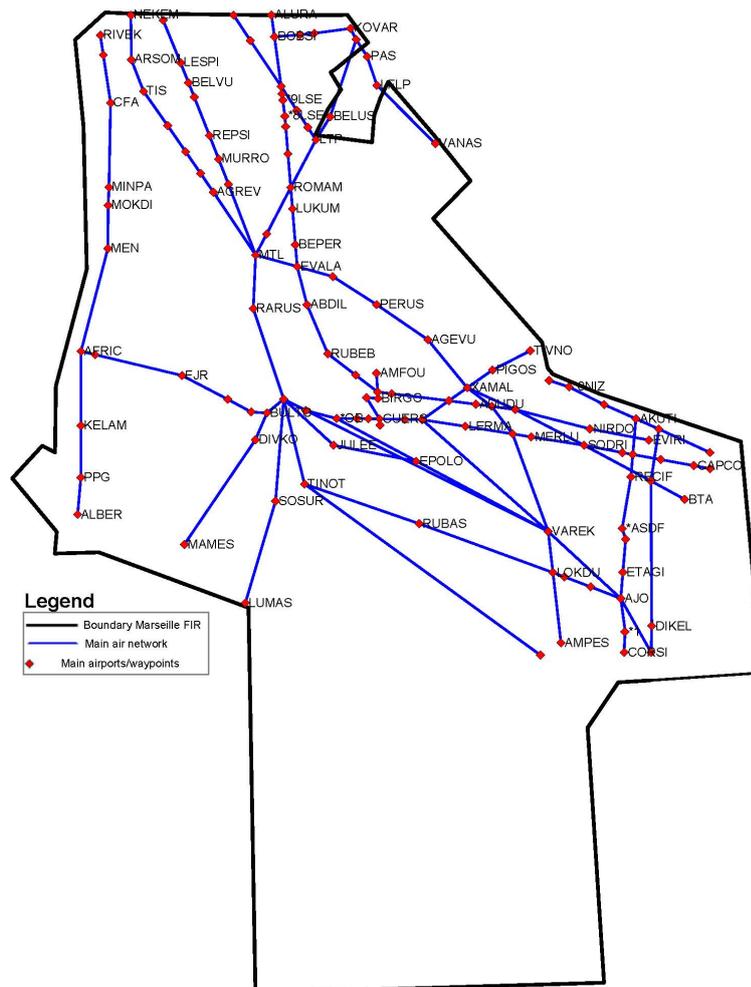
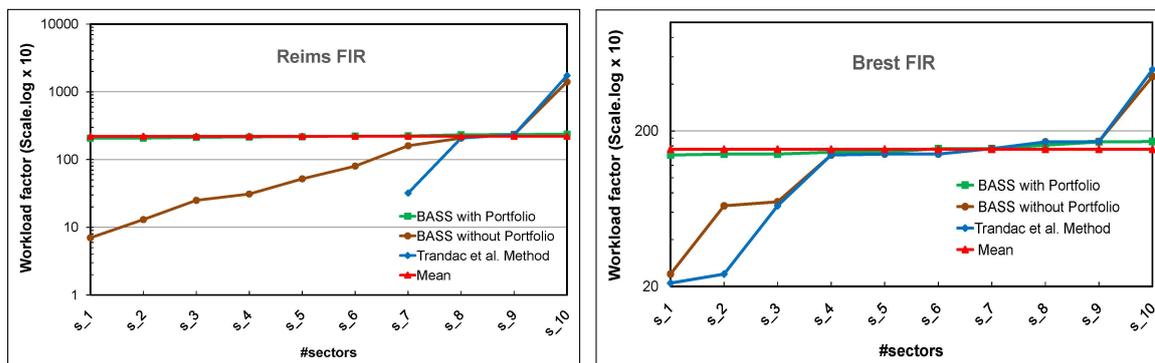
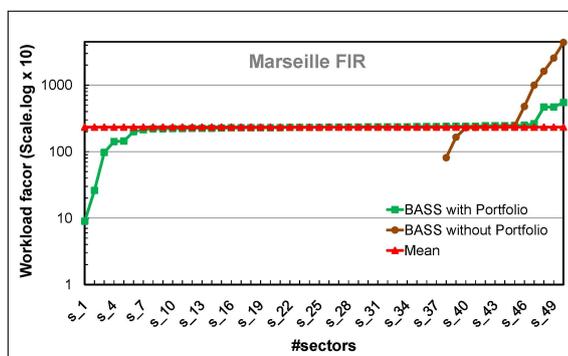


Figure 5.11 Réseau aérien de Marseille pendant 24 heures, le 07 juillet 2017.

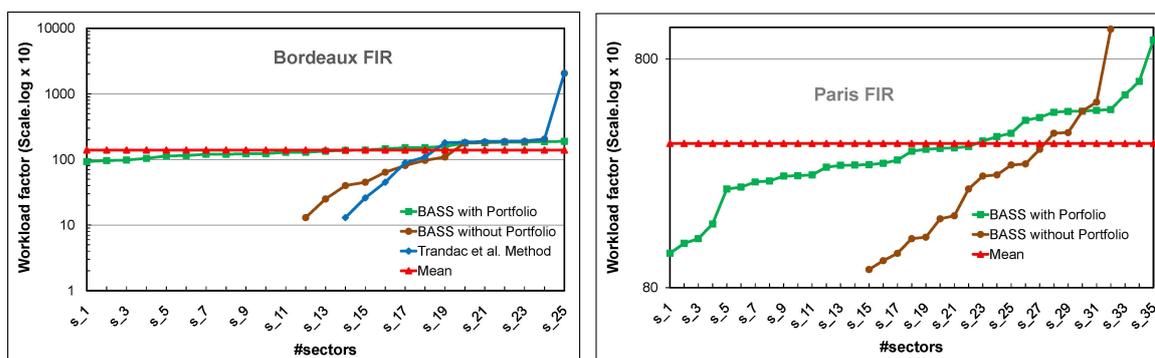
5.4. Résultats de la sectorisation



(a) Répartition de la charge de travail de la FIR de Reims. (b) Répartition de la charge de travail de la FIR de Brest.



(c) Répartition de la charge de travail de la FIR de Bordeaux.



(d) Répartition de la charge de travail de la FIR de Marseille. (e) Répartition de la charge de travail de la FIR de Paris.

Figure 5.12 Qualité de l'équilibre des sectorisations résultantes dans l'espace aérien français (07 juillet 2017).

La figure 5.12d présente les résultats de la sectorisation du réseau de l'espace aérien de Marseille en cinquante ($k = 50$) secteurs.

Sectorisation de la FIR Marseille pour 50 secteurs avec Portfolio									
<i>Id</i>	<i>N'</i>	<i>Id</i>	<i>N'</i>	<i>Id</i>	<i>N'</i>	<i>Id</i>	<i>N'</i>	<i>Id</i>	<i>N'</i>
<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>
DIVKO	1	AFRIC	6	NORKA	18	RETNO	28	RUBIT	34
MAMES	1	KELAM	6	PIGOS	18	LOKDU	28	RAPED	34
AGREV	2	MINPA	6	TIVNO	18	URATO	28	STP	34
ARSOM	2	PPG	6	ADUDU	19	MERLU	28	MILNO	35
TIS	2	MEN	6	ABDIL	20	VAREK	28	NIRDO	36
NEKEM	2	MOKDI	6	MTL	20	PERUS	28	LIBLO	37
PIMAK	2	ALBER	6	AMIKO	20	BULTO	29	BELUS	38
VEROT	2	*9LSE	7	BELVU	20	MTG	29	LERMA	39
SULOT	2	*LSE6	7	ONZON	20	JULEE	29	RUBAS	40
AJO	3	AMPES	8	EVALA	20	EPOLO	29	MAGOP	40
OKIVA	3	OBOBO	8	RARUS	20	SALIN	29	BOBSI	41
DIKEL	3	RIVEK	9	MURRO	20	POMEG	29	RONLA	41
CORSI	3	ROMGI	9	REPSI	20	SOSUR	29	MABES	41
*1	3	DIVUL	10	RATAP	21	TINOT	29	GUNPI	42
ETAGI	3	CAPCO	11	GIRED	22	BRUSC	30	EVIRI	43
DOBIM	3	MIRSA	11	RUBLO	22	FJR	30	RUBEB	44
LFLP	4	BEPER	12	ALURA	23	MARRI	30	*8LSE	45
VANAS	4	LUKUM	12	LUMAS	24	PIRAM	31	BUSIL	46
KOVAR	4	KURIR	13	CFA	25	AKUTI	32	LTP	47
MILPA	4	GILON	14	*0NIZ	26	*ASDF	32	LESPI	48
PAS	4	NASIK	14	KERIT	26	RECIF	32	BTA	49
BIRGO	5	OMANI	15	AMORO	27	SUDAS	32	ROMAM	50
AMFOU	5	*LL93	16	EBORA	28	DANBO	33		
CUERS	5	LUXAN	16	AGEVU	28	*OB	34		
ODEGA	5	UGLET	17	XAMAL	28	LANKO	34		
MEDUS	5	SODRI	18	OMARD	28	RIKPO	34		

Table 5.6

Les résultats de sectorisation de la FIR Marseille pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 avec porfolio.

5.4. Résultats de la sectorisation

Sectorisation de la FIR Marseille pour 50 secteurs sans Portfolio									
<i>Id</i>	<i>N°</i>	<i>Id</i>	<i>N°</i>	<i>Id</i>	<i>N°</i>	<i>Id</i>	<i>N°</i>	<i>Id</i>	<i>N°</i>
<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>	<i>site</i>	<i>sec</i>
BIRGO	1	KELAM	3	MILNO	3	*9LSE	5	*0NIZ	7
AMFOU	1	BRUSC	3	CAPCO	3	LUXAN	5	KERIT	7
CUERS	1	XAMAL	3	MOKDI	3	*LSE6	5	AMORO	8
ODEGA	1	FJR	3	POMEG	3	BOBSI	5	BUSIL	8
MEDUS	1	BULTO	3	SOSUR	3	BELUS	5	ABDIL	9
AJO	2	MTG	3	TINOT	3	LTP	5	AGEVU	9
OKIVA	2	DIVKO	3	VAREK	3	BEPER	5	MTL	9
DIKEL	2	CFA	3	RAPED	3	DANBO	5	AMIKO	9
RATAP	2	MINPA	3	EVIRI	3	GIRED	5	BELVU	9
GUNPI	2	MAMES	3	NORKA	3	RUBLO	5	ONZON	9
BTA	2	DIVUL	3	OBOBO	3	KOVAR	5	EVALA	9
CORSI	2	SODRI	3	ALBER	3	RONLA	5	RETNO	9
*1	2	NIRDO	3	RIVEK	3	MILPA	5	LESPI	9
AKUTI	2	OMARD	3	ROMGI	3	KURIR	5	RARUS	9
ETAGI	2	MARRI	3	RUBAS	3	ROMAM	5	MURRO	9
LIBLO	2	JULEE	3	STP	3	LUKUM	5	OMANI	9
DOBIM	2	EPOLO	3	LUMAS	3	MABES	5	REPSI	9
*ASDF	2	PPG	3	MAGOP	3	PAS	5	PERUS	9
RECIF	2	RUBIT	3	PIGOS	3	AGREV	6	RUBEB	10
SUDAS	2	LERMA	3	MIRSA	3	ARSOM	6	UGLET	11
*OB	3	LOKDU	3	TIVNO	3	TIS	6	GILON	12
LANKO	3	URATO	3	ALURA	4	NEKEM	6	NASIK	13
RIKPO	3	AMPES	3	LFLP	5	PIMAK	6		
ADUDU	3	SALIN	3	VANAS	5	VEROT	6		
EBORA	3	MEN	3	*8LSE	5	SULOT	6		
AFRIC	3	MERLU	3	*LL93	5	PIRAM	7		

Table 5.7

Les résultats de sectorisation de la FIR Marseille pendant 24 heures, le 07 juillet 2017 sans portfolio.

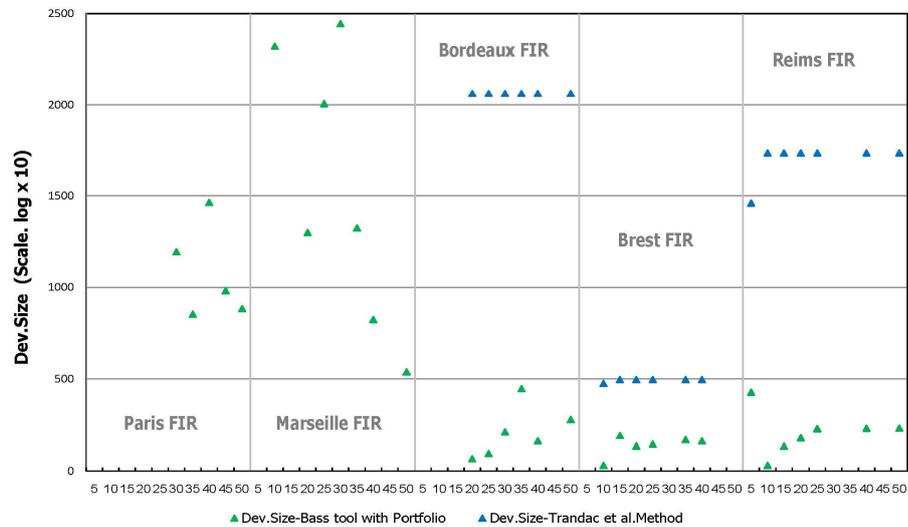
Cette figure montre clairement que l'ensemble des 50 secteurs de l'espace aérien marseillais sont globalement bien équilibrés en termes de répartition de la charge de travail, pas seulement les secteurs adjacents. En effet, la charge de travail de chaque secteur est proche de la charge de travail moyenne (parfaite). Ce résultat est cohérent avec les propriétés théoriques de notre approche concernant le principe de transfert qui assure la réduction des inégalités de charge de travail entre les secteurs. Sur cet exemple, la méthode de [150] n'a pas réussi à trouver une solution dans le délai imparti. Le même comportement est observé dans la FIR Paris avec le nombre de secteurs $k = 35$ (voir la figure 5.12e). Pour cet ensemble de données, seul notre outil BASS a trouvé une solution. Il est noté que les secteurs où leur charge de travail égale à zéro (0) ne sont pas représentés dans les différents graphes de la figure d'analyse qualitative de la sectorisation de l'espace aérien français.

Nous rappelons que, pour décider si une solution est meilleure qu'une autre, nous avons défini la charge de travail moyenne comme l'objectif idéal que nous pouvons atteindre sans aucune contrainte à satisfaire. Cependant, pour nos cas d'analyse comparative, plusieurs contraintes complexes doivent être prises en compte (par exemple, la convexité, la connectivité, etc.) lors de la recherche de la solution de sectorisation équilibrée optimale. Cela peut expliquer pourquoi nous ne pouvons pas atteindre la charge de travail moyenne idéale dans la pratique, même si notre approche reste optimale en termes d'équilibre.

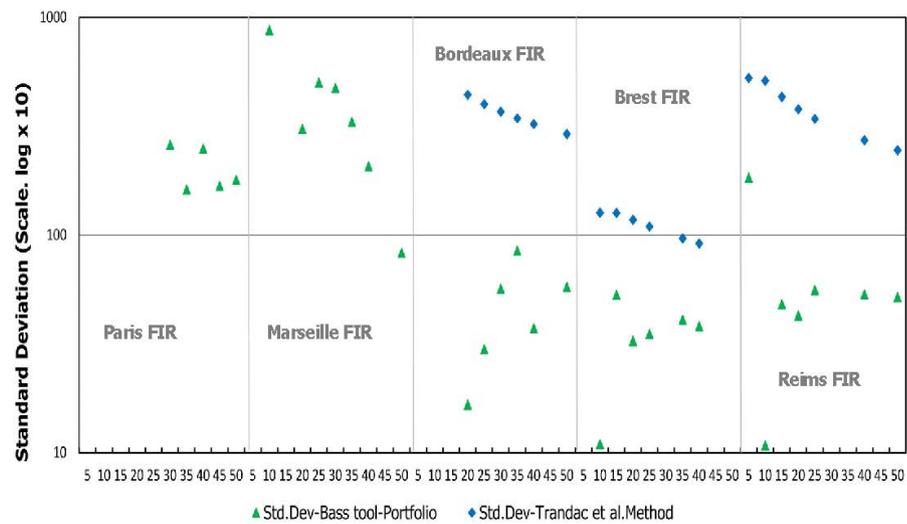
Une autre façon plus précise de réaliser une comparaison qualitative consiste à prendre en compte à la fois l'écart (entre les secteurs résultant les plus grands et les plus petits en termes de charge de travail) et l'écart type. Les résultats de cette analyse qualitative sont présentés aux figures (voir : 5.13(a) et 5.13(b)) respectivement. Pour les deux figures, nous nous concentrons uniquement sur les régions FIR Bordeaux, Brest et Reims où nous obtenons un résultat pour les deux approches (outils BASS et ([150])). Comme le montre la figure 5.13(a), il est facile de constater que les résultats de sectorisation de notre outil sont très satisfaisants et dépassent de plusieurs ordres de grandeur la deuxième approche, en particulier pour les FIR Bordeaux et Reims. En considérant la figure 5.13(b), nous observons que la disparité entre les deux approches est plus prononcée en termes de mesure d'écart-type. Cette figure montre une grande domination de notre outil BASS parallèle par rapport à l'approche PPC de [150], pour tous les jeux de données d'analyse comparative,

5.5. Conclusion

tout en réalisant une sectorisation équitable de haute qualité.



(a) Comparaison d'écart minimum.



(b) Comparaison de l'écart type.

Figure 5.13 Comparaison qualitative des approches de PPC sur l'espace aérien de la France.

5.5 Conclusion

Le nombre d'aéronefs dans l'espace aérien est en perpétuelle évolution à l'avenir. Nous avons évalué le nombre d'aéronefs pouvant être contrôlés plus uniformément d'un

secteur à l'autre par les contrôleurs aériens. Une méthode basée sur un PPC et une fonction d'agrégation exacte (basée sur la méthode OWA) a été développée pour créer des secteurs dont la charge de contrôle doit être équilibrée entre les secteurs.

Trois périodes différentes (heures de pointe - heures creuse et 24 heures) de l'espace aérien algérien et cinq espaces aériens français différents ont été utilisées pour tester la méthode proposée. Une mise en œuvre efficace d'une méthode de portfolio sur le modèle EQASP a été proposée pour accélérer considérablement les performances de calcul. Nous avons mis en œuvre la méthode parallèle de Portfolio pour les grandes instances car le modèle EQASP standard prenait beaucoup de temps. L'équilibre de charge des secteurs aériens ATC a été comparé aux valeurs calculées avec l'approche de [150]. Notre outil BASS a créé de meilleurs secteurs pour équilibrer la charge de travail sur la base d'un équilibre idéal des charges de travail. En termes de performance, il convient de noter que BASS avec stratégie de portfolio améliore considérablement les performances en termes de temps de calcul (CPU) par rapport à la version séquentielle de toutes les instances testées.

Nous soutenons que notre approche PPC parallèle basée sur OWA tend à offrir le meilleur compromis entre résolution de problèmes et sectorisation équilibrée. Nous soulignons également que notre outil parallèle a la propriété à *anytime*, ce qui signifie qu'il fournit à tout moment, lors de la résolution, une solution de sectorisation exploitable qui satisfait à toutes les contraintes géométriques de la sectorisation. C'est une fonctionnalité intéressante, en particulier lors de la résolution de grandes instances.

