

Titre: Ré-optimisation en temps réel pour le problème de rotations
Title: d'équipages

Auteur: Emna Fathalli
Author:

Date: 2026

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Fathalli, E. (2026). Ré-optimisation en temps réel pour le problème de rotations
Citation: d'équipages [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/76656/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/76656/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Issmaïl El Hallaoui, & Guy Desaulniers
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche _Mathématiques appliquées
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ré-optimisation en temps réel pour le problème de rotations d'équipages

EMNA FATHALLI

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Mathématiques

Mai 2026

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Ré-optimisation en temps réel pour le problème de rotations d'équipages

présenté par **Emna FATHALLI**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Louis-Martin ROUSSEAU, président

François SOUMIS, directeur de recherche

Issmaïl EL HALLAOUI, membre et directeur de recherche

Guy DESAULNIERS, membre et codirecteur de recherche

Youssef DIOUANE, membre

DÉDICACE

À ma famille,

À mes parents, ainsi qu'à mes sœurs Chaima et Asma, qui ont toujours été mon plus grand soutien. Même séparés par des continents, par la distance et le décalage horaire, vous avez toujours été présents pour moi, sans exception. Votre amour, votre confiance et vos encouragements constants m'ont portée tout au long de ce parcours. Dans les moments de doute comme dans les moments de réussite, j'ai toujours su pouvoir compter sur vous. Vous avez été ma force, mon équilibre et mon refuge, peu importe les circonstances. Je suis infiniment reconnaissante de vous avoir dans ma vie, et ce travail est aussi le vôtre.

À ma meilleure amie, Nazia, tu as été pour moi une véritable seconde famille ici. Merci d'avoir été présente dans mes moments de joie, et surtout dans les plus difficiles. Ton soutien, ta présence et ton aide ont compté bien plus que les mots ne peuvent l'exprimer.

À tous mes amis, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, ne serait-ce que par un mot d'encouragement ou une pensée positive.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d’abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Issmail El Hallaoui, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité constante et la qualité de ses conseils. Tout au long de ce travail, il a su me guider avec précision, en m’apportant des pistes de réflexion pertinentes. Sa capacité à porter un regard critique sur les idées, de manière constructive, et à orienter efficacement les travaux a été déterminante dans l’aboutissement de ce mémoire. Je lui suis également reconnaissante pour sa confiance, son soutien et son engagement tout au long de ce projet.

Je souhaite également remercier chaleureusement mon codirecteur, Guy Desaulniers, pour la qualité de ses retours, la pertinence de ses commentaires et son exigence scientifique. Ses remarques détaillées et toujours constructives ont permis d’améliorer significativement la qualité, la clarté et la cohérence de ce travail. Son expertise et sa vision approfondie des problématiques abordées ont constitué un apport précieux, en contribuant à clarifier les idées et à consolider la qualité globale du travail.

Je remercie sincèrement IBS pour leur collaboration, le temps qu’ils ont consacré à ce projet ainsi que pour leurs retours constructifs. Leur implication et leur perspective industrielle ont permis d’ancrer ce travail dans une réalité opérationnelle concrète.

Je tiens à adresser mes remerciements à Hocine Bouarab pour son aide précieuse dans la validation des aspects techniques et du code. Son expertise, ses conseils et son partage de connaissances ont été d’un grand soutien tout au long du projet.

Je remercie également Frédéric Quesnel pour la mise à disposition des données utilisées dans ce travail, qui ont constitué une base essentielle pour les analyses réalisées.

Enfin, et surtout, je souhaite rendre un hommage particulier à François Soumis. Sans lui, ce parcours n’aurait tout simplement pas été possible. Par sa vision, sa sagesse, son accompagnement et son approche toujours orientée vers la recherche de solutions, il a profondément marqué mon cheminement académique et personnel. Son influence dépasse largement le cadre de ce mémoire : elle a façonné ma manière de penser, de travailler et d’aborder les défis. Je lui suis infiniment reconnaissante pour tout ce qu’il m’a transmis. Sa mémoire restera une source d’inspiration constante, et je n’oublierai jamais son impact. Merci, sincèrement, pour tout.

RÉSUMÉ

Les opérations aériennes sont particulièrement sensibles aux perturbations, même de faible ampleur. Des événements tels que des annulations isolées de vols ou de légers retards peuvent rendre des rotations d'équipage initialement faisables non conformes aux contraintes réglementaires et opérationnelles, entraînant l'apparition de vols ouverts nécessitant une intervention rapide. Dans les centres de contrôle des opérations aériennes, ces situations sont encore en grande partie traitées de manière manuelle, sur la base de l'expertise des opérateurs, ce qui peut limiter la reproductibilité et l'efficacité des décisions.