Conclusion générale et Perspectives

L'étude bibliographique nous a permis de mettre en évidence les méthodes pour obtenir des sectorisations de l'espace aérien et d'aborder le problème de l'équilibre des secteurs à la lumière de nombreux critères géométriques. Cette étude a mis en évidence à la fois l'importance et les difficultés fondamentales de choisir l'équilibre le plus approprié au problème du redécoupage de l'espace aérien, ainsi que la nécessité de déterminer les secteurs équilibrés en terme de charge de travail dans un délai approprié.

Notre approche intègre l'équité dans l'approche de [150], où un modèle PPC a été établi pour modéliser les contraintes géométriques de sectorisation (c'est-à-dire le temps minimal de traversée de secteur, la distance minimale, les contraintes de convexité et de connectivité). Les auteurs (Trandac, Baptiste et Duong) ont proposé une contrainte d'équilibre imposant à chaque secteur de disposer d'une charge de travail comprise entre deux bornes (intervalles). Fixer les limites n'est donc jamais facile, car rien ne garantit que les solutions équilibrées optimales (ou réalisables) sont préservées. De plus, il devrait y avoir beaucoup de solutions entre ces limites, et il n'y a aucun moyen de choisir la meilleure. C'est pourquoi, nous proposons un nouveau modèle d'équité (EQASP), qui garantit de trouver les meilleures solutions équitables sans exiger aucun paramètre (limite).

Notre modèle repose sur l'optimisation multiagents OWA, qui permet de trouver des solutions optimales et équitables. Elle comprend deux parties principales :

- Concevoir des secteurs de contrôles équilibrés en tenant comptes les contraintes géométriques de l'espace aérien.
- Améliorer les performances de résolution de problèmes du découpage de l'espace aérien afin d'avoir un espace aérien efficace et flexible pour faire face aux fluctuations quotidiennes du trafic provoquées par plusieurs facteurs tels que la forte demande.

La méthode globale de résolution proposée est basée sur la représentation initiale

de la structure de l'espace aérien par un graphe pondéré où chaque nœud représente un aéroport, une balise ou point de croisement, . . . etc. et chaque arête représente la relation directe entre deux aéroports (routes aériennes). Ensuite, le poids de chaque nœud représente la somme des charges de travail de surveillance et de conflit et le poids de chaque arête représente la charge de coordination entre les secteurs adjacents. Il consiste à trouver un partitionnement optimal des secteurs de contrôle en termes de charges de travail en plusieurs périodes sous des contraintes géométriques.

Dans le cadre de notre expérimentation, nous avons également introduit une architecture de portfolio coopérative parallèle capable de gérer efficacement le redécoupage de l'espace aérien pour les grandes instances en se basant sur notre outil développé nommé BASS (Standard et portfolio), où nous avons mis en œuvre diverses stratégies de recherche :

- stratégie de recherche par activité (*Activity based search strategy, (ABS)*);
- stratégie de redémarrage : après chaque nouvelle solution (*Restarts strategy : After each new solution*);
- Branchement sur la valeur avec le meilleur objectif borné (*Branching on the value with the best objective bound*);
- Branchement sur la variable non instanciée ayant la plus petite taille de domaine à sa limite inférieure (*IntVarSearch*);
- Recherche dans le grand voisinage (*Large Neighborhood Search (LNS)*);
- Sélectionne de manière aléatoire une variable et l'assigne à une valeur de manière aléatoire;
- WDegSearch (L'heuristique de degré pondéré (wdeg) (*WDegSearch*)).

Aussi, une heuristique de [91], afin d'affiner le solveur et d'améliorer les performances de résolution.

Pour observer l'impact de notre modèle sur les flux de trafics, nous l'avons comparé à l'approche concurrentielle proposée par [150], sur des données de trafic aérien réel, afin d'obtenir une sectorisation équilibrée.

Pour évaluer la répartition de la charge de travail entre les secteurs, nous avons testé avec succès deux ensembles de données de référence de différentes tailles.

Le premier jeu de données concerne l'espace aérien algérien à basse altitude (\leq FL280) pendant trois périodes différentes (heures creuse, heures de pointe et une journée complète de 24 heures) pour le même jour et le second concerne l'espace aérien français, aussi à basse altitude (\leq FL195) pour cinq régions de FIRs pendant 24 heures de vol durant une journée complète : la capacité opérationnelle d'un secteur de contrôle est mesurée par le nombre maximal d'aéronefs capables de traverser le secteur au cours d'une période donnée.

L'algorithme EQASP développé a produit de bons résultats, appliqués à différents FIRs. Pour les :

- **Mesure qualitatives** : Nous avons constaté que, par rapport à l'approche [150], notre outil BASS a généré de meilleurs secteurs en termes d'équilibrage de charge de travail en fonction de l'équilibre idéal des charges de travail.
- **Performances** : La méthode présentée dans cette étude permet à BASS avec une stratégie de portfolio d'améliorer considérablement les performances de résolution sur la version séquentielle de sur tous les cas de comparaison.

En résumé, notre nouvelle méthode proposée basée sur une équité stricte appliquée à la sectorisation de l'espace aérien offre une solution efficace qui constitue un bon compromis entre la qualité de la solution et la durée d'exécution.

Notre approche ouvre par ailleurs de nombreuses perspectives d'amélioration et d'extension, par exemple :

Pour améliorer la robustesse de la conception du secteur développé par notre modèle (EQASP), on pourrait envisager d'ajouter plus de critères et de contraintes qui peuvent être inclus dans la conception du secteur : **la structure de l'espace aérien terminal en présence de conditions météorologiques défavorables, Disponibilité du personnel (ressources humaines), activité militaire (zones d'entraînements), la taille du secteur, la forme du secteur, le nombre de trajectoires situées le long des frontières des secteurs.**

Aussi, une perspective plus intéressante serait de résoudre les problèmes de sectorisation où il est nécessaire d'obtenir une solution instantanée. Il est clair de ce contexte qu'une solution exacte et complète ne peut être obtenue instantanément. Il est difficile

Conclusion générale et perspectives

d'obtenir une solution rapide tout en maintenant une équité et une exactitude strictes tout en ne conservant que des contraintes critiques, avec une durée de fonctionnement rapide.

Annexe A : Equitable optimized airspace sectorization based on constraint programming and OWA aggregation

Ci-joint en annexe A les travaux de recherche doctorale sous forme de papier journal.

Références bibliographiques

- [1] Report commissioned by the performance review commission. <https://www.eurocontrol.int/ACE/ACE-Reports/ACE2013.pdf>, May 2015.
- [2] Statistiques du trafic aérien. <https://www.enna.dz/statistiques.html>, 2016.
- [3] Faa aerospace forecast. https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2018-38_FAA_Aerospace_Forecast.pdf, 2018.
- [4] AGGOUN, A., AND BELDICEANU, N. Extending chip in order to solve complex scheduling and placement problems. *Mathematical and computer modelling* 17, 7 (1993), 57–73.
- [5] ALBAKER, B., AND RAHIM, N. A survey of collision avoidance approaches for unmanned aerial vehicles. In *2009 international conference for technical postgraduates (TECHPOS)* (2009), IEEE, pp. 1–7.
- [6] ALLIGNOL, C., BARNIER, N., FLENER, P., AND PEARSON, J. Constraint programming for air traffic management : a survey.
- [7] ALLIOT, J.-M., AND DE VERDIÈRE, D. C. Atm : 20 ans d’effort et perspectives. In *Symposium de l’Académie Nationale de l’Air et de l’Espace : vers l’automatisation du vol et sa gestion* (2003).
- [8] AMADINI, R. *Portfolio approaches in constraint programming*. Thèse de doctorat, 2015.
- [9] AN, B., CHENG, P., AND ZOU, X. A smart airspace sectorization approach based on spectral clustering and nsga-ii. In *2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2)* (2015), IEEE, pp. 1–6.
- [10] ARTIOUCHINE, K., BAPTISTE, P., AND DÜRR, C. Runway sequencing with holding patterns. *European Journal of Operational Research* 189, 3 (2008), 1254–1266.
- [11] AUDEMARD, G., HOESSEN, B., JABBOUR, S., LAGNIEZ, J.-M., AND PIETTE, C. Revisiting clause exchange in parallel sat solving. In *International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing* (2012), Springer, pp. 200–213.
- [12] AUDEMARD, G., HOESSEN, B., JABBOUR, S., AND PIETTE, C. Dolius : A distributed parallel sat solving framework. In *POS@ SAT* (2014), Citeseer, pp. 1–11.

Références bibliographiques

- [13] BALYO, T., SANDERS, P., AND SINZ, C. Hordesat : A massively parallel portfolio sat solver. In *International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing* (2015), Springer, pp. 156–172.
- [14] BARNHART, C., BELOBABA, P., AND ODONI, A. R. Applications of operations research in the air transport industry. *Transportation science* 37, 4 (2003), 368–391.
- [15] BARNIER, N., AND ALLIGNOL, C. Combining flight level allocation with ground holding to optimize 4d-deconfliction.
- [16] BARNIER, N., AND ALLIGNOL, C. Trajectory deconfliction with constraint programming.
- [17] BARNIER, N., AND BRISSET, P. Graph coloring for air traffic flow management. *Annals of operations research* 130, 1-4 (2004), 163–178.
- [18] BASU, A., MITCHELL, J. S., AND SABHNANI, G. K. Geometric algorithms for optimal airspace design and air traffic controller workload balancing. *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)* 14 (2010), 2–3.
- [19] BECK, J. C., AND PERRON, L. Discrepancy-bounded depth first search. In *Proceedings of CP-AI-OR* (2000), pp. 7–17.
- [20] BERTSIMAS, D., AND PATTERSON, S. S. The air traffic flow management problem with enroute capacities. *Operations research* 46, 3 (1998), 406–422.
- [21] BICHOT, C.-E. Optimisation du découpage de l’espace aérien par diverses méta-heuristiques. *Mémoire de DEA, DEA Systèmes informatique du LAAS* (2004), 27–118.
- [22] BICHOT, C.-E. A metaheuristic based on fusion and fission for partitioning problems. In *Proceedings 20th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium* (2006), IEEE, pp. 8–pp.
- [23] BICHOT, C.-E. A new method, the fusion fission, for the relaxed k-way graph partitioning problem, and comparisons with some multilevel algorithms. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 6, 3 (2007), 319–344.
- [24] BICHOT, C.-E., AND ALLIOT, J.-M. A theoretical approach to defining the european core area. *Submission for ATM* (2005).
- [25] BIERE, A. Yet another local search solver and lingeling and friends entering the sat competition 2014. *Sat competition 2014*, 2 (2014), 65.
- [26] BIJARBOONEH, F. H., FLENER, P., AND PEARSON, J. Dynamic demand-capacity balancing for air traffic management using constraint-based local search : First results. *arXiv preprint arXiv :0910.1239* (2009).

- [27] BLOEM, M., AND GUPTA, P. Configuring airspace sectors with approximate dynamic programming.
- [28] BLOMDAHL, K. S., FLENER, P., AND PEARSON, J. Contingency plans for air traffic flow and capacity management using constraint programming. *Journal of Aerospace Operations* 1, 3 (2012), 249–266.
- [29] BOUSSEMART, F., HEMERY, F., LECOUTRE, C., AND SAIS, L. Boosting systematic search by weighting constraints. In *ECAI* (2004), vol. 16, p. 146.
- [30] BRINTON, C., HINKEY, J., AND LEIDEN, K. Airspace sectorization by dynamic density. In *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO) and Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium (ANERS)* (2009), p. 7102.
- [31] CARLIER, S., DE LÉPINAY, I., HUSTACHE, J.-C., AND JELINEK, F. Environmental impact of air traffic flow management delays. In *7th USA/Europe air traffic management research and development seminar (ATM2007)* (2007), vol. 2, p. 16.
- [32] CHANQUOY, L., TRICOT, A., AND SWELLER, J. *La charge cognitive : Théorie et applications*. Armand Colin, 2007.
- [33] CHEMLA, D., DIAZ, D., KERLIRZIN, P., AND MANCHON, S. Using clp (fd) to support air traffic flow management. In *3rd International Conference on the Practical Application of Prolog, Paris, France* (1995).
- [34] CHEN, J. *Computational geometry : Methods and applications*, 1996.
- [35] CHONG, K.-M. An induction theorem for rearrangements. *Canadian Journal of Mathematics* 28, 1 (1976), 154–160.
- [36] CHONG, Y. L., AND HAMADI, Y. Distributed log-based reconciliation. In *ECAI* (2006), vol. 141, pp. 108–112.
- [37] CHRABAKH, W., AND WOLSKI, R. The gridsat portal : a grid web-based portal for solving satisfiability problems using the national cyberinfrastructure. *Concurrency and Computation : Practice and Experience* 19, 6 (2007), 795–808.
- [38] CHU, G., STUCKEY, P. J., AND HARWOOD, A. Pminisat : a parallelization of minisat 2.0. *SAT race* (2008).
- [39] COMMISSION, E. P. R., ET AL. Evaluation of civil/military airspace utilisation, 2007.
- [40] CONKER, R. S., MOCH-MOONEY, D. A., NIEDRINGHAUS, W. P., AND SIMMONS, B. T. New process for "clean sheet" airspace design and evaluation. In *7th US/Europe ATM Seminar* (2007).
- [41] COOK, A. J., AND TANNER, G. European airline delay cost reference values.

Références bibliographiques

- [42] COOK, A. J., TANNER, G., AND ANDERSON, S. Evaluating the true cost to airlines of one minute of airborne or ground delay.
- [43] COOK, A. J., TANNER, G., JOVANOVIĆ, R., AND LAWES, A. The cost of delay to air transport in europe : quantification and management. In *13th Air Transport Research Society (ATRS) World Conference* (2009).
- [44] CORRÊA, R., AND FERREIRA, A. A distributed implementation of asynchronous parallel branch and bound. In *Parallel Algorithms for Irregular Problems : State of the Art*. Springer, 1995, pp. 157–176.
- [45] DALAMAGKIDIS, K., VALAVANIS, K. P., AND PIEGL, L. A. On unmanned aircraft systems issues, challenges and operational restrictions preventing integration into the national airspace system. *Progress in Aerospace Sciences* 44, 7-8 (2008), 503–519.
- [46] DEGRAND, J., AND MERCIER, E. Load capacity constraint regulation. *EEC Note 2* (2000), 2000.
- [47] DELAHAYE, D. *Optimisation de la sectorisation de l'espace aérien par algorithmes génétiques*. Thèse de doctorat, École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace (Toulouse ; 1972 . . . , 1995).
- [48] DELAHAYE, D., ALLIOT, J.-M., SCHOENAUER, M., AND FARGES, J.-L. Genetic algorithms for partitioning air space. In *Proceedings of the Tenth Conference on Artificial Intelligence for Applications* (1994), IEEE, pp. 291–297.
- [49] DELAHAYE, D., ALLIOT, J.-M., SCHOENAUER, M., AND FARGES, J.-L. Genetic algorithms for automatic regroupment of air traffic control sectors. In *EP1995, 4th Annual Conference on Evolutionary Programming* (1995), pp. pp-xxxx.
- [50] DELAHAYE, D., SCHOENAUER, M., AND ALLIOT, J.-M. Airspace sectoring by evolutionary computation. In *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No. 98TH8360)* (1998), IEEE, pp. 218–223.
- [51] DOPAGNE, J. The european air traffic management response to volcanic ash crises : Towards institutionalised aviation crisis management. *Journal of Business Continuity & Emergency Planning* 5, 2 (2011), 103–117.
- [52] DREW, M. Analysis of an optimal sector design method. In *2008 IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference* (2008), IEEE, pp. 3–B.
- [53] DUBOIS, D., AND FORTTEMPS, P. Computing improved optimal solutions to max–min flexible constraint satisfaction problems. *European Journal of Operational Research* 118, 1 (1999), 95–126.

- [54] DUONG, V., GAWINOWSKI, G., NICOLAON, J.-P., AND SMITH, D. Sector-less air traffic management. In *Proceedings of the fourth USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar* (2001), pp. 8–13.
- [55] DUPONT, X. *Programmation par contraintes sur les flux de données*. Thèse de doctorat, 2014.
- [56] DURAND, N., ALLIOT, J.-M., AND CHANSOU, O. Optimal resolution of en route conflicts. In *Proceedings of the 1rst USA/Europe Seminar* (1997).
- [57] EHRENCRONA KJELLIN, P. Airspace sectorisation using constraint-based local search, 2014.
- [58] FERGUSON, J., KARA, A. Q., HOFFMAN, K., AND SHERRY, L. Estimating domestic us airline cost of delay based on european model. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies 33* (2013), 311–323.
- [59] FLENER, P., AND PEARSON, J. Propagators and violation functions for geometric and workload constraints arising in airspace sectorisation. *arXiv preprint arXiv :1401.7463* (2014).
- [60] FLENER, P., PEARSON, J., ÅGREN, M., GARCIA-AVELLO, C., CELIKTIN, M., AND DISSING, S. Air-traffic complexity resolution in multi-sector planning. *Journal of Air Transport Management 13*, 6 (2007), 323–328.
- [61] FLYNN, G., LELEU, C., AND ZERROUKI, L. Traffic complexity indicators and sector typology analysis of us and european centres. *EEC Note 20* (2003).
- [62] FREUDER, E. C., AND ELFE, C. D. Neighborhood inverse consistency preprocessing. In *AAAI/IAAI, Vol. 1* (1996), pp. 202–208.
- [63] FREUDER, E. C., AND WALLACE, R. J. Partial constraint satisfaction. In *International Workshop on Over-Constrained Systems* (1995), Springer, pp. 63–110.
- [64] GERDES, I., TEMME, A., AND SCHULTZ, M. Dynamic airspace sectorization using controller task load. *6th SESAR Innovation Days* (2016).
- [65] GERDES, I., TEMME, A., AND SCHULTZ, M. Dynamic airspace sectorisation for flight-centric operations. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies 95* (2018), 460–480.
- [66] GHORPADE, S. Airspace configuration model using swarm intelligence based graph partitioning. In *2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (2016), IEEE, pp. 1–5.
- [67] GIANAZZA, D. Forecasting workload and airspace configuration with neural networks and tree search methods. *Artificial intelligence 174*, 7-8 (2010), 530–549.