Ce mémoire s'intéresse au problème de réparation des rotations d'équipage en temps réel sous perturbations mineures. L'objectif est de restaurer rapidement la faisabilité des rotations affectées tout en minimisant les modifications apportées au plan initial. L'approche proposée repose sur une combinaison de mécanismes de réparation locale, de génération de rotations candidates et d'optimisation mathématique.

Dans un premier temps, un modèle de données structuré est construit à partir de données opérationnelles anonymisées issues d'un réseau de type Northwest. Une procédure de génération de scénarios de perturbation est ensuite mise en place afin de simuler des situations réalistes d'exploitation. Le processus de réparation débute par une phase de correction rapide visant à traiter localement les discontinuités dans les rotations perturbées. Lorsque cette phase ne permet pas de couvrir l'ensemble des vols ouverts, un réseau espace-temps est utilisé pour générer des rotations alternatives respectant les contraintes temporelles et opérationnelles. Un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes est finalement utilisé pour sélectionner une solution globale cohérente.

Les résultats expérimentaux montrent que l'approche permet de restaurer rapidement la couverture des vols avec un impact limité sur les rotations initiales, tout en respectant les contraintes de légalité. Cette contribution met en évidence l'intérêt d'une approche hybride combinant réparation locale, génération de rotations via un réseau espace-temps et optimisation par programmation linéaire en nombres entiers mixtes pour la gestion des perturbations mineures en exploitation aérienne.

ABSTRACT

Airline operations are highly sensitive to disruptions, even when they are minor. Events such as isolated flight cancellations or small delays can render initially feasible crew pairings non-compliant with regulatory and operational constraints, leading to uncovered flights that require rapid intervention. In Airline Operations Control Centers, these situations are still largely handled manually, based on operators' expertise, which may limit the reproducibility and efficiency of decisions.

This thesis addresses the real-time crew pairing recovery problem under minor disruptions. The objective is to quickly restore the feasibility of disrupted pairings while minimizing deviations from the initial plan. The proposed approach relies on a combination of local repair mechanisms, candidate pairing generation, and mathematical optimization.

First, a structured data model is constructed from anonymized operational data derived from a Northwest-type airline network. A disruption scenario generation process is then developed to simulate realistic operational situations. The recovery process begins with a quick-fix phase that locally resolves inconsistencies within disrupted pairings. When this phase is insufficient to cover all open flights, a time-space network is used to generate alternative pairings that satisfy temporal and operational constraints. A mixed-integer linear programming model is then used to select a consistent global solution.

Computational results show that the approach enables rapid recovery of flight coverage with limited impact on the initial pairings, while ensuring compliance with operational constraints. This work highlights the relevance of a hybrid approach combining local repair, pairing generation through a time-space network, and mixed-integer linear programming optimization for managing minor disruptions in airline operations.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES ALGORITHMES	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES ANNEXES	xiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Objectifs de recherche	2
1.2 Plan du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Introduction à la gestion des perturbations aériennes	5
2.2 La réparation des horaires d'équipages (<i>Crew Recovery Problem</i>)	6
2.3 Problème de <i>Crew Rostering</i>	8
2.4 Tendances, limites et une synthèse rapide	10
2.5 Contributions de ce mémoire	12
CHAPITRE 3 DÉFINITION DU PROBLÈME, MODÉLISATION, TRAITEMENT DES DONNÉES ET GÉNÉRATION DES SCÉNARIOS DE PERTURBATION	13
3.1 Définition du problème	13
3.2 Préparation et analyse des jeux de données	15
3.2.1 Génération initiale des rotations et des blocs mensuels	17
3.2.2 Extraction et prétraitement des données	18
3.2.3 Nettoyage et enrichissement des données	19
3.2.4 Modélisation objet des données, sérialisation et stockage	21
3.2.5 Modèle conceptuel de données	23
3.3 Génération des scénarios de perturbation	24