Références bibliographiques

- [68] GIANAZZA, D., AND ALLIOT, J.-M. Optimization of air traffic control sector configurations using tree search methods and genetic algorithms. In *Proceedings. The 21st Digital Avionics Systems Conference* (2002), vol. 1, IEEE, pp. 2A5–2A5.
- [69] GIANAZZA, D., ALLIOT, J.-M., AND GRANGER, G. Optimal combinations of air traffic control sectors using classical and stochastic methods.
- [70] GIANAZZA, D., AND GUITTET, K. Selection and evaluation of air traffic complexity metrics. In *2006 IEEE/AIAA 25TH Digital Avionics Systems Conference* (2006), IEEE, pp. 1–12.
- [71] GIMENES, R. A., CORREA, M. A., CAMARGO, J. B., AVELINO, V. F., VIS-MARI, L. F., CUGNASCA, P. S., ROSSI, M. A., AND ALMEIDA, J. R. Guidelines for integration of autonomous uas in global atm. In *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (2013), IEEE, pp. 994–1003.
- [72] GOLDEN, B., AND PERNY, P. Infinite order lorenz dominance for fair multiagent optimization. In *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems : volume 1-Volume 1* (2010), pp. 383–390.
- [73] GRÄBENER, T., AND BERRO, A. Optimisation multiobjectif discrète par propagation de contraintes.
- [74] GU, J. Parallel algorithms and architectures for very fast ai search.
- [75] HAMADI, Y., JABBOUR, S., AND SAIS, J. Control-based clause sharing in parallel sat solving. In *Autonomous Search*. Springer, 2011, pp. 245–267.
- [76] HAMADI, Y., JABBOUR, S., AND SAIS, L. Manysat : a parallel sat solver. *Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation* 6, 4 (2010), 245–262.
- [77] HARALICK, R. M., AND ELLIOTT, G. L. Increasing tree search efficiency for constraint satisfaction problems. *Artificial intelligence* 14, 3 (1980), 263–313.
- [78] HEULE, M. J., KULLMANN, O., WIERINGA, S., AND BIERE, A. Cube and conquer : Guiding cdcl sat solvers by lookaheads. In *Haifa Verification Conference* (2011), Springer, pp. 50–65.
- [79] HILBURN, B. Cognitive complexity in air traffic control : A literature review. *EEC note* 4, 04 (2004).
- [80] HILDUM, D. W., AND SMITH, S. F. Constructing conflict-free schedules in space and time. In *ICAPS* (2007), pp. 184–191.
- [81] HILDUM, D. W., AND SMITH, S. F. Scheduling safe movement of air traffic in crowded air spaces. *The Knowledge Engineering Review* 27, 3 (2012), 309.

- [82] HISTON, J. M., HANSMAN, R. J., GOTTLIEB, B., KLEINWAKS, H., YENSON, S., DELAHAYE, D., AND PUECHMOREL, S. Structural considerations and cognitive complexity in air traffic control. In *Proceedings. The 21st Digital Avionics Systems Conference* (2002), vol. 1, IEEE, pp. 1C2–1C2.
- [83] ISLAMI, A., CHAIMATANAN, S., SUN, M., AND DELAHAYE, D. Optimization of military missions impact on civilian 4d trajectories.
- [84] JAFFAR, J., SANTOSA, A. E., YAP, R. H., AND ZHU, K. Q. Scalable distributed depth-first search with greedy work stealing. In *16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence* (2004), IEEE, pp. 98–103.
- [85] JÄGARE, P. Airspace sectorisation using constraint programming, 2011.
- [86] JEAN-CHARLES, R. E. Generalized arc consistency for global cardinality constraint. *American Association for Artificial Intelligence (AAAI'96)* (1996), 209–215.
- [87] JUNG, J., VERMA, S. A., ZELINSKI, S. J., KOZON, T. E., AND STURRE, L. Assessing resilience of scheduled performance-based navigation arrival operations.
- [88] JUNKER, U. Air traffic flow management with heuristic repair. *The Knowledge Engineering Review* 27, 3 (2012), 333.
- [89] JUSSIEN, N., AND BARICHARD, V. The palm system : explanation-based constraint programming. In *Proceedings of TRICS : Techniques foR Implementing Constraint programming Systems, a post-conference workshop of CP* (2000), vol. 2000, pp. 118–133.
- [90] KERLIRZIN, P., MANCHON, S., PLUSQUELLEC, C., AND GOTTELAND, J.-B. Building and evaluating a minimal regulation scheme.
- [91] KERNIGHAN, B. W., AND LIN, S. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs. *The Bell system technical journal* 49, 2 (1970), 291–307.
- [92] KICINGER, R., AND YOUSEFI, A. Heuristic method for 3d airspace partitioning : Genetic algorithm and agent-based approach. In *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO) and Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium (ANERS)* (2009), p. 7058.
- [93] KISTAN, T., GARDI, A., SABATINI, R., RAMASAMY, S., AND BATUWANGALA, E. An evolutionary outlook of air traffic flow management techniques. *Progress in Aerospace Sciences* 88 (2017), 15–42.
- [94] KLEIN, A. An efficient method for airspace analysis and partitioning based on equalized traffic mass. In *Proceedings of the 6th USA/Europe Air Traffic Management R & D Seminar* (2005).

Références bibliographiques

- [95] KLEIN, A., RODGERS, M. D., AND KAING, H. Dynamic fpas : A new method for dynamic airspace configuration. In *2008 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference* (2008), IEEE, pp. 1–11.
- [96] KLOOSTER, J., WICHMAN, K., AND BLEEKER, O. 4d trajectory and time-of-arrival control to enable continuous descent arrivals. In *AIAA Guidance, navigation and control conference and exhibit* (2008), p. 7402.
- [97] KOPARDEKAR, P. Dynamic density : A review of proposed variables. *FAA WJHTC internal document. overall conclusions and recommendations, Federal Aviation Administration* (2000).
- [98] KOPARDEKAR, P., BILIMORIA, K., AND SRIDHAR, B. Initial concepts for dynamic airspace configuration. In *7th AIAA ATIO Conf, 2nd CEIAT Int'l Conf on Innov and Integr in Aero Sciences, 17th LTA Systems Tech Conf; followed by 2nd TEOS Forum* (2007), p. 7763.
- [99] KOPARDEKAR, P., AND MAGYARITS, S. Measurement and prediction of dynamic density. In *Proceedings of the 5th usa/europe air traffic management r & d seminar* (2003), vol. 139.
- [100] KOSTREVA, M. M., OGRYCZAK, W., AND WIERZBICKI, A. Equitable aggregations and multiple criteria analysis. *European Journal of Operational Research* 158, 2 (2004), 362–377.
- [101] KUCHAR, J. K., AND YANG, L. C. A review of conflict detection and resolution modeling methods. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems* 1, 4 (2000), 179–189.
- [102] KULKARNI, S., GANESAN, R., AND SHERRY, L. Static sectorization approach to dynamic airspace configuration using approximate dynamic programming. In *2011 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings* (2011), IEEE, pp. J2–1.
- [103] LAI, T.-H., AND SPRAGUE, A. Performance of parallel branch-and-bound algorithms. *IEEE Transactions on Computers* 100, 10 (1985), 962–964.
- [104] LECHNER, P., TUPPER, A., GUFFANTI, M., LOUGHLIN, S., AND CASADEVALL, T. Volcanic ash and aviation—the challenges of real-time, global communication of a natural hazard. In *Observing the Volcano World*. Springer, 2017, pp. 51–64.
- [105] LECOUTRE, C. *Constraint Networks : Targeting Simplicity for Techniques and Algorithms*. John Wiley & Sons, 2013.
- [106] LEEUWEN, P. V., AND VAN HANXLEDEN HOUWERT, N. Scheduling aircraft using constraint relaxation.

- [107] LEIDEN, K., PETERS, S., AND QUESADA, S. Flight level-based dynamic airspace configuration. In *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO) and Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium (ANERS)* (2009), p. 7104.
- [108] LESCA, J., AND PERNY, P. Lp solvable models for multiagent fair allocation problems. In *ECAI* (2010), pp. 393–398.
- [109] LEVY, H. Stochastic dominance and expected utility : survey and analysis. *Management science* 38, 4 (1992), 555–593.
- [110] LI, J., WANG, T., HWANG, I., AND HWANG, I. A spectral clustering based algorithm for dynamic airspace configuration. In *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO) and Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium (ANERS)* (2009), p. 7056.
- [111] MARSHALL, A. W., OLKIN, I., AND ARNOLD, B. C. *Inequalities : theory of majorization and its applications*, vol. 143. Springer, 1979.
- [112] MARTÍN CAMPO, F. J. The collision avoidance problem : Methods and algorithms.
- [113] MARTINEZ, S., CHATTERJI, G., SUN, D., AND BAYEN, A. A weighted-graph approach for dynamic airspace configuration. In *Aiaa guidance, navigation and control conference and exhibit* (2007), p. 6448.
- [114] MENOUEUR, T. *Parallélisations de méthodes de programmation par contraintes*. Thèse de doctorat, Versailles-St Quentin en Yvelines, 2015.
- [115] MENOUEUR, T., AND LE CUN, B. Anticipated dynamic load balancing strategy to parallelize constraint programming search. In *2013 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, Workshops and Phd Forum* (2013), IEEE, pp. 1771–1777.
- [116] MENOUEUR, T., AND LE CUN, B. Parallélisation portfolio de solveur ppc.
- [117] MICHEL, L., AND VAN HENTENRYCK, P. Activity-based search for black-box constraint programming solvers. In *International Conference on Integration of Artificial Intelligence (AI) and Operations Research (OR) Techniques in Constraint Programming* (2012), Springer, pp. 228–243.
- [118] MITCHELL, J., SABHNANI, G., HOFFMAN, R., KROZEL, J., AND YOUSEFI, A. Dynamic airspace configuration management based on computational geometry techniques. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit* (2008), p. 7225.
- [119] MONTANARI, U. Networks of constraints : Fundamental properties and applications to picture processing. *Information sciences* 7 (1974), 95–132.

Références bibliographiques

- [120] MOSKEWICZ, M. W., MADIGAN, C. F., ZHAO, Y., ZHANG, L., AND MALIK, S. Chaff : Engineering an efficient sat solver. In *Proceedings of the 38th annual Design Automation Conference* (2001), pp. 530–535.
- [121] MOULIN, H. *Axioms of cooperative decision making*. No. 15. Cambridge university press, 1991.
- [122] NOSEDAL, J., PIERA, M. A., RUIZ, S., AND NOSEDAL, A. An efficient algorithm for smoothing airspace congestion by fine-tuning take-off times. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 44 (2014), 171–184.
- [123] O’MAHONY, E., HEBRARD, E., HOLLAND, A., NUGENT, C., AND O’SULLIVAN, B. Using case-based reasoning in an algorithm portfolio for constraint solving. In *Irish conference on artificial intelligence and cognitive science* (2008), pp. 210–216.
- [124] PAUBEL, P.-V. *Évaluation d’un système de résolution de conflits, ERASMUS : apport de l’oculométrie comme mesure de la charge mentale chez les contrôleurs aériens en-route*. Thèse de doctorat, 2011.
- [125] PEJOVIC, T., WILLIAMS, V. A., NOLAND, R. B., AND TOUMI, R. Factors affecting the frequency and severity of airport weather delays and the implications of climate change for future delays. *Transportation research record* 2139, 1 (2009), 97–106.
- [126] PROSSER, P. Domain filtering can degrade intelligent backtracking search. In *IJCAI* (1993), Citeseer, pp. 262–267.
- [127] PROSSER, P., STERGIOU, K., AND WALSH, T. Singleton consistencies. In *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming* (2000), Springer, pp. 353–368.
- [128] PRUD’HOMME, C., FAGES, J.-G., AND LORCA, X. Choco documentation. tasc, inria rennes, lina cnrs umr 6241, cosling sas (2016). URL <http://www.choco-solver.org> (2017).
- [129] PRUUL, E., NEMHAUSER, G., AND RUSHMEIER, R. Branch-and-bound and parallel computation : A historical note. *Operations Research Letters* 7, 2 (1988), 65–69.
- [130] QUINN, M. J., AND DEO, N. *An upper bound for the speedup of parallel branch-and-bound algorithms*. Washington State University. Computer Science Department, 1983.
- [131] RANDT, N. P., JESSBERGER, C., PLÖTNER, K., AND BECKER, A. Air traffic growth, energy, and the environment 2040 : drivers, challenges, and opportunities for aviation. *International Journal of Aviation Management* 2, 3-4 (2015), 144–166.

- [132] REBOLLO, J. J., AND BALAKRISHNAN, H. Characterization and prediction of air traffic delays. *Transportation research part C : Emerging technologies 44* (2014), 231–241.
- [133] RÉGIN, J.-C. Global constraints : A survey. In *Hybrid optimization*. Springer, 2011, pp. 63–134.
- [134] RÉGIN, J.-C., REZGUI, M., AND MALAPERT, A. Embarrassingly parallel search. In *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming* (2013), Springer, pp. 596–610.
- [135] ROLF, C. C., AND KUHCINSKI, K. Parallel consistency in constraint programming. In *PDPTA* (2009), vol. 9, Citeseer, pp. 638–644.
- [136] ROSSI, F., VAN BEEK, P., AND WALSH, T. *Handbook of constraint programming*. Elsevier, 2006.
- [137] RUIZ, S., LOPEZ LEONES, J., AND RANIERI, A. A novel performance framework and methodology to analyze the impact of 4d trajectory based operations in the future air traffic management system. *Journal of Advanced Transportation 2018* (2018).
- [138] SABHNANI, G., YOUSEFI, A., AND MITCHELL, J. S. Flow conforming operational airspace sector design. In *10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference* (2010), p. 9377.
- [139] SAMAL, A., AND HENDERSON, T. Parallel split-level relaxation. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence 2*, 03 (1988), 425–442.
- [140] SCHMITT, A. R., AND KUENZ, A. A reanalysis of aviation effects from volcano eruption of eyjafjallajökull in 2010. In *2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (2015), IEEE, pp. 1B3–1.
- [141] SCHULTE, C., AND CARLSSON, M. Finite domain constraint programming systems. In *Foundations of Artificial Intelligence*, vol. 2. Elsevier, 2006, pp. 495–526.
- [142] SEN, A., SEN, M. A., AMARTYA, S., FOSTER, J. E., FOSTER, J. E., ET AL. *On economic inequality*. Oxford University Press, 1997.
- [143] SERGEEVA, M., DELAHAYE, D., ZERROUKI, L., AND SCHEDE, N. Dynamic airspace configurations generated by evolutionary algorithms. In *2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (2015), IEEE, pp. 1F2–1.
- [144] SHAW, P. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In *International conference on principles and practice of constraint programming* (1998), Springer, pp. 417–431.

Références bibliographiques

- [145] SHERMAN, S. On a theorem of hardy, littlewood, polya, and blackwell. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 37, 12 (1951), 826.
- [146] STEINER, M., BATEMAN, R., MEGENHARDT, D., LIU, Y., XU, M., POCERNICH, M., AND KROZEL, J. Translation of ensemble weather forecasts into probabilistic air traffic capacity impact. *Air Traffic Control Quarterly* 18, 3 (2010), 229–254.
- [147] STERNBERG, A., SOARES, J., CARVALHO, D., AND OGASAWARA, E. A review on flight delay prediction. *arXiv preprint arXiv :1703.06118* (2017).
- [148] TANG, J., ALAM, S., LOKAN, C., AND ABBASS, H. A. A multi-objective approach for dynamic airspace sectorization using agent based and geometric models. *Transportation research part C : Emerging technologies* 21, 1 (2012), 89–121.
- [149] TIEN, S.-L., AND HOFFMAN, R. Optimizing airspace sectors for varying demand patterns using multi-controller staffing. In *Proceedings of the 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar* (2009).
- [150] TRANDAC, H., BAPTISTE, P., AND DUONG, V. Airspace sectorization with constraints. *RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle* 39, 2 (2005), 105–122.
- [151] TRANDAC, H., AND DUONG, V. A constraint-programming formulation for dynamic airspace sectorization. In *Proceedings. The 21st Digital Avionics Systems Conference* (2002), vol. 1, IEEE, pp. 1C5–1C5.
- [152] TUAN, P. L., PROCTER, H., AND COULURIS, G. Advanced productivity analysis methods for air traffic control operations. Tech. rep., STANFORD RESEARCH INST MENLO PARK CA, 1976.
- [153] UNDERTAKING, S. J. European atm master plan. *Executive View, Luxembourg* (2015).
- [154] UNDERTAKING, S. J. Annual work programme* 2015. *SESAR Joint Undertaking, Brussels, Belgium* (2016), 183.
- [155] VAN HENTENRYCK, P., AND CARILLON, J.-P. Generality versus specificity : An experience with ai and or techniques. In *AAAI* (1988), pp. 660–664.
- [156] VELA, A. E., SOLAK, S., FÉRON, É., FEIGH, K., SINGHOSE, W., AND CLARKE, J.-P. A fuel optimal and reduced controller workload optimization model for conflict resolution. In *2009 IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference* (2009), IEEE, pp. 3–C.
- [157] VERFAILLIE, G., MARTINEZ, D., AND BESSIERE, C. A generic customizable framework for inverse local consistency. In *AAAI/IAAI* (1999), pp. 169–174.

- [158] VERLHAC, C., AND MANCHON, S. Optimization of opening schemes. In *Proceedings of the fourth USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar* (2001), pp. 8–49.
- [159] VIAN, J. L., AND MOORE, J. R. Trajectory optimization with risk minimization for military aircraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 12, 3 (1989), 311–317.
- [160] WAHBI, M., EZZAHIR, R., BESSIERE, C., AND BOUYAKHF, E. H. Dischoco 2 : A platform for distributed constraint reasoning. *Proceedings of DCR 11* (2011), 112–121.
- [161] WOLPERT, D. H., AND MACREADY, W. G. No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation* 1, 1 (1997), 67–82.
- [162] WOLSEY, L. A. *Integer programming*, vol. 52. John Wiley & Sons, 1998.
- [163] XU, L., HUTTER, F., HOOS, H. H., AND LEYTON-BROWN, K. Satzilla : portfolio-based algorithm selection for sat. *Journal of artificial intelligence research* 32 (2008), 565–606.
- [164] XUE, M. Airspace sector redesign based on voronoi diagrams. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication* 6, 12 (2009), 624–634.
- [165] XUE, M. Three-dimensional sector design with optimal number of sectors. *Journal of guidance, control, and dynamics* 35, 2 (2012), 609–618.
- [166] YAGER, R. R. Families of owa operators. *Fuzzy sets and systems* 59, 2 (1993), 125–148.
- [167] YOKOO, M., ISHIDA, T., AND KUWABARA, K. Distributed constraint satisfaction for dai problems. In *Working notes of the 1991 spring symposium on constraint-based reasoning* (1991), p. 236.
- [168] YOUSEFI, A., AND DONOHUE, G. Temporal and spatial distribution of airspace complexity for air traffic controller workload-based sectorization. In *AIAA 4th aviation technology, integration and operations (ATIO) forum* (2004), p. 6455.
- [169] ZHANG, D., CHEN, Y., BI, H., AND SONG, Z. Airspace sectorization based on weighted graph spectral bisection algorithm. In *CICTP 2012 : Multimodal Transportation Systems—Convenient, Safe, Cost-Effective, Efficient*. 2012, pp. 1924–1935.
- [170] ZHAO, Q., CHEN, S., LEUNG, S., AND LAI, K. Transportation research part e, logistics and transportation review. *Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review* 46 (2010), 913–925.

Annexe A

Equitable optimized airspace sectorization based on constraint programming and OWA aggregation

Abdessamed Mogtit

Aeronautical Sciences Laboratory, Aeronautical and Spatial Studies Institute, BLIDA1 University, Blida, Algeria

Noureddine Aribi and Yahia Lebbah

LITIO Lab., Université Oran1, Oran, Algeria, and

Mohand Lagha

Aeronautical Sciences Laboratory, Aeronautical and Spatial Studies Institute, BLIDA1 University, Blida, Algeria

Abstract

Purpose – Airspace sectorization is an important task, which has a significant impact in the everyday work of air control services. Especially in recent years, because of the constant increase in air traffic, existing airspace sectorization techniques have difficulties to tackle the large air traffic volumes, creating imbalanced sectors and uneven workload distribution among sectors. The purpose of this paper is to propose a new approach to find optimal airspace sectorization balancing the traffic controller workload between sectors, subject to airspace requirements.

Design/methodology/approach – A constraint programming (CP) model called equitable airspace sectorization problem (EQASP) relies on ordered weighted averaging (OWA) multiagent optimization and the parallel portfolio architecture has been developed, which integrates the equity into an existing CP approach (Trandac *et al.*, 2005). The EQASP was evaluated and compared with the method of Trandac *et al.* (2005), according to the quality of workload balancing between sectors and the resolution performance. The comparison was achieved using real air traffic low-altitude network data sets of French airspace for five flight information regions for 24 h a day and the Algerian airspace for three various periods (off peak hours, peak hours and 24 h).

Findings – It has been demonstrated that the proposed EQASP model, which is based on OWA multicriteria optimization method, significantly improved both the solving performance and the workload equity between sectors, while offering strong theoretical properties of the balancing requirement. Interestingly, when solving hard instances, our parallel sectorization tool can provide, at any time, a workable solution, which satisfies all geometric constraints of sectorization.

Practical implications – This study can be used to design well-balanced air sectors in terms of workload between control units in the strategic phase. To fulfil the airspace users' constraints, one can refer to this study to assess the capacity of each air sector (especially the overloaded sectors) and then adjust the sector's shape to respond to the dynamic changes in traffic patterns.

Social implications – This theoretical and practical approach enables the development and support of the definition of the "Air traffic management (ATM) Concept Target" through improvements in human factors specifically (balancing workload across sectors), which contributes to raising the level of capacity, safety and efficiency (SESAR Vision of ATM 2035).

Originality/value – In their approach, the authors proposed an OWA-based multiagent optimization model, ensuring the search for the best equitable solution, without requiring user-defined balancing constraints, which enforce each sector to have a workload between two user-defined bounds (W_{min} , W_{max}).

Keywords Airspace sectorization, Air traffic management, Equity, Constraint programming, Multicriteria optimization, Portfolio approach

Paper type Research paper

Nomenclature

Symbols

K = number of sector;
 l_{min1} = 2 mn, minimum sector-crossing time constraint;
 l_{min2} = 1 mn, minimum distance constraint;

δ = tolerance ratio;
 W_{max} = maximum workload controllers;
 W_{min} = minimum workload controllers;

The current issue and full text archive of this journal is available on Emerald Insight at: <https://www.emerald.com/insight/1748-8842.htm>



Aircraft Engineering and Aerospace Technology
92/8 (2020) 1225–1243
© Emerald Publishing Limited [ISSN 1748-8842]
[DOI 10.1108/AEAT-04-2019-0080]

The authors would like to thank the anonymous reviewers for their valuable and constructive review of the manuscript. Thanks must also go to Eurocontrol – PRISME for collaboration and providing datasets for airspace sectorization and making the study possible.

This research was supported by the Directorate General of Scientific Research and Technological Development (DGRSDT) of Algeria.

Received 25 April 2019
Revised 16 April 2020
8 June 2020
Accepted 11 June 2020

- ω_i = weight of the i^{th} vertex (monitoring and conflict workload);
 w_{ij} = weight of edges (coordination workload);
 c_{ij}, y_{ij} = auxiliary variables; and
 f_{equi} = the balancing factor of aircraft accounts (%).

Definitions, acronyms and abbreviations

- OWA = ordered weighted averaging;
 DAC = dynamic airspace configuration;
 EQASP = equitable airspace sectorization problem;
 CP = constraint programming;
 FIR = flight information region;
 ATC = air traffic controller; and
 BASS = balanced airspace sectorization.

1. Introduction

Airspace is an invisible infrastructure that is under great pressure to ensure efficient and secure operations. The aviation stakeholders have actively sought to create and adapt the sectorization airspace on the basis of performance-based navigation (PBN), trajectory-based flight-/flow-centric operations, free route airspace in the context of the growing demand for air navigation (Undertaking, 2015) and the new challenge of managing unmanned aerial vehicles (UAVs) (Temme and Helm, 2016). All of these challenges should be tackled in accordance with the most recent recommendations of academics (Kopardekar et al., 2016) and government agencies (European Aviation Safety Agency, 2016; FAA and NASA, 2017) for low-level airspace management regarding the need for considering unmanned aircraft. Actually, thousands of aircraft are flying, generating an air traffic complexity with a huge control workload, which cannot be managed by a single team of controllers. A straightforward divide-and-conquer strategy solution is adopted by partitioning the airspace into a number of disjoint sectors. Teams of controllers assigned to sectors are in communication with every plane within their sector for safely and efficiently directing the traffic. The airspace may be saturated during certain periods of time (e.g. potential conflict, mixed traffic (slow and fast), rapid evolution of the traffic), which is a challenge for air control services. Various studies have been conducted for modelling the problem of airspace sectorization into two dimensions (2D) (Li et al., 2010; Sherali and Hill, 2013) or by considering three dimensions (3D), (Kicinger and Yousef, 2009; Sergeeva et al., 2015). An interesting recent review of dynamic airspace configuration (DAC) (Kopardekar et al., 2007) models can be found in Hind et al (2018). The different models proposed for the balanced sectorization of airspace in the literature are: region based (cell model), computational geometry and graph partitioning (discussed in detail in Section 2). They enable to maintain a compromise between the demand and the airport available capacity, in addition to other sector design objectives while managing the workload for air traffic controller and maintaining an orderly flow of air traffic. However, the problem remains posed if the workload of some sector is huge compared with other sectors. Thus, the workload in sectors has to be balanced to ensure that controllers have approximately the same amount of work. Most of these studies formulate the problem as minimizing a single objective function on the

weighted sum of the sectors workloads, and then meta-heuristics-based approaches are used to solve the underlying optimization problem. These local search optimization strategies suffer from many aspects:

- It is very hard to take into account complex sectorization constraints in these approaches.
- Minimizing the weighted sum of the sectors' workloads may not ensure equity: in fact, the classical weighted sum is completely compensatory or totally additive. Therefore, it is not well adapted to fairness context. Therefore, when applying the weighted sum to the airspace sectorization problem (ASP), the results were not good, leading to a poor equity between the resulting sectors (Flener, et al., 2007).
- These local approaches cannot ensure any strict equitable optimality of the solution, nor its precision: A major drawback is that local search meta-heuristics may be biased in local optimum of poor quality.

Some studies in the current literature have investigated the use of constraint programming (CP) for solving ASP, such as the work of Jägare (2011). Mainly, the problem is formulated as a region-based approach with propagators for new global constraints to satisfy certain constraints, such as balanced workload, minimization of entry points, re-entry flight, short crossing flight, distance between trajectories and sector boundary, potential conflict to sector boundaries. The hard constraints about connectedness and compactness were not included in this model.

In the research carried out by Trandac et al. (2005), the authors have proposed a CP mathematical model on a significant part of the sectorization constraints. This model has been formulated as a constraint program where sectors' convexity, sectors' connectivity, aircraft crossing times constraints are thoroughly formulated. However, it uses a mono-criteria optimization strategy, which is not enough to ensure optimal solutions in terms of equitable workloads. Equity is stated by enforcing a given threshold on the sectors' workload. Nevertheless, such a threshold is difficult to fix because it requires a significant knowledge of the solutions. Even if it is well fixed, there is no proof that we can adopt a better threshold. Moreover, the best equitable solution can be composed of many sectors with a very close workload and few sectors slightly far from them. Clearly, finding the optimal equitable solution is out of scope of Trandac et al. approach. In this paper, we propose a new CP approach ensuring optimality on sectors' workload. Sectorization constraints of our CP model have been inspired by the one of Trandac et al. (2005).

The paper is organized as follows. Section 2 discusses related approaches for airspace sectorization. Section 3 recalls preliminaries, including Trandac et al. CP model of airspace sectorization. We also recall the ordered weighted averaging (OWA) equitable optimization developed in the context of multiagent optimization. In particular, we give a formal definition of the equity requirement and the OWA optimization approach, which uses a specific coefficient to ensure the equity. Section 4 presents our contribution on a parallel approach for the equitable optimized sectorization. Section 5 details our approach on an illustrative airspace sectorization problem.

Section 6 reports experiments we performed. Finally, we conclude and draw some perspectives.

2. Related work

Various models have been suggested in the literature for partitioning the airspace. They can be summarized as follows: the first one is a region-based model (i.e. cell model), where the airspace is partitioned into small hexagonal cells with air traffic control (ATC) workload information. In this line of research, [Yousefi and Donohue \(2004\)](#) tackled the airspace configuration problem using a mixed integer programming approach. Later, an optimization technique was proposed by [Drew \(2008\)](#) and [Tien and Homan \(2009\)](#), which consists to produce a sectorization designs with a favourable geometry ensuring a better balanced workload among centres. [Klein \(2005\)](#) has developed an algorithm called seeded region growing (SRG) to balance the traffic mass of each sector. The author [Jägare \(2013\)](#) has used the constraint-based local search (CBLS) algorithm. Their method minimized a cost function as the weighted sum of the penalties of the soft constraints (balanced workload, minimum dwell time, convexity, compactness) to solve the ASP. The airspace partitioning problem was resolved by means of a geometrical approach ([Tang et al., 2012](#); [Brinton and Pledge, 2008](#); [Basu et al., 2009](#)) that used flight trajectory for sectorization design and workload balancing. The first has grouped flight trajectory into sectors by using k -means clustering algorithm. The second work is based on binary space partitions, pie cuts and dynamic programming. The research conducted by [Delahaye et al. \(1998\)](#) creates well-balanced workloads over all sectors and minimizes traffic flows across the boundaries of the control sector based on Voronoi diagram. The result of the final sectorization has been achieved by an evolutionary algorithm (EA). Furthermore, [Xue \(2009\)](#) enhanced the approach by using an iterative deepening algorithm to optimize sectorization. In the work of [Gerdes et al. \(2018\)](#), the authors have used flight-centric operations and multicriteria optimization, based on fuzzy clustering of traffic flows, Voronoi diagrams and EA to create the final airspace structure. When the airspace sectorization is formulated as a graph partitioning problem, the model enables to take into account the information on airspace structure: the vertices are the airports, waypoints, crossing points and the air routes define the edges. The graph partitioning problem has been widely studied. It should be noted that this problem is NP-complete ([Garey and Johnson, 1979](#)). Based on this model, [Martinez et al. \(2007\)](#) proposed a weighted graph approach based on peak traffic counts, and then assigned a grid of cells onto the graph. The principle of this method consists to divide traffic flow in sub-graphs of successive smaller size until all sub-graphs have a workload below some given threshold. [Klein et al. \(2008\)](#) have proposed a new method that maintains workload for DAC, by using the fix posting area (FPA) for adjustment sector boundary that maintain the workload, and then regrouped those areas to meet the DAC constraints. A new meta-heuristic inspired from the nuclear fusion and fission of atoms has been developed by [Bichot \(2007\)](#), called fusion fission, to resolve the partitioning problem. More recently, in the study of [Soh \(2019\)](#), the airspace was first created using a spectral clustering

algorithm. Then, the weight-balancing algorithm balances the sub-graphs weights. Finally, the borders of the sector will be established after post-processing.

3. Preliminaries

3.1 Equitable airspace sectorization problem

Definition 3.1 (EQASP): Given an airspace modelled as an oriented graph $G = (V, E)$ where:

- V (set of vertices) is the set of beacons and crossing points $v_i \in V$. Let w_i be the weight of v_i , which represents the monitoring workload and conflict workload; and
- E (set of edges) is such that (u, v) belongs to E if and only if there is a direct route from u to v . Let $w_{i,j}$ be the weight of the edge (v_i, v_j) , which is the coordination workload assigned to this edge.

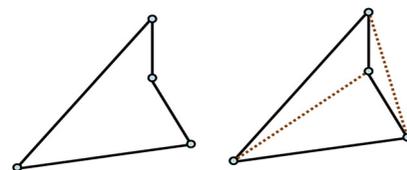
The equitable optimized airspace sectorization problem (EQASP) consists in partitioning the vertices V into k balanced subsets (sectors) V_1, \dots, V_k while satisfying a set of constraints, e.g. the controllers' workload is balanced among the sectors, aircraft cannot stay less than a given amount of time in each crossed sector, sufficient distance between a sector borders and a network nodes aircraft cannot enter twice the same sector and sectors cannot be fragmented.

Definition 3.2 (constrained triangulation): given a planar graph $G = (V, E)$, a constrained triangulation, denoted by $CT(V)$, with respect to G is a triangulation $T(V)$ such that all edges of E are edges of $T(V)$. [Figure 1](#) gives an example of a constrained triangulation ([Chen, 1996](#)).

3.2 Constraint programming

CP ([Rossi et al., 2006](#)) is a powerful paradigm to model and solve combinatorial problems. It has been successfully applied in many different areas (e.g. resource allocation, scheduling and planning problems). This paradigm is based on the notion of constraint network (i.e. constraint satisfaction problem (CSP)), which is formally defined as a triplet $\langle X, D, C \rangle$, where $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ is a set of finite domain variables, $D = \{D(X_1), \dots, D(X_n)\}$ is the set of domains of the variables and $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ is a set of constraints. The domain of a variable, $D(X)$, represents all possible values that this variable can take. For example, a domain $D(X) = \{1, 2, 3\}$ shows that the variable X can take one of the three possible values. Alternatively, a variable can be represented as an interval of values $[lb(X), ub(X)]$. We call this representation the interval or bounds representation. For example, a domain $D(X) = [1, 2^{30}]$ shows that the variable X can take one of the 2^{30} possible integer values. A constraint $C_i \in C$ is defined over a subset of variables X_1, \dots, X_n , which are called a scope, denoted scope $(C_i) \subseteq X$. The arity of a constraint is the number of variables in the constraint scope. A constraint is a relation over the variables in

Figure 1 A constrained triangulation (right) of a given graph (left)



its scope. For example, $X \neq Y$, $D(X) = D(Y) = [0,2]$ is a binary constraint. So, constraints of Arity 2 are called binary and, otherwise, they are called non-binary or n -ary constraints. A subset of all possible assignments to the variables in scope (C_i) that satisfy the constraint are called solutions of C_i . A solution of a CSP corresponds to an assignment of a value to each variable in X such that all constraints in C are satisfied. Once a CSP model has been built, a CP solving engine can be called to explore the search space induced by variable domains to find a solution. The solver combines two techniques to find that solution, namely, search heuristics and constraint propagation:

- 1 *Constraint propagation*: A constraint C_i can have a filtering algorithm (i.e. a constraint propagator). A constraint propagator is an algorithm that takes as input the domains of the variables in scope (C_i) and removes all values from domains that will not take part in any solution.
- 2 *Search strategies*: Most often, constraint propagation is not sufficient to find a solution. Thus, the search space needs to be explored using one or more search strategies. A search strategy defines how to explore the search space by making decisions, involving a variable X_i , and a value from $D(X_i)$, and triggers new constraint propagation.

Search and propagations last until a solution has been found, or a failure has been detected (backtracking occurs).

3.3 Trandac et al. constraint programming model for airspace sectorization

Our model relies on the CP model proposed by Trandac et al. (2005). We adopt this CP model, which takes into account the constraints related to airspace sectorization.

3.3.1 Decision variables

We introduce n variables x_i , which take their values in $\{1..k\}$; $x_i = j$ means that the vertex v_i belongs to the partition V_j . To make easy defining the model, we introduce also a set of auxiliary variables:

$$\begin{cases} n \text{ variables } x_i \in \{1..k\} \\ n \times n \text{ variables } c_{i,j} \in \{0, 1\} \text{ where } c_{i,j} = 0 \iff x_i = x_j \\ n \times k \text{ variables } y_{i,j} \in \{0, 1\} \text{ where } y_{i,j} = 1 \iff x_i = j \end{cases} \quad (1)$$

It follows that $\forall i = 1..n, \sum_{j=1..k} y_{i,j} = 1$, meaning that each vertex v should be assigned to one partition V .

3.3.2 Constraints

We briefly enumerate the constraints modelling airspace sectorization requirements as formulated by Trandac et al. (2005):

Minimum sector-crossing time constraint: The aircraft must stay in each crossed sector at least a given time, which is reformulated in terms of a minimum distance l_{min1} (Figure 2(a)).

$$\forall i, \forall a < b < c: \quad l(v_a^i, v_c^i) < l_{min1} \Rightarrow (x_a^i = x_b^i) \vee (x_b^i = x_c^i) \quad (2)$$

Where for any flight i , any triplet of sites a, b, c of an ASP, if the distance $l(v_a^i, v_c^i)$ of the edge (v_a^i, v_c^i) is less than l_{min1} , then the three vertices v_a^i, v_b^i, v_c^i cannot be in three different sectors.

This constraint provides the controller with enough time to control the aircraft.

Minimum distance constraint: The distance between a sector border and a network node must be greater than some given value l_{min2} (Figure 2(b)). This can be stated as enforcing the distance between any two nodes to be greater than $2.l_{min2}$. Thus, if a cut edge (v_i, v_j) has a length $l(v_i, v_j) \geq 2.l_{min2}$, then the cutting in the middle of this edge is enough to guarantee that the two cut parts are greater than or equal to l_{min2} . This constraint is formulated as:

$$\forall i, \forall v_a^i, v_b^i: \quad l(v_a^i, v_b^i) \leq 2.l_{min2} \Rightarrow (x_a^i = x_b^i) \quad (3)$$

Convexity: During any flight, aircraft cannot enter twice the same sector (Figure 2(c)). This constraint can be formulated using the following relation:

$$\forall i, a, b, c, (a < b < c) \wedge x_a^i = x_c^i \Rightarrow x_a^i = x_b^i \quad (4)$$

where a, b, c are three sites of an ASP. However, if we consider all the flight plans and all the triplets $a < b < c$, the number of generated constraints in equation (4) can be important. To avoid these numerous constraints, a custom propagation algorithm, which captures the semantic of the convexity constraint, has instead been used (Trandac and Baptiste, 2003).

Connectivity constraint: This constraint ensures that the sectors should be geometrically connected (not fragmented). As mentioned above, given an airspace represented by $G = (V, E)$ and a constrained triangulation $CT(V)$ with respect to G , the airspace will be partitioned into a number of subsets V_i and the connectivity constraint holds if all sub-graphs V_i of $CT(V)$ are connected. For example, the solution in Figure 2(d) corresponds to an infeasible solution.

The connectivity constraint $Connect(G, x)$ is defined as follows:

$$Connect(G, x) \iff \forall j = 1..k, \text{ vertices } \{v_i | v_i = j\} \text{ are connected.} \quad (5)$$

Balance constraint: To get equitable sectors (in terms of workload ω), a balance constraint is used with respect to a tolerance ratio of $0 < \delta < 1$:

$$\forall j = 1..k, W_{min} \leq \sum_{i=1}^n y_{ij} \omega_i \leq W_{max} \quad (6)$$

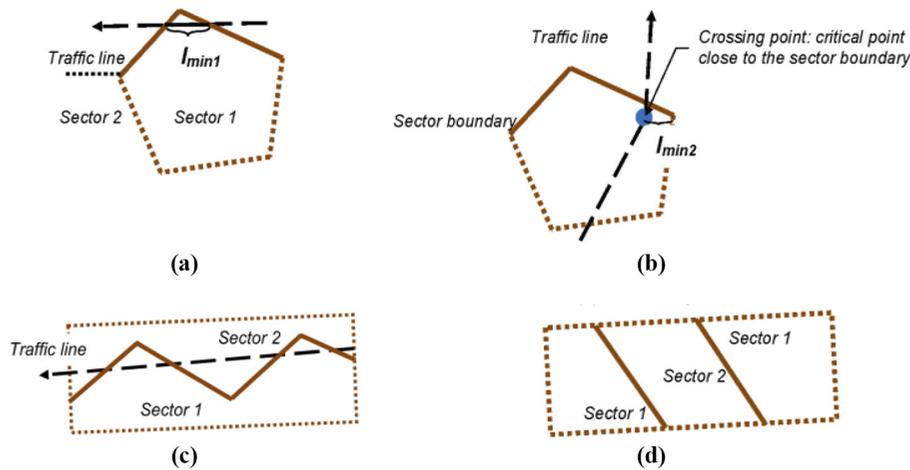
Where the sum of vertices in each subset (sector) is bounded by $W_{min} = (1 - \delta) \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \omega_i$ and $W_{max} = (1 + \delta) \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \omega_i$.