3.3.1	Principe général	25
3.3.2	Types de perturbations simulées	25
3.3.3	Approche retenue pour la génération des scénarios	26
3.4	Conclusion du chapitre	27
CHAPITRE 4 MODÈLE DE RÉPARATION ET MÉTHODES DE RÉOPTIMISATION APRÈS PERTURBATIONS MINEURES		28
4.1	Processus global de réparation	28
4.2	Processus détaillé de réparation	30
4.3	Moteur de validation des règles	32
4.4	Mécanisme de réparation rapide (Quick Fix)	33
4.5	Modèle mathématique de réparation	35
4.6	Réseau espace-temps et structure du graphe	38
4.7	Procédure de réacheminement pour le recouvrement des vols ouverts	41
4.7.1	Réacheminement à partir des seules rotations perturbées	43
4.7.2	Réacheminement avec extension aux rotations saines	43
4.8	Conclusion du chapitre	44
CHAPITRE 5 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS		45
5.1	Présentation des instances étudiées	45
5.1.1	Instance NW319	46
5.1.2	Caractéristiques globales des instances.	53
5.2	Indicateurs d'évaluation et métriques de performance	54
5.3	Résultats comparatifs de la procédure de réparation	56
5.3.1	Résultats globaux par instance	56
5.3.2	Analyse détaillée des impacts opérationnels	60
5.4	Analyse computationnelle et comportement algorithmique	63
5.4.1	Temps d'exécution	63
5.4.2	Convergence du processus de réparation	64
5.5	Discussion des résultats	66
5.6	Conclusion du chapitre	67
CHAPITRE 6 CONCLUSION		68
6.1	Synthèse des travaux et limitations	68
6.2	Améliorations futures	69
RÉFÉRENCES		71

ANNEXES	73
-------------------	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Règles de validation appliquées par le moteur de validation des règles.	33
Tableau 5.1	Caractéristiques structurelles des instances expérimentales.	53
Tableau 5.2	Résultats globaux de la correction rapide (QF) pour l'ensemble des instances.	57
Tableau 5.3	Résultats globaux du réacheminement pour l'ensemble des instances.	58
Tableau 5.4	Résultats globaux du réacheminement selon les scénarios de perturbation.	60
Tableau 5.5	Impacts opérationnels détaillés de la correction rapide.	61
Tableau 5.6	Impacts opérationnels détaillés du réacheminement.	62
Tableau 5.7	Temps d'exécution des différentes phases de la procédure de réparation.	63
Tableau 5.8	Analyse de la convergence du processus de réparation.	65

LISTE DES ALGORITHMES

Figure 3.1	Chaîne globale de nettoyage, normalisation et structuration des données	20
Figure 3.2	Construction hiérarchique du modèle objet	22
Figure 3.3	Génération contrôlée d'un scénario par annulations	26
Figure 4.1	Processus détaillé de réparation des rotations	31
Figure 4.2	Mécanisme de réparation rapide (Quick Fix)	34
Figure 4.3	Génération de chemins réalisables pour un service avec réacheminement	40
Figure 4.4	Génération de rotations candidates par réacheminement (pool de vols ouverts)	42

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1	Modèle conceptuel de données	24
Figure 4.1	Processus global de réparation des rotations à partir d'un modèle de données perturbé.	30
Figure 4.2	Structure du réseau espace-temps utilisé pour la génération de séquences de réacheminement.	39
Figure 5.1	Nombre total de vols par jour sur l'horizon étudié pour l'instance NW319.	46
Figure 5.2	Distribution horaire du nombre total de vols et des vols touchant une base pour la journée du 15 janvier dans l'instance NW319	47
Figure 5.3	Nombre total de départs depuis des aéroports non-base par jour pour l'instance NW319.	48
Figure 5.4	Nombre de départs depuis des aéroports non-base par heure pour la journée du 15 janvier de l'instance NW319.	49
Figure 5.5	Nombre de rotations générées par jour pour l'instance NW319.	50
Figure 5.6	Répartition du nombre total de rotations par base pour l'instance NW319.	50
Figure 5.7	Nombre de rotations par base et par jour pour l'instance NW319. . .	51
Figure 5.8	Nombre d'équipages retournant à leur base et ne retournant pas à la base par jour pour l'instance NW319.	52
Figure 5.9	Répartition quotidienne des équipages terminant dans une autre base ou dans un aéroport non-base pour l'instance NW319.	53

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Liste maître des notations	73
----------	--------------------------------------	----

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les centres de contrôle des opérations aériennes (*Airline Operations Control Centers (AOCC)*) occupent une place centrale dans le fonctionnement quotidien des compagnies aériennes. Leur mission consiste à assurer la continuité du service dans un environnement opérationnel caractérisé par des réseaux de vols de plus en plus denses, des marges temporelles réduites et un ensemble de contraintes réglementaires et contractuelles particulièrement strictes. Dans ce contexte, chaque décision prise au niveau de l'AOCC peut avoir des répercussions immédiates sur la ponctualité des opérations, la sécurité des vols, ainsi que sur la satisfaction des passagers et des équipages.