The objective function used by this CP model tends to minimize the coordination workload between pairs of sectors. It is given as follows:

$$\text{Min } \sum c_{i,j} w_{i,j}, \quad \forall i, j, (v_i, v_j) \in V \quad (7)$$

It is easy to observe that the quality of the balanced airspace sectorization is strongly related to the choice of the right parameters of the balance constraints (equation (6)). Unfortunately, fixing those parameters is far from obvious in practice.

Figure 2 Illustrative examples of airspace constraints



Notes: (a) Minimum Sector Crossing Time Constraint; (b) Minimum Distance Constraint; (c) Convexity Constraint; (d) Connectivity Constraint

To improve this CP model, we propose a way to leverage an efficient formulation of the balancing criterion using new constraints and a new objective function, which are established according strong theoretical properties (Section 3.5).

3.4 Parallel portfolio architecture

Recent research in artificial intelligence areas, such as CP (Rossi et al., 2006), Boolean satisfiability (SAT) testing (Xu et al., 2007) and integer linear programming (ILP) (Wolsey, 1998), has shown that the performance of a sequential solver can be significantly improved by carefully exploiting a parallel solving architecture. In the literature, we can distinguish two mains approaches to exploit parallelism: *divide-and-conquer* and *cooperative portfolio strategy* (Amadini, 2015). In the former, the problem is divided into several sub-problems, each problem is solved separately and the result is later combined to form the solutions of the original problem, whereas the parallel portfolio strategy exploits the complementarity between different sequential solving strategies to let them compete and cooperate on the same problem. When dealing with multithreading portfolio resolution, very few data is shared between solvers (threads): every time a solution has been found its value is shared between solvers. Additionally, when a solver ends, it communicates an interruption instruction to the others. According to the portfolio architecture, different solvers tackle the same model and cooperate using different search strategies. This enables to explore the search space in various ways. In the context of solving combinatorial optimization problems, the solvers exchange new objective bounds and inconsistent values of non-fixed variables.

3.5 Equitable multiagent optimization

Let $N = \{1, \dots, n\}$ be a set of n agents. A solution of a multiagent optimization problem is characterized by a cost vector $x = \{x_1, \dots, x_n\} \in \mathbb{R}_+^n$, where x_i represents the cost (or a degree of dissatisfaction) of the i^{th} agent. Cost vectors are commonly compared using the Pareto dominance relation (P -

dominance). The weak- P -dominance \preceq_p between two cost vectors x, x' is defined as: $x \preceq_p x' [\forall i \in N, x_i \leq x'_i]$. The negation of the weak- P -dominance \preceq_p is used to define the strict P -dominance \prec_p (which is seen as the asymmetric part of the weak- P -dominance \preceq_p). This formula can be found in Golden and Perny (2010), Definition 1, Page 2). The strict P -dominance \prec_p between x and x' is given by: $x \prec_p x' \iff [x \preceq_p x' \wedge \text{not}(x' \preceq_p x)]$. A solution x^* is Pareto-optimal (i.e. *efficient*) if and only if there is no solution x that dominates x^* . The P -dominance can be formulated as: $\min\{x_1, \dots, x_n\}$: $x \in Q$, where Q is the set of feasible solutions. The P -dominance may lead to a large set of incomparable solutions. To refine the P -dominance, we should specialize a dominance relation to favour *equitable* cost vectors. The main intuition behind the equity criterion refers to the idea of selecting solutions that fairly share and minimize dissatisfaction between agents (Sen and Foster, 1997). Formally, an equitable dominance relation \preceq_{\parallel} should fulfil three main properties (Marshall et al., 1979; Golden and Perny, 2010):

- 1 *Symmetry*: Consider a cost vector $x \in \mathbb{R}_+^n$. For any permutation σ on N , we have $(x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(n)}) \sim (x_1, \dots, x_n)$.
- 2 *P-monotony*: For all $x, y \in \mathbb{R}_+^n$, $x \preceq_p y \Rightarrow x \preceq_{\parallel} y$ and $x \prec_p y \Rightarrow x \prec_{\parallel} y$.
- 3 *Transfer principle* (i.e. *Pigou–Dalton* transfers in the social choice theory): Let $x \in \mathbb{R}_+^n$ and $x_i < x_j$ for some $i, j \in N$. Let e^z be a vector such that $\forall i \neq z, e_i^z = 0$ and $e_z^z = 1$. For all ϵ where $0 < \epsilon \leq \frac{x_i - x_j}{2}$, we get $x - \epsilon e^i + \epsilon e^j \preceq_{\parallel} x$.

This third axiom captures the core idea of fairness. In fact, any slight improvement of x_j at the expense (reduction) of x_i , which preserves the *average of costs*, would produce a better distribution of costs among agents and consequently reduce the inequality of cost distributions between them (Sen and Foster, 1997, for a survey). For example, if we consider two cost vectors $x = (11, 10, 7, 10)$ and $y = (9, 10, 9, 10)$, then the transfer principle implies that $y \preceq_{\parallel} x$, because there is a transfer of size $\epsilon = 2$ (i.e. $\frac{x_i - x_j}{2}$), which allows to have y from x .

It is important to note that the transfer principle is unworkable when the vectors have different average costs. Interestingly, the possibility of discriminating is improved when combining P-monotony and the transfer principle, and this leads to the so-called *generalized Lorenz dominance* defined in Chong (1976) (for more details, see Golden and Perny, 2010; Marshall et al., 1979). In the next section, we show how to represent this dominance relation using an aggregation function.

3.6 Equitable aggregation functions

A usual way to assess the quality of a cost vector is to aggregate the individual costs with a *collective cost function* (CCF) (Moulin, 1989) $G : \mathbb{R}_+^n \rightarrow \mathbb{R}_+$, which improves the overall welfare by $\min\{G(x) : x \in Q\}$. The G function can be a linear combination of individual cost (i.e. $G(x) \stackrel{\text{def}}{=} \text{sum}(x)$), which is not suitable to fairness context. Another way to build G is based on the *max* function, (i.e. $G(x) \stackrel{\text{def}}{=} \text{max}(x)$), but it is sensitive to the *drowning effect* (Dubois and Fortemps, 1999). Other refinements of the max function exist (e.g. augmented *max*, *leximax* (Bouveret and Lemaître, 2009), but do not really solve the problem, because all are sensitive to *drowning effect*. To guarantee equitable aggregations, G should conform to the three equity properties. The most known way is to use Schur-convex functions ψ , which are order preserving the three equity properties: $x \preceq_{\parallel} y \iff \psi(x) \leq \psi(y)$. Precisely, when some aggregation function G is Schur-convex (Marshall et al., 1979), then it is an equitable aggregation (Kostreva et al., 2004). Thus, Schur-convex functions play a key role in equitable aggregations (for more details, see Marshall et al., 1979; Kostreva et al., 2004). In this line of reasoning, we introduce, in the next section, an aggregation function that ensures equity.

3.7 Ordered weighted averages

Definition 3.3 (OWA) A well-known and flexible aggregation function able to model and control the attitude towards fairness is the OWA (Yager, 1988). OWA is defined as follows: $G^w(x) = \sum_{i=1}^n w_i x_{\sigma(i)}$, where $w = (w_1, \dots, w_n) \in [0,1]^n$ are positive weighing coefficients and $x_{\sigma(1)} \geq x_{\sigma(2)} \geq \dots \geq x_{\sigma(n)}$ are the components of x sorted in decreasing order, so $x_{\sigma(i)}$ is the i^{th} greatest component of x . OWA provides a family of compromises between the *sum* and *max*. The first can be obtained by $G^{(1/n, 1/n, \dots, 1/n)}$, and the second by $G^{(1, 0, \dots, 0)}$. When used with decreasing weights, i.e. $w_{i+1} \leq w_i$ for all $i < n$, OWA tends to ensure equity due to the overweighing of the least satisfied components (agents). OWA with decreasing weights is known in multicriteria analysis under the name of *generalized Gini social-evaluation* functions, where their axiomatic justification in ensuring fairness is well established (Weymark, 1981). Its axiomatic analysis shows that OWA has several interesting properties, including monotonicity with respect to each agent (individual utility), which ensures Pareto-efficiency of OWA-optimal solutions. Another nice property is the monotonicity with respect to utility transfers from a “richer” agent to a “poorer” agent, thereby leading to inequalities reduction, which guarantees the fairness of OWA-optimal solutions (Lesca, 2010). Interestingly, Golden and

Perny (2010) propose coefficients for the OWA aggregation method such that they are Schur-convex:

Theorem 1 (Golden and Perny, 2010).

Let the following be the coefficients of the OWA aggregation:

$W(x) = \sum_{k=1}^n \sin\left(\frac{(n+1-k)\pi}{2n+1}\right) x_{(k)}$. W is a Schur-convex function. Theorem 1 is fundamental, as that Schur-convex function ensures equity (Kostreva et al., 2004; Golden and Perny, 2010).

4. Equitable optimized sectorization

This section describes our CP model to find an equitable airspace sectorization. Our approach integrates equity in the approach of Trandac et al. (2005), where a CP model has been established to model sectorization constraints (i.e. minimum sector-crossing time, minimum distance, convexity and connectivity constraints). Trandac et al. (2005) proposed a balance constraint equation (6), enforcing each sector to have its workload between two bounds (W_{min}, W_{max}). Fixing these bounds is not obvious, as there is no guarantee that the optimal (or the feasible) balanced solutions are preserved. Moreover, there should be many solutions between these bounds, and there is no way to select the best one. That is why, in this section, we propose a new equity model EQASP, which guarantees to find the best equitable solutions without requiring to any bounding constraint. Our model relies on OWA multiagent optimization (Section 3.5), which enables to find optimal equitable solutions.

EQASP model adopts the variables (equation (1)) and constraints (equations (2)–(5)) proposed by Trandac et al. (2005). As we want to balance the workload between sectors, we add new decision variables $z = \{z_1, \dots, z_k\}$, where z_j is the workload of the j^{th} sector and w_i is the workload of the i^{th} site, $\forall j = 1..k, z_j = \sum_{i=1..n} y_{i,j} w_i$. The equitable OWA aggregation operator is a weighted sum on the sorted objective variables, where the weights w' ensure the equity requirement is fixed by Theorem 1 and fully explained in Section 3.7. We recall that the basic idea of the OWA aggregator is not to assign a coefficient to a particular criterion, but to a sorted version of the objective vector (i.e. ordered criteria). So, according to the OWA definition, we have to sort the criteria before assigning weights to them. In our CP model, we introduce a new vector s of auxiliary variables, which is the sorted version of the vector z using the following constraint:

$$\text{sort}([z_1, \dots, z_k], [s_1, \dots, s_k]) \tag{8}$$

where the vector s is a permutation of z , and s is sorted in decreasing order. The whole EQASP model to find an efficient (i.e. Pareto-optimal) and an equitable sectorization is given in Figure 3, where $w'_j = \sin\left(\frac{(k+1-j)\pi}{2k+1}\right)$, as proposed by Theorem 1, which gives the necessary conditions to get equitable solutions. The objective function and constraints (C1) implement the OWA aggregation operator and the different constraints of the airspace partitioning problem. Precisely, sorting constraints (C2) and (C3) is specially used when the cost values are given in comprehension. Here, the sorting step is enforced using the *sort* global constraint (Régis, 2011). It follows that the j^{th} greatest cost value s_j will have the j^{th} biggest weight w'_k .

$$\begin{aligned} \text{Min } G^{w'}(s) &= \sum_{j=1}^k s_j w'_j \\ \text{s.t. } &\left\{ \begin{array}{l} \text{Airspace sectorization. } \{ \text{(C1) constraints (2–5)} \\ \text{OWA sorting. } \left\{ \begin{array}{l} \text{(C2) constraint on the workload variables (8)} \\ \text{(C3) } z_j = \sum_{i=1..n} y_{i,j} \omega_i, \quad j=1..k \end{array} \right. \\ x, c \text{ and } y \text{ defined in (1)} \\ z_j, s_j \in \mathbb{R}_+, \quad \forall j=1, \dots, k \end{array} \right. \end{aligned} \tag{9}$$

Now, let us consider an airspace sectorization problem with n sites, m flight trajectories and k sectors. We denote by F the size of the longest flight trajectory. To solve this sectorization problem, our approach builds a CP model that includes the following variables:

- The variables provided in equation (1), which sum up to $n^2 + (n \times k) + n$ variables.
- k variables are used to encode the sectors' workload constraints (Figure 3 – (C3)).
- k additional variables involved in the sort constraint, which is used to model the OWA operator (Figure 3 – (C2)).

In all, our CP model uses $\mathbf{O}(n^2 + n(k + 1) + 2k)$ variables to encode the EQASP. Using these variables, we can define the following sectorization constraints:

- Two global constraints (i.e. $\mathbf{O}(1)$ constraints) to enforce the convexity and the connectivity geometrical constraints.
- The *sort* global constraint (i.e. $\mathbf{O}(1)$) to encode the equity criterion (equation (8)).
- At most $m \times \frac{F(F-1)}{2}$ constraints (i.e. $\mathbf{O}(m \times F^2)$) to encode the minimum sector-crossing time, where F bounds the number of edges in each flight plan (equation (2)).
- At most $m \times \frac{F^2(F-1)}{2}$ constraints (i.e. $\mathbf{O}(m \times F^3)$) for the minimum distance constraint (equation (3)).
- n constraints to enforce each site to be part of exactly one sector.
- k constraints to assess the workload of each sector (Figure 3 – (C3)).

Note that the Trandac *et al.* model involves k supplementary constraints to bound the workload of each sector (equation (6)). Overall, to build an EQASP CP model, we need $\mathbf{O}(m \times F^2(F + 1) + n + k)$ constraints, in the worst case.

4.1 Parallel portfolio approach for equitable airspace sectorization

Actually, the divide-and-conquer technique has not been shown to be effective in the context of CP because it is not

Figure 3 OWA CP model for equitable airspace sectorization

$$\begin{aligned} \text{Min } G^{w'}(s) &= \sum_{j=1}^k s_j w'_j \\ \text{s.t. } &\left\{ \begin{array}{l} \text{Airspace sectorization. } \{ \text{(C1) constraints (2–5)} \\ \text{OWA sorting. } \left\{ \begin{array}{l} \text{(C2) constraint on the workload variables (8)} \\ \text{(C3) } z_j = \sum_{i=1..n} y_{i,j} \omega_i, \quad j=1..k \end{array} \right. \\ x, c \text{ and } y \text{ defined in (1)} \\ z_j, s_j \in \mathbb{R}_+, \quad \forall j=1, \dots, k \end{array} \right. \end{aligned}$$

possible to cleanly divide a problem into independent sub-problems, in the presence of constraints that involve variables belonging to different sub-problems (Abramson and Yung, 1989). Besides, it is recognized within the field of CP that model settings (i.e. search strategies, branching techniques, heuristics), have a strong impact on solving performances. Additionally, the “no free lunch” theorem (Wolpert and Macready, 1997) succinctly demonstrates that across all possible problems, on average, no one algorithm will outperform another. In fact, it has been widely observed in CP that there is no “dominant” solving configuration for all CP problems (generally of NP-hard nature). Instead, different solvers perform best on different instances. We, thus, address the problem of boosting equitable airspace sectorization by leveraging the cooperation of different portfolio solvers to solve the constraint optimization problem (COP).

In the proposed portfolio approach, our OWA-based sectorization model (Figure 3) is fed into several solvers using different predefined and customized settings (e.g. (objective) search strategies, heuristics for variables and values selecting, dynamic cuts, etc.). A partial solution found by a solver s_i is a token of knowledge that s_i can share with another solver s_j to prune their search space and therefore possibly accelerate the solving process. Interestingly, most recent CP environments (e.g. Gecode, Choco, etc.) come with a valuable programming support for implementing a standard portfolio architecture.

5. Running example

Let us consider a simple example illustrated in Figure 4, having 14 vertices representing major airports or air crossings. We want to divide it into five sectors. The number of sectorization solutions is about 40,075,035 possibilities [1].

For this illustrative experiment, we set the required parameters ($nb_sectors = 5$; $l_{min1} = 2mn$; $l_{min2} = 1mn$; $time_limit = 10mn$), which leads to a CP model having 290 variables and 203 constraints. The obtained sectorization results are provided in Table 1.

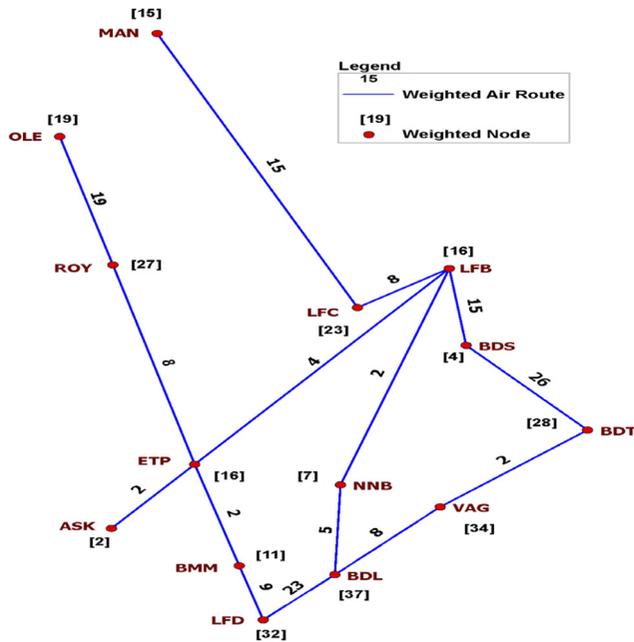
Figure 5 qualitatively compares our equitable approach and Trandac *et al.*, approach according to the workload distribution. Clearly, one can observe that our sectorization result (in green line) is more equitable than the one given by the Trandac *et al.* approach, as the workload distribution is closer to the ideal (average) workload presented by the red horizontal line.

In addition, to numerically assess how well the balanced sectorization result is, we have used some quality measures, such as the average workload, the standard deviation and the f_{equi} measure. This later is used to evaluate the balancing factor of workloads, which is calculated as follows:

$$f_{equi}(\%) = \frac{(\text{Max Workload} - \text{Min Workload})}{\text{Max Workload}} \times 100 \tag{10}$$

Where *Max-workload* (resp. *Min-workload*) represents the highest (resp. the lowest) workload value in the computed solution. Table 2 reports the result of each measure. Except the average workload, where both approaches report the same

Figure 4 Example of an air traffic network



Notes: The red nodes represent the airports, and the direct blue edges (links) represent weighted air routes (number of aircrafts)

value, our approach qualitatively outperforms the Trandac et al. approach according to all the remaining measures.

6. Experimental evaluation

This section reports our experiments conducted on a set of real-world air traffic data sets obtained from Eurocontrol and Aeronautical Sciences Laboratory (LSA) with different characteristics (Figures 6 and 7). This experimental study aims to:

Table 1 Sectorization result of both approaches EQASP and Trandac et al.

EQASP		Trandac et al. method	
ID sites	N sector	ID sites	N sector
BDT	1	LFB	1
VAG	1	LFC	1
NNB	2	MAN	1
BDL	2	NNB	2
ROY	3	BDL	2
OLE	3	LFD	2
ETP	4	BDS	3
BMM	4	BDT	3
ASK	4	VAG	3
LFD	4	ETP	4
LFB	5	BMM	4
BDS	5	ASK	4
LFC	5	ROY	5
MAN	5	OLE	5

- compare the solving performances of our OWA-based approaches (i.e. standard and portfolio) against the CP-based approach of Trandac et al. (2005) for balanced airspace sectorization; and
- assess the balancing quality of the different approaches on the benchmarking data sets.

6.1 Experimental protocol

We have implemented and tested our OWA-based CP approach as a tool called balanced airSpace sectorization (BASS) using Choco library v.4.0.1 (Prud'homme et al., 2017). For a fair comparison, we have also implemented the original CP approach (Trandac et al., 2005) using the same Choco v.4.0.1 library.

6.1.1 Computational environment

The experiments were performed on a Linux machine with Intel Xeon dual-CPU E5-2660 with 32 cores, running at 2.4 GHz and 48 GB of main memory. The CPU timeout was set to 1 h for all approaches.

6.1.2 Qualitative measures

To qualitatively evaluate the sectorization approaches in terms of balanced workloads, we use two measures:

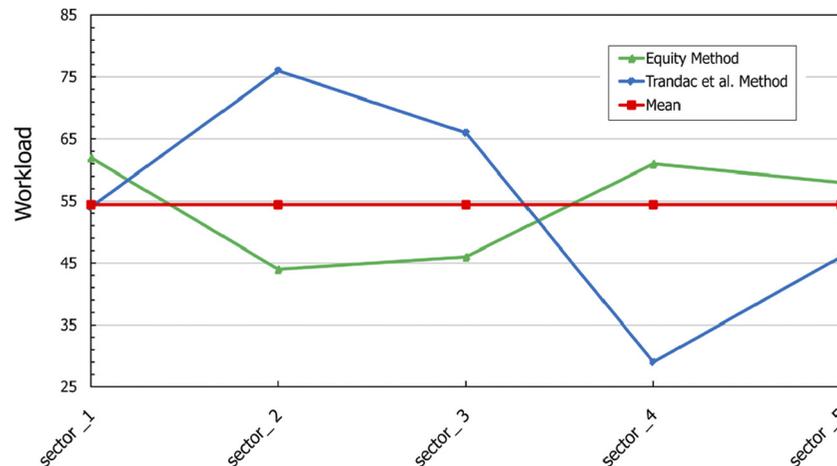
- 1 the standard deviation (*Std.Dev*) from the ideal balanced sectorization (i.e. without considering constraints in equations (2)–(5)); and
- 2 the deviation between the smallest and the largest sectors in terms of workload.

6.1.3 Cooperative parallel portfolio strategy and performance tuning

For real-world instances, the search space induced by variable domains is huge, in general. So, most of the time, constraint propagation is not sufficient to build a solution, i.e. to remove all inconsistent values from variable domains. Thus, the search space needs to be explored using one or more search strategies.

In our experiments, we evaluated the capabilities of a parallel portfolio architecture for our approach to efficiently handle the real-world sectorization instances. For our parallel resolution, we have used a portfolio algorithm implemented and made available in the Choco solver v.4.0.1 (Prud'homme et al., 2017) as a blackbox to tackle our problem (EQASP). Our implementation of the cooperative portfolio architecture benefits from parallelism by having all the processors and cores cooperate through the solving of the same sectorization instance, each with its specific searching strategy. Intermediate communications between cores are performed to exchange new objective bounds and inconsistent values of non-fixed variables. Thus, the communication protocol and control are fully transparent. Particularly, we have implemented different well-known search strategies available in the Choco solver library, such as [2]:

- *activity-based search strategy (ABS)*: Its key idea is to associate with each variable a counter that measures the activity of a variable during propagation, i.e. how often it gets filtered by constraint propagation. This search has shown to be experimentally more robust and may produce significant improvements in performance;

Figure 5 Workload distributions on sectors according to the EQASP and the Trandac *et al.* approaches**Table 2** Qualitative comparison of the two approaches

Approach	Min workload	Max workload	Mean	Std.Dev	$f_{equi} \%$
EQASP	44	62	54.4	8.55	29.03
Trandac <i>et al.</i>	29	76		18.14	61.84

- *restarts strategy*: After each new solution. According to this strategy, we stop the current tree search, then we start a new tree search from the root node. Restarting makes sense only when coupled with randomized dynamic branching strategies using different policies: Geometrical, Luby, etc. This technique ensures that the same enumeration tree is not constructed twice;
- *no-goods learning strategy*: No-goods learning has long been used in various paradigms for improving search. In the context of our CP approach for airspace sectorization, we used the no-good learning from restarts to help prevent the exploration of the same subspaces;
- branching on the value with the best objective bound;
- *large neighbourhood search (LNS) strategy*: In the context of constraint programming for optimization problems, one of the most well-known and widely used local search techniques is the LNS algorithm (Shaw, 1998). LNS is a two-phase algorithm, which partially relaxes a given solution and repairs it. Given a solution as input, the relaxation phase builds a partial solution (or neighbourhood) by choosing a set of variables to reset to their initial domain; the remaining ones are assigned to their value in the solution. In this work, we focus on the technique in which CP is used to bound the objective variable and to assign a value to variables not yet instantiated. These two phases last until the search stops (optimality proven or limit reached);
- randomly selects a variable and assigns it to a value randomly;
- *IntVarSearch*: in which we select the variable of smallest domain size and assign it to its smallest domain value (lower bound); and
- *WDegSearch*: The weighted degree heuristic (wdeg) is a direct adaptation of the SAT heuristic variable state

independent decaying sum (VSIDS) to CSPs that relies on failures data to define the variable ordering.

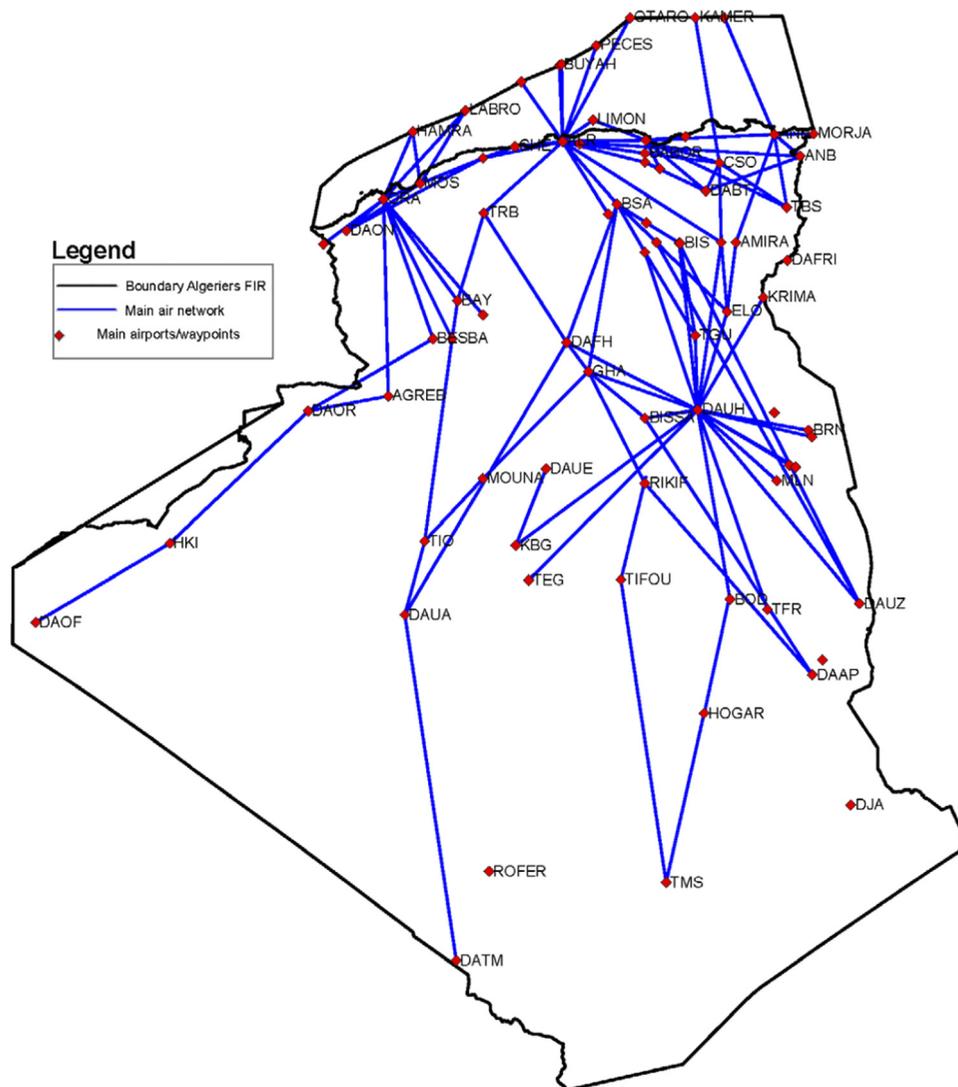
6.1.4 Custom heuristic for variable and value selecting strategy

We have also implemented a customized heuristic for variable and value selecting, which conveys to the context of graph partitioning problem for airspace sectorization. This search strategy was first used by Trandac *et al.* (2005), and it is inspired from the well-known Kernighan and Lin (1970) for graph partitioning. This heuristic was shown to reduce significantly the number of backtracks, and thus, we have used it for our sequential approach. A detailed adaptation in the context of airspace sectorization was given by Trandac *et al.* (2005).

6.2 Test instances: air traffic data

We evaluated and compared the CP sectorization approaches with real air traffic network data of the flight information region (FIR) for both French and Algerian airspaces. In a first step, the benchmarking data were collected from Eurocontrol – Network Manager Directorate – Performance Forecasts Relations – PRISME, who have provided us with all the necessary information, namely, 37,082 flight points and 253,644 route profiles for flights through French FIRs on 07 July 2017. The flight plan data is provided for an UTC day in three files recapitulating the flight numbers, departure and destination for each airport, segment type and route followed, time over points, geographic coordinates, the names and their flight level (FL). These coordinates allowed us, after a pre-processing step, to create our flying maps.

The second step consisted of identifying the flights entering or leaving the French FIR and finding the optimal level (FL) for

Figure 6 Low-altitude airspace network through the Algerian FIRs for 24 h on 11 December 2002

the airspace sectorization. Here, the best value of the FL selection was set to 195 (= 19,500 ft) for low-level airspace. The resulting low-altitude air traffic network through the French FIRs is depicted in [Figure 7](#).

As regards to the Algerian airspace, we have chosen the available air traffic data provided by LSA. The chosen day is 11 December 2002. This data set is complete and includes high and low air traffic (ascendants and descends). We further select FL280 (28,000 ft) for the low segment, as shown in [Figure 6](#).

In the final step, we constructed a weighted graph model that captures the structure of each studied airspace, where airports, waypoints and crossing points are modelled with vertices (nodes), while air routes are represented by edges. In our experiments, we set some parameters in terms of overall outcomes. Especially, we set the minimum standard distances called l_{min2} to 1 *mn*, between all network nodes (airports, waypoints, etc.) and a sector border. We also set the sector boundary l_{min1} being the minimum sector-crossing time constraint to 2 *mn*.

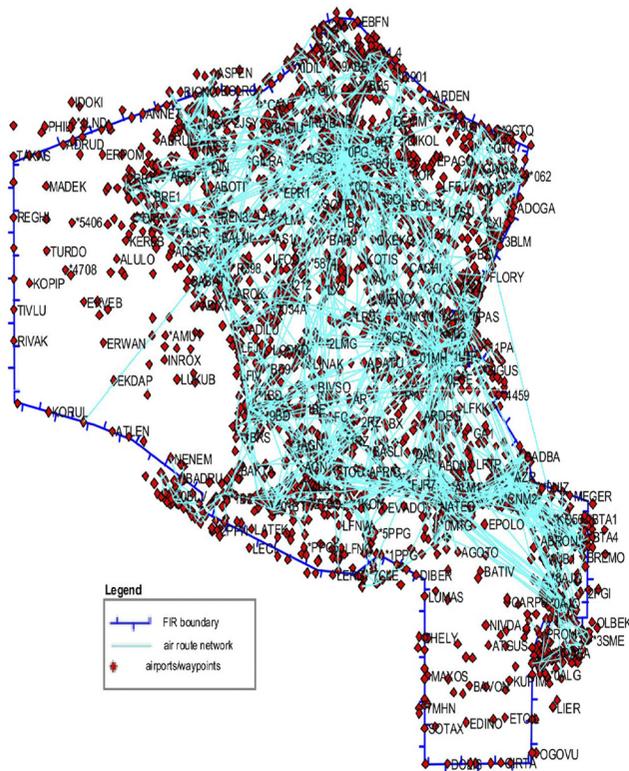
6.3 Sectorization results

In what follows, we analyze the results of the studied CP sectorization approaches applied to the Algerian and the French airspaces. Actually, the problem consists to find the best airspace sectorization, which minimizes the overall controllers' coordination workloads while emphasizing balanced air traffic workloads between all computed sectors. As reported in [Trandac et al. \(2005\)](#), the Trandac's CP formulation is not able to find an optimal solution for large-size instances. In our approach, we have faced two major difficulties:

- 1 solving an important number of constraints of different types (e.g. geometric constraints, convexity, connectivity, partitioning constraints, etc.); and
- 2 ensuring optimal equilibrium between sectors, using a strong formal guarantee (whereas the Trandac's approach focuses on approximate solutions in terms of balanced workload).

To tackle these issues, we have designed a parallel solving architecture based on an existing portfolio solving library to boost solving performances.

Figure 7 Low-altitude airspace network through the French FIRs on 07 July 2017



6.4 Algerian airspace sectorization results

To test the solving performance and ensure that our BASS tool finds better balanced sectors compared to the competing CP approach (Trandac et al., 2005), we have selected a set of benchmarking instances related to the Algerian airspace for three various periods with features shown in the following Table 3.

6.4.1 Performance analysis

Figure 8 displays the comparative performance speed-up between both the sequential and portfolio versions of our BASS solver. Here, we clearly observe that the portfolio strategy significantly outperforms the classical approach by up to four orders of magnitude for the off-peak hours instances with the number of sectors $k = 11$ and more than two orders of magnitude for:

- 1 off-peak hours instances with $k = 15,17$;
- 2 peak hours instances with $k = 12-17$, and Algeria – 24 h instances with $k = 12,14-15,17$.

Similarly, it is easy to see through the same Figure 8, for three data set categories, with, respectively, $k_1 = 10,12 - 14$, $k_2 = 10$ and $k_3 = 8 - 12$, that the parallel approach brings a slight

improvement to the sequential approach. This is in part explained by the small solving time of the sequential approach. Overall, Figure 8 shows that the portfolio approach succeeded to increase the solving performance of our tool for all benchmarking data sets.

Our previous observations are more accentuated on Figure 9, which compares the CPU-times for computing optimal balanced sectors for various values of k . The figure shows a strict dominance of the BASS tool with the parallel portfolio strategy against the CP approach of Trandac et al. (2005), even for hard instances (i.e. the Algeria 24 h data set). It is important to not here that BASS tool does much more solving efforts to reach the best equitable sectorization solutions and to prove the optimality of the results. This is why, the Trandac et al. tool outperforms the classical BASS (without portfolio) and seems to be competitive to the parallel version in terms of solving performance, but at the expense of solution quality, as we will see in the qualitative comparison.

6.4.2 Qualitative analysis of sectorization

Figure 10 shows a qualitative comparison in terms of balancing workload between all CP sectorization approaches. The results are provided according to three main air traffic periods for the Algerian airspace, namely, a period of 24 h (Figure 10(c)), at peak hours from 10h00 to 11h00 (Figure 10b) and off-peak hours from 03h00 to 04h00 (Figure 10(a)) on the same day. The results clearly show that our portfolio approach provides sectors with the best balanced workload for the period of 24 hours (Figure 10(c)). Indeed, it provides a good spread around the ideal balanced workload (shown by the horizontal line) compared to the Trandac et al. approach, which presents a sectorization solution with outliers (i.e. overloaded/underloaded sectors).

The same behaviour is observed regarding the distributions of the workload balancing for an hour of flight in the Algerian FIR (Figures 10(b) and 10(a)). Here, the disparity between both CP approaches becomes more pronounced, where the solutions provided by BASS are very close to the ideal balanced sectorization.

To further evaluate the quality of the balancing sectorization, we used two measures:

- 1 the standard deviation; and
- 2 the deviation between the smallest and the largest sectors.

According to the standard deviation results, depicted in Figure 11(b), we observe that the BASS portfolio tool always provides more equitable sectorization in comparison to the Trandac et al. approach. Now, when examining the deviation measure, we can also see that Trandac et al. approach achieves poorly in terms of balancing compared to our OWA-based approach

Table 3 Characterization of the benchmarking instances of the Algerian airspace

Instance	Number of nodes	Number of edges	Number of variables	Number of constraints
Algeria – 24 h	52	60	2,633	1,777
Peak hours (10h00–11h00)	27	31	1,396	926
Off Peak hours (03h00–04h00)	27	29	1,390	919

Figure 8 Speed-up analysis of the parallel BASS tool on the Algerian airspace

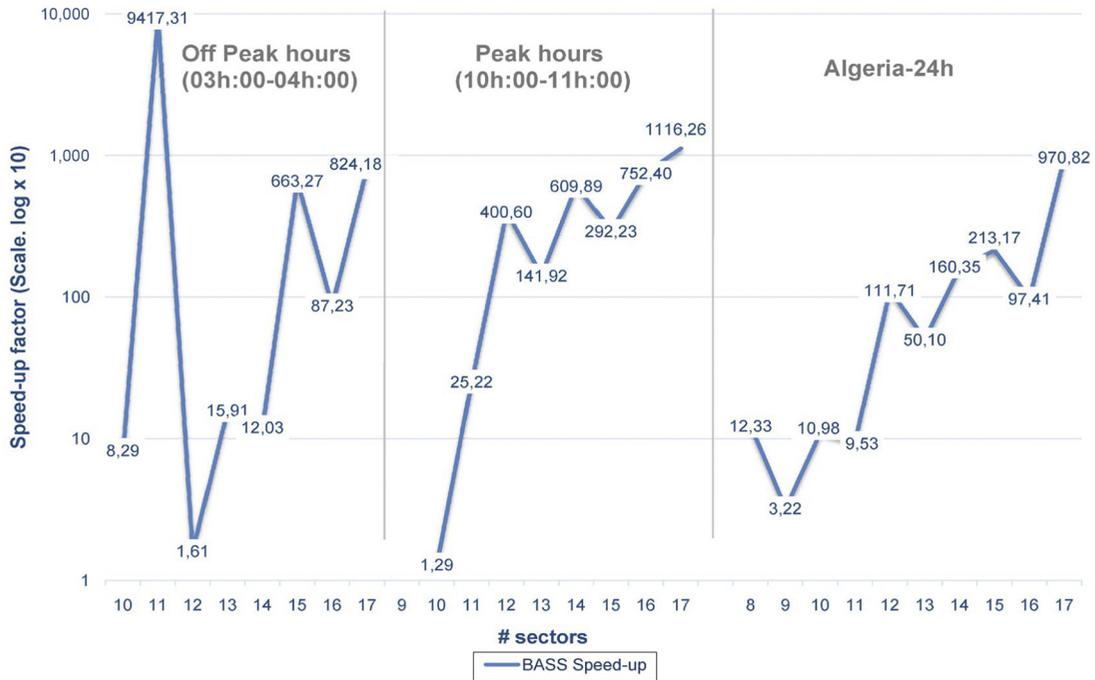
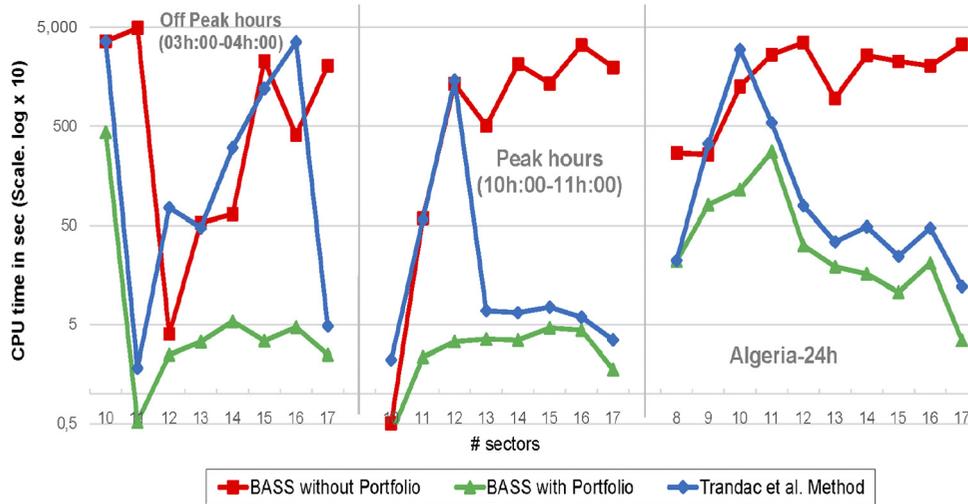


Figure 9 Performance analysis of the sectorization approaches on the Algerian airspace



(Figure 11(a)), which provided the lowest deviation on all data sets.