Parmi les composantes critiques du système opérationnel, la planification des équipages occupe une position centrale. Elle assure la couverture complète des vols programmés en organisant le travail des équipages sous forme de rotations (*pairings*), c'est-à-dire de successions de vols planifiées qui commencent à une base équipage et se terminent généralement à cette même base, tout en respectant un ensemble complexe de règles de légalité. Ces rotations constituent un équilibre délicat entre efficacité opérationnelle, conformité réglementaire et stabilité organisationnelle. Toute altération de cet équilibre peut rapidement compromettre l'exécutabilité du programme de vols.

Le cadre réglementaire encadrant la planification des équipages est défini par des normes internationales, telles que les règles relatives aux temps de travail et de repos (EASA ORO.FTL en Europe ou les réglementations équivalentes en Amérique du Nord), auxquelles s'ajoutent des dispositions contractuelles propres à chaque compagnie aérienne. Ces règles imposent notamment des limites sur les temps de connexion entre vols, les durées maximales de service, les temps de repos minimaux entre services successifs, ainsi que sur la structure et la continuité des rotations. Le respect de ces contraintes est une condition nécessaire à la légalité des opérations, mais également à leur faisabilité pratique en temps réel.

Cependant, même lorsque les rotations sont initialement construites de manière conforme, leur conformité est régulièrement mise à l'épreuve par des perturbations dites « mineures ». Contrairement aux événements majeurs tels que les grèves ou les fermetures d'aéroports, ces perturbations correspondent à des incidents d'ampleur limitée, comme des annulations isolées de vols, des retards de courte durée ou des indisponibilités ponctuelles de ressources. Bien que localisées, ces perturbations constituent une source majeure de désorganisation opérationnelle.

En pratique, une perturbation apparemment marginale peut suffire à rendre une rotation non conforme. L’annulation d’un seul vol peut rompre la continuité géographique d’une rotation, un retard limité peut invalider une correspondance, ou un léger décalage temporel peut entraîner le non-respect d’un temps de repos réglementaire. Une rotation perturbée devient alors inexécutable, même si la majorité de ses vols demeurent inchangés. Cette situation entraîne l’apparition de vols ouverts, c’est-à-dire de vols dépourvus d’équipage qualifié, et impose une intervention corrective immédiate.

Les rotations perturbées représentent ainsi un problème central pour les opérations aériennes. Elles génèrent une pression importante sur les équipes des AOCC, car elles doivent être réparées dans des délais très courts afin d’éviter des effets en cascade : retards supplémentaires, annulations en chaîne, repositionnements coûteux d’équipages ou recours à des solutions de dernier recours. Dans les AOCC, ces situations sont encore largement traitées de manière manuelle, à l’aide de règles de gestion et de l’expertise des répartiteurs, ce qui rend la qualité des solutions dépendante de l’expérience individuelle et difficilement reproductible.

Dans ce contexte, la gestion rapide et fiable des rotations perturbées apparaît comme un enjeu majeur. Elle nécessite des outils capables d’identifier précisément les causes de non-faisabilité d’une rotation, de proposer des corrections ciblées respectant l’ensemble des règles applicables, et de limiter autant que possible les modifications apportées aux plans d’équipages initiaux, afin de préserver la stabilité globale des opérations.

1.1 Objectifs de recherche

Ce mémoire s’inscrit dans le contexte de la gestion opérationnelle des perturbations mineures affectant les rotations d’équipage en exploitation aérienne. La problématique centrale étudiée est la suivante : comment concevoir un outil de réparation capable de restaurer rapidement la faisabilité légale et opérationnelle de rotations perturbées, tout en minimisant l’impact des corrections sur la planification existante ?

L’objectif principal de ce travail est de développer un système de décision automatisé permettant de générer, dans des délais compatibles avec une utilisation opérationnelle, des solutions de replanification respectant l’ensemble des contraintes réglementaires, notamment celles liées aux temps de connexion, aux durées de service et aux temps de repos. Le modèle vise avant tout à rétablir rapidement la couverture des vols devenus ouverts à la suite d’une perturbation, en produisant des solutions légalement et opérationnellement faisables. L’objectif n’est pas de reconstruire la planification des équipages à partir