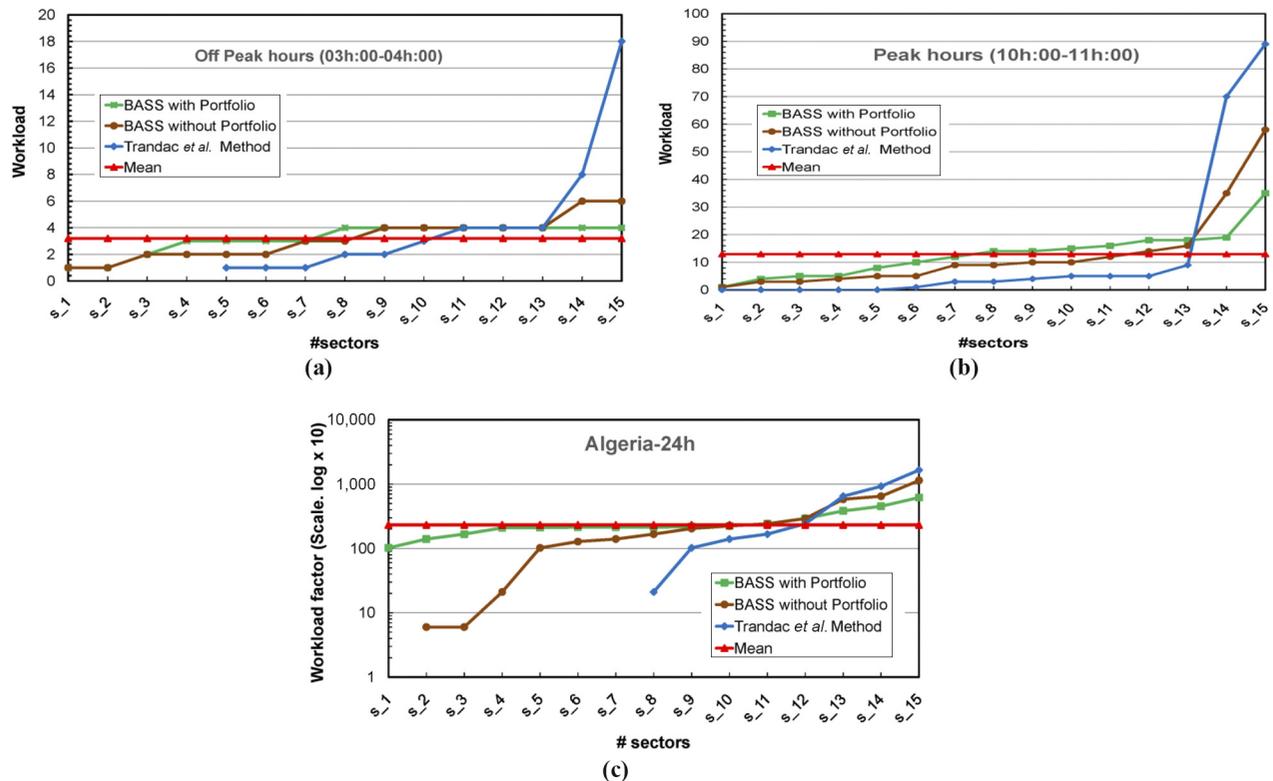
These results are consistent with our theoretical support in terms of balancing properties described in Section 3.5. In fact, the equitable aggregation function (based on OWA weights provided by Theorem 1) implemented in our BASS tool efficiently optimizes the distribution of workloads among sectors, based on the chosen objectives and their respective weights. The values of this equitable aggregation function tend to be close to the average value in the different sectors, as shown in the previous Figure 10.

6.5 French airspace sectorization results

To strengthen our previous evaluations on the Algerian airspace data sets (Section 6.4), we carried out a second experimental validation of the proposed equitable CP sectorization approach with the France air traffic data described in Section 6.2.

The experiments were conducted on data sets according to a whole day on 07 July 2017, and covering the following airspace FIRs: Reims, Marseille, Paris, Bordeaux and Brest. Our experimental evaluation is designed to address the following questions:

Figure 10 Quality of balancing of the resulting sectorizations on the Algerian airspace



Notes: (a) Workload distribution for the off-peak period.; (b) workload distribution for the peak period; (c) workload distribution for the period of 24h

- Q1. How do our CP models compare and scale on the considered data sets?
- Q2. How (in terms of CPU-times) does our portfolio sectorization model compare to the CP model of Trandac et al.?
- Q3. How do the resulting sectorizations compare qualitatively?

The main features of each FIR are shown in Table 4.

6.5.1 Performance analysis

Figure 12 shows the speed-up variation of the portfolio version of BASS according to each FIR airspace and the number of sectors. From this figure, it is worth observing that BASS with the portfolio strategy significantly improves the solving performance for most of the benchmarking instances. In particular, for Marseille FIR with $k = 25,40$, Bordeaux FIR with $k = 20$, Brest FIR with $k = 20, 25, 35$ and Reims with $k = 10$, the parallel BASS achieves more than two order of magnitude higher performance over the sequential version.

Notwithstanding that a performance enhancement of less than one order of magnitude is clearly observed on Marseille FIR with $k = 10$, Bordeaux FIR with $k = 25,30$ and Reims with $k = 5,15,40$, this is in part explained by the results depicted in Figure 13. Interestingly, this figure shows that for lower speed-

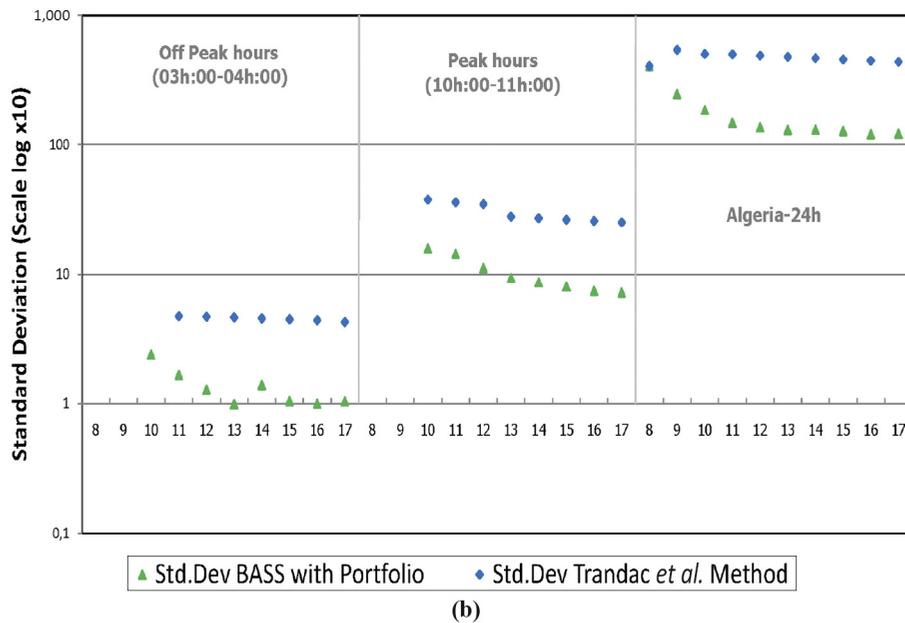
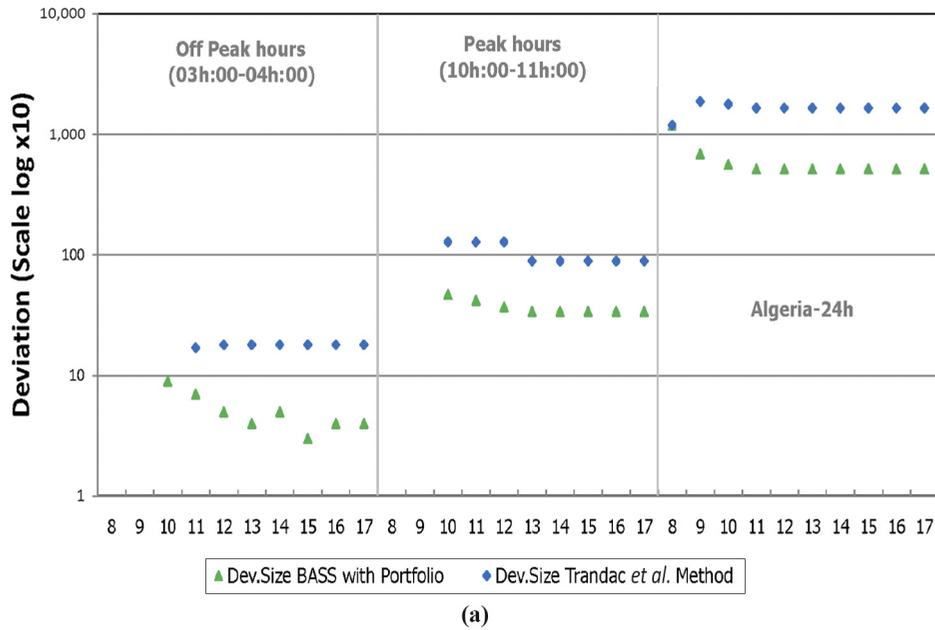
up values, the corresponding CPU-time is less than 2 min, which means that the sequential BASS is rather fast and does not fully draw strength from the parallel approach. This figure also illustrates the solving performances of the Trandac et al. CP approach.

For Paris and Marseille FIRs, we can see that no result was provided by the Trandac et al. method, because the solving time exceeded the timeout limit of 1 h. We can also see that this approach has a quasi-linear performance and seems to offer better behaviour compared to our tool. However, as we will see in the qualitative analysis (in Section 6.5), the optimal solutions found by the Trandac et al. approach are far to be equitable ones. This most probably explains the good behaviour of this model. Besides, due to the computational complexity induced by the OWA aggregation function implemented in our BASS tool, more CPU-time is required to capture the optimal equitable sectorization. Nevertheless, our tool has yielded quite competitive performance results.

6.5.2 Qualitative analysis of sectorization

To evaluate how well equitable the sectors are with respect to air traffic workloads, we present the result on each region among the five French FIR (Figures 14(a)-(e)). Let us start with the Reims airspace network, which is partitioned into ten sectors ($k = 10$). The distribution of workloads in each sector within 24 h is shown in Figure 14(a). When examining this figure, we can see that BASS tool achieves better workload

Figure 11 Qualitative comparisons between the parallel BASS tool and the Trandac *et al.* method on the Algerian airspace



Notes: (a) Minimum deviation comparison; (b) standard deviation comparison

Table 4 Characterization of the benchmarking instances of the French airspace network

Instance	Number of nodes	Number of edges	Number of variables	Number of constraints
Reims	63	92	2,270	1,539
Bordeaux	73	98	5,940	3,963
Brest	51	60	1,787	1,209
Marseille	126	144	20,203	13,632
Paris	145	158	16,405	11,098

Figure 12 Speed-up analysis of the parallel BASS tool on the France airspace

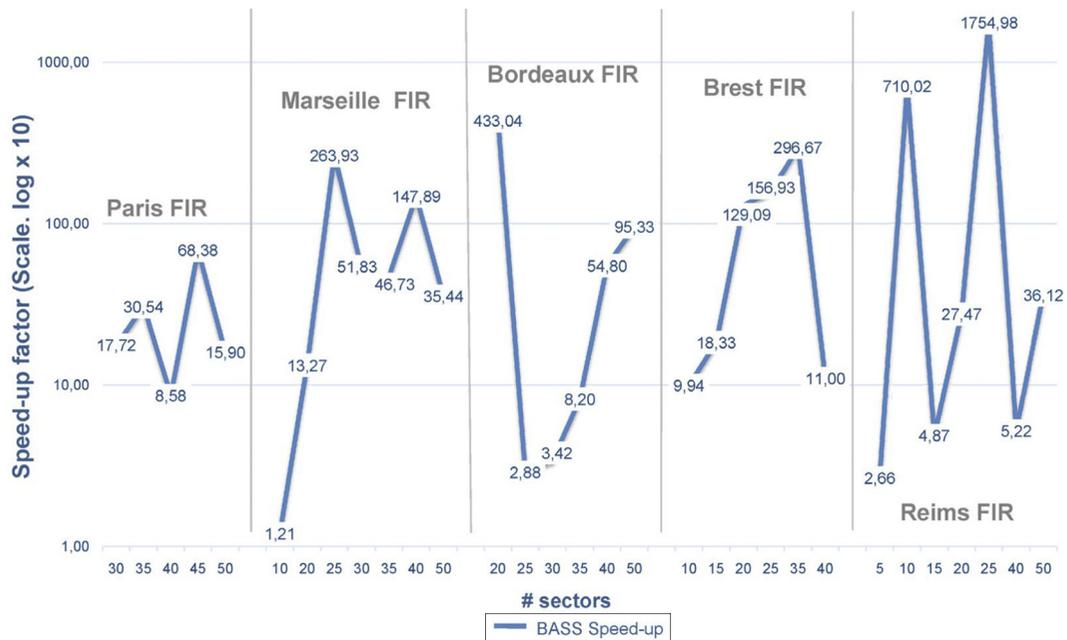
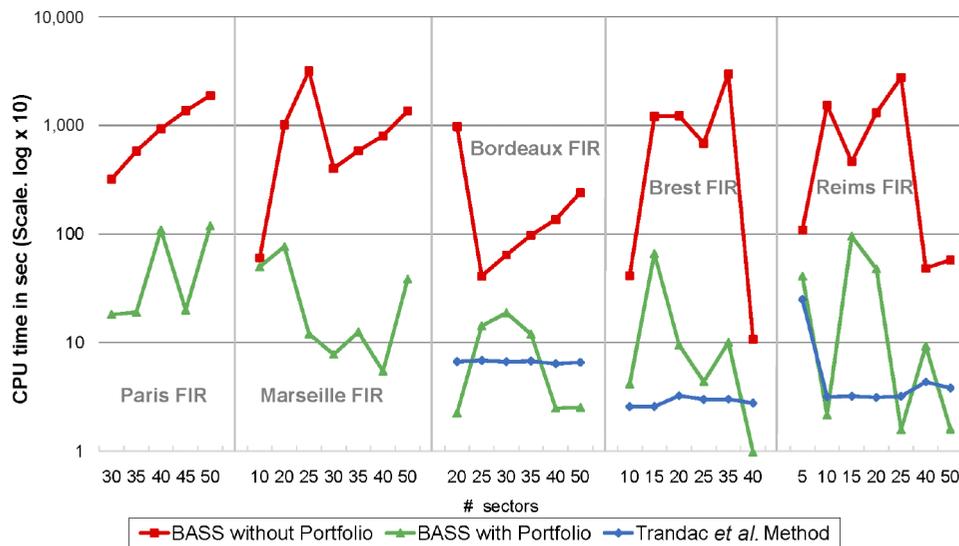


Figure 13 Performance analysis of the sectorization approaches on the France airspace



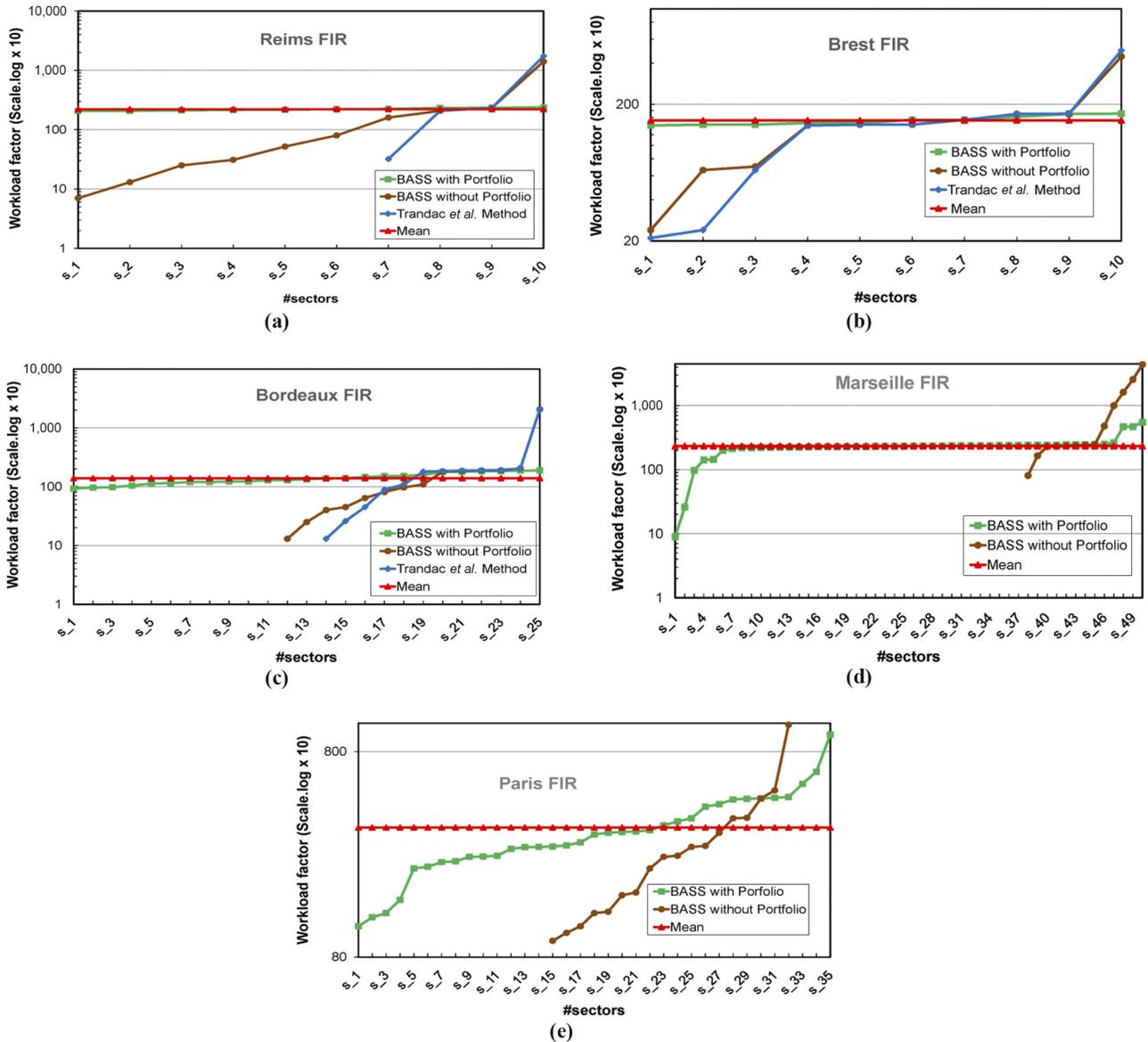
balancing results compared to the ideal balanced workloads and the Trandac *et al.* method. These results can be explained by the fact that our sectorization approach relies on a strong theoretical result, on how to use the OWA aggregation function along with a specialized weights to ensure fair objective values. Thus, our approach tends to offer the best equitable sectors in terms of controllers' workloads by focusing on all the computed sectors, not only the adjacent ones as is the case in the Trandac *et al.* method.

Concerning the Bordeaux airspace, the air routes network is partitioned into 25 sectors, where the sectorization result is

depicted in Figure 14(c). Besides, Figure 14(b) illustrates the workload distribution of the Brest FIR network, which is divided into ten partitions. The observation that we can draw from these two figures is that, on the whole, our BASS tool enables to compute sectors, which are always more equitable compared to the average workload. We also observe that the sectorization solutions of the Trandac *et al.* tool are far to be equitable and lead to several outliers with very high/low workloads.

Figure 14(d) presents the sectorization results of the Marseille airspace network into 50 ($k = 50$) sectors. This figure shows clearly that the whole 50 sectors of Marseille airspace are

Figure 14 Quality of balancing of the resulting sectorizations on the France airspace (07 July 2017)



Notes: (a) Workload distribution of Reims FIR; (b) workload distribution of Brest FIR; (c) workload distribution of Bordeaux FIR; (d) workload distribution of Marseille FIR; (e) workload distribution of Paris FIR

globally well balanced in terms of workload distribution between them, not only the adjacent sectors. Indeed, each sector’s workload is close to the average (perfect) workload. This result is consistent with the theoretical properties of our approach regarding the *transfer principle* that ensures workload inequalities reduction between sectors.

On this instance, the Trandac *et al.* method failed to find a solution within the time allotted. The same behaviour is observed on the Paris FIR. This model is fed into both approaches to compute a balanced sectorization with the number of sectors $k = 35$ (Figure 14(e)). For this data set, only our BASS tool has found a solution.

We recall that to decide whether a solution is better than another solution, we have defined the average workload as the ideal goal that we can achieve without any constraint to satisfy. However, for our benchmarking instances, there are several complicated constraints to consider (e.g. convexity, connectivity, etc.) when looking for the optimal balanced sectorization solution. This can explain why we cannot attain the ideal average workload in practice, although our approach remains optimal in terms of equilibrium.

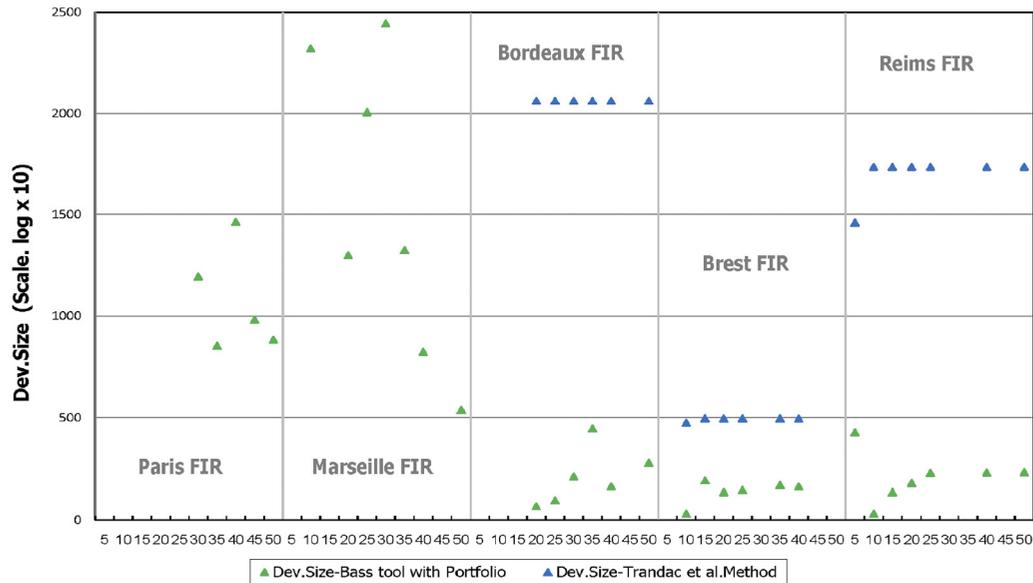
Another fine-grained way to achieve a qualitative comparison is to consider both the deviation (between the largest and the smallest resulting sectors in terms of workload) and the

standard deviation. The results of this qualitative analysis are presented in Figure 15(a) and (b). For both figures, we focus our comparison only on the Bordeaux, Brest and Reims FIRs where we have a result for both approaches (BASS and Trandac *et al.* tools). From Figure 15(a), it is easy to see that the sectorization results of our tool are very satisfactory and outperforms the second approach by several orders of magnitude, especially for Bordeaux and Reims FIRs. When considering Figure 15(b), we observe that the disparity between both approaches is more pronounced in terms of standard deviation measure. This figure shows a great

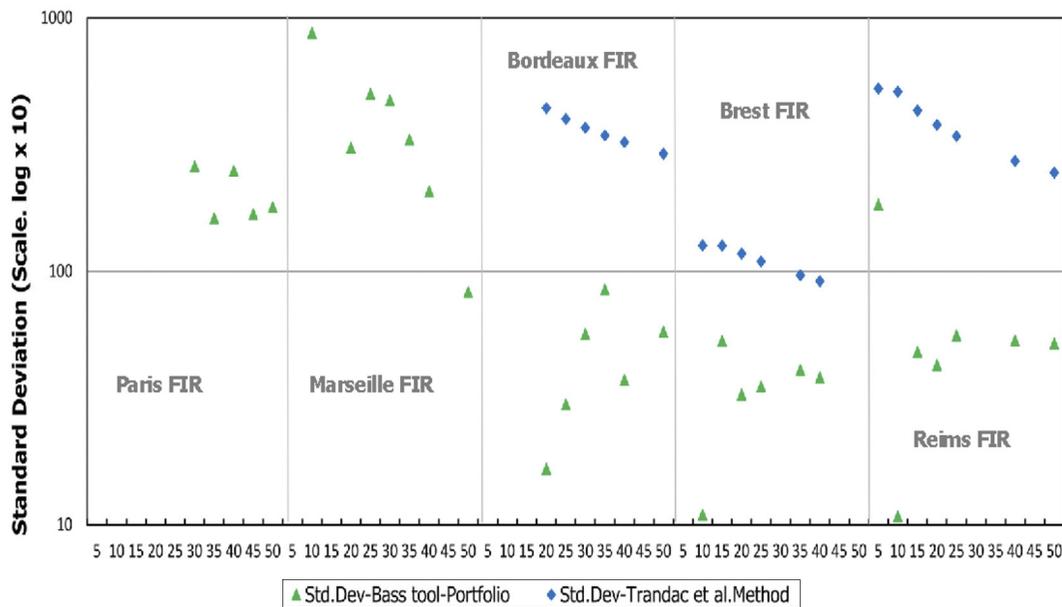
dominance of our parallel BASS tool against the CP approach of Trandac *et al.* (2005), for all the benchmarking data sets, while achieving high-quality equitable sectorization.

In summary, we argue that our parallel OWA-based CP approach tends to offer the best compromise between solving time and balanced sectorization. We also stress that our parallel tool has the *anytime property*, which means that during solving, it provides, at any time, a workable sectorization solution that satisfies all the underlying sectorization constraints. This is an interesting feature, especially when solving hard instances.

Figure 15 Qualitative comparison of the CP approaches on the France airspace



(a)



(b)

Notes: (a) Minimum deviation comparison; (b) standard deviation comparison

7. Conclusion

This article proposes a new equity model EQASP using CP and the OWA equitable aggregation function to achieve a balanced ATCs workload along the control sectors, with a thorough satisfying of airspace sectorization constraints. We have also introduced a parallel cooperative portfolio architecture, called BASS, to tackle hard instances of airspace sectorization. BASS integrates various search strategies and a customized heuristic proposed by Kernighan and Lin to fine-tune the solver and improve the solving performances. The BASS tool has been compared with the CP approach proposed by Trandac *et al.*, on real air traffic data to get a balanced workload ATC sector.

To evaluate the quality of the workload distribution across all sectors, we have proposed two different benchmarking data sets for airspace sectorization. The first is the Algerian low-altitude airspace with three various periods (off-peak hours, peak hours and 24 h) on the same day. The second data set is the French low-altitude airspace with five FIRs for 24 h a day. We have noticed that compared with Trandac *et al.* approach, our BASS tool generated better workload balancing sectors according to the ideal balanced workloads. Regarding the solving performances, we have highlighted that our BASS tool with the portfolio strategy has significantly improved the solving performances compared with the sequential version, for all of the benchmarking instances, and has always provided an exploitable balanced sectorization solution that meets all the underlying sectorization constraints.

Our new methodology based on strict equity applied to the airspace sectorization offers an efficient solution, which is a good compromise between the quality of the solution and the running time.

As a perspective, we plan to tackle sectorization problems where it is needed to get instantaneous solution. It is clear from this context that an exact and complete solution cannot be got instantaneously. Thus, it is challenging to get a quick solution sacrificing strict equity and exactness of the solution, but maintaining strictly only critical constraints, with a fast running time.

Notes

- 1 We have used Stirling number of the second kind, which characterizes the number of ways to get p partitions, from a set of n elements into k nonempty subsets.
- 2 For a detailed description of these strategies, the reader can consult Prud'homme *et al.* (2017).

References

- Abramson, B. and Yung, M. (1989), "Divide and conquer under global constraints: a solution to the n-queens problem", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol. 6 No. 3, pp. 649-662.
- Amadini, R. (2015), "Portfolio approaches in constraint programming", *Constraints*, Vol. 20 No. 4, pp. 483-483.
- Basu, A., Mitchell, J.S. and Sabhnani, G.K. (2009), "Geometric algorithms for optimal airspace design and air traffic controller workload balancing", *Journal of Experimental Algorithmics (Algorithmics)*, Vol. 14, p. 3.
- Bichot, C.-E. (2007), "A new method, the fusion fission, for the relaxed k-way graph partitioning problem, and comparisons with some multilevel algorithms", *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol. 6 No. 3, pp. 319-344.
- Bouveret, S. and Lemaitre, M. (2009), "Computing leximin-optimal solutions in constraint networks", *Artificial Intelligence*, Vol. 173 No. 2, pp. 343-364.
- Brinton, C. and Pledge, S. (2008), "Airspace partitioning using flight clustering and computational geometry", *Digital Avionics Systems Conference, DASC, IEEE/AIAA 27th, IEEE*.
- Chen, J. (1996), *Computational Geometry: Methods and Applications*, Department Computer Science, TX A&M University, TX February.
- Chong, K.M. (1976), "An induction theorem for rearrangements", *Canadian Journal of Mathematics*, Vol. 28 No. 1, pp. 154-160.
- Delahaye, D., Schoenauer, M. and Alliot, J.-M. (1998), "Airspace sectoring by evolutionary computation", *Evolutionary Computation Proceedings, IEEE World Congress on Computational Intelligence, The 1998 IEEE International Conference on, IEEE*, pp. 218-223.
- Drew, M. (2008), "Analysis of an optimal sector design method", *Digital Avionics Systems Conference, DASC IEEE/AIAA 27th, IEEE*.
- Dubois, D. and Fortemps, P. (1999), "Computing improved optimal solutions to max-min flexible constraint satisfaction problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 118 No. 1, pp. 95-126.
- European Aviation Safety Agency (2016), "Study and recommendations regarding unmanned aircraft Geo-Limitations", available at: www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/GTF%20-%20Report_Issue2.pdf, (accessed 21 March 2018).
- FAA and NASA (2017), "UAS traffic management research plan", available at: www.faa.gov/uas/research/utm/media/FAA_NASA_UAS_Traffic_Management_Research_Plan.pdf, (accessed 03 June 2018).
- Flener, P., Pearson, J., Ågren, M., Garcia-Avello, C., Celiktin, M. and Søren, D. (2007), "Air-traffic complexity resolution in multi-sector planning", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 13 No. 6, pp. 323-328.
- Garey, M.R. and Johnson, D.S. (1979), *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman. San Francisco.
- Gerdes, I., Temme, A. and Schultz, M. (2018), "Dynamic airspace sectorisation for flight-centric operations", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 95, pp. 460-480.
- Golden, B. and Perny, P. (2010), "Infinite order Lorenz dominance for fair multiagent optimization", *AAMAS*, pp. 383-390.
- Hind, H., El Omri, A. and Abghour, N. (2018), "Dynamic airspace configuration: review and open research issues", *4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL) IEEE*, p. 1-7.
- Jägare, P. (2011), "Airspace sectorisation using constraint programming".
- Jägare, P.P. (2013), "Airspace sectorisation using constraint-based local search", ATM 2013, Federal Aviation Administration, Chicago, IL, 10-13 June.

- Kernighan, B.W. and Lin, S. (1970), "An efficient heuristic procedure for partitioning graphs", *Bell System Technical Journal*, Vol. 49 No. 2, pp. 291-307.
- Kicinger, R. and Yousef, A. (2009), "Heuristic method for 3d airspace partitioning: genetic algorithm and agent-based approach", *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO) and Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium (ANERS)*.
- Klein, A. (2005), "An efficient method for airspace analysis and partitioning based on equalized traffic mass", *Proceedings of the 6th USA/Europe Air Traffic Management R & D Seminar*.
- Klein, A., Rodgers, M.D. and Kaing, H. (2008), "Dynamic FPAS: a new method for dynamic airspace configuration", *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, ICNS, IEEE*, pp. 1-11.
- Kopardekar, P., Bilimoria, K. and Sridhar, B. (2007), "Initial concepts for dynamic airspace configuration", *7th AIAA ATIO Conf, 2nd CELAT Int'l Conf on Innov and Integer in Aero Sciences, 17th LTA Systems Tech Conf; followed by 2nd TEOS Forum*.
- Kopardekar, P., Rios, J., Prevot, T., Johnson, M., Jung, J. and Robinson, J. (2016), "Unmanned aircraft system traffic management (utm) concept of operations", *AIAA Aviation Forum*.
- Kostreva, M.M., Ogryczak, W. and Wierzbicki, A. (2004), "Equitable aggregations and multiple criteria analysis", *European Journal of Operational Research*, Vol. 158 No. 2, pp. 362-377.
- Lesca, J.e. (2010), "LP solvable models for multiagent fair allocation problems", *ECAI*, pp. 393-398.
- Li, J., Wang, T., Savai, M. and Hwang, I. (2010), "Graph-based algorithm for dynamic airspace configuration", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 33 No. 4, pp. 1082-1094.
- Marshall, A.W., Olkin, I. and Arnold, B.C. (1979), *Inequalities: theory of Majorization and Its Applications*, Academic Press, New York, NY.
- Martinez, S., Chatterji, G., Sun, D. and Bayen, A. (2007), "A weighted-graph approach for dynamic airspace configuration", *AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit*, p. 6448.
- Moulin, H. (1989), *Axioms of Cooperative Decision Making*, Cambridge Books, Cambridge University Press Cambridge.
- Prud'homme, C. Fages, J.-G. and Lorca, X. (2017), "Choco documentation", TASC-LS2N CNRS UMR 6241, COSLING S.A.S.
- Régin, J.-C. (2011), *Global Constraints: A Survey, in Hybrid Optimization*, in Milano M. and Van Hentenryck M. (Eds), Springer, New York, NY pp. 63-134.
- Rossi, F., van Beek, P. and Walsh, T. (2006), *The Handbook of Constraint Programming*, Elsevier New York, NY.
- Sen, A. and Foster, J. (1997), *On Economic Inequality*, Clarendon Press, Oxford.
- Sergeeva, M., Delahaye, D. and Mancel, C. (2015), "3d airspace sector design by genetic algorithm", *Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 2015 International Conference on, IEEE*, pp. 499-506.
- Shaw, P. (1998), "Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems", *International conference on principles and practice of constraint programming*, pp. 417-431.
- Sherali, H.D. and Hill, J.M. (2013), "Configuration of airspace sectors for balancing air traffic controller workload", *Annals of Operations Research*, Vol. 203 No. 1, pp. 3-31.
- Soh, S.W. (2019), "Sectorisation of airspace based on balanced workloads", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 92 No. 2, pp. 213-221.
- Tang, J., Alam, S., Lokan, C. and Abbass, H.A. (2012), "A multi-objective approach for dynamic airspace sectorization using agent based and geometric models", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 21 No. 1, pp. 89-121.
- Temme, A. and Helm, S. (2016), "Unmanned freight operations", Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV.
- Tien, S.-L. and Homan, R. (2009), "Optimizing airspace sectors for varying demand patterns using multi-controller staffing", *8th USA/Europe ATM R&D Seminar*, Napa Valley, CA.
- Trandac, H. and Baptiste, P. (2003), "Optimized sectorization of airspace with constraints", *Proceedings of 5th Europe/USA ATM R&D Seminar*.
- Trandac, H., Baptiste, P. and Duong, V. (2005), "Airspace sectorization with constraints", *RAIRO - Operations Research*, Vol. 39 No. 2, pp. 105-122.
- Undertaking, S.J. (2015), "European ATM master plan", available at: www.atmmasterplan.eu/ (accessed 15 November 2018).
- Weymark, J.A. (1981), "Generalized Gini inequality indices", *Mathematical Social Sciences*, Vol. 1 No. 4, pp. 409-430.
- Wolpert, D.H. and Macready, W.G. (1997), "No free lunch theorems for optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 1 No. 1, pp. 67-82.
- Wolsey, L. (1998), *Integer Programming*, Wiley-Interscience publication, Wiley New York, NY.
- Xu, L., Hutter, F., Hoos, H.H. and Leyton-Brown, K. (2007), "Satzilla-07: the design and analysis of an algorithm portfolio for sat", in Bessière, C. (Ed.), *Principles and Practice of Constraint Programming - CP*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 712-727.
- Xue, M. (2009), "Airspace sector redesign based on Voronoi diagrams", *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, Vol. 6 No. 12, pp. 624-634.
- Yager, R.R. (1988), "On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 18 No. 1, pp. 183-190.
- Yousefi, A. and Donohue, G. (2004), "Temporal and spatial distribution of airspace complexity for air traffic controller workload-based sectorization", in *AIAA 4th aviation technology, integration and operations (ATIO) forum*.

Corresponding author

Abdessamed Mogtiti can be contacted at: mogsamed@gmail.com

For instructions on how to order reprints of this article, please visit our website:

www.emeraldgroupublishing.com/licensing/reprints.htm

Or contact us for further details: permissions@emeraldinsight.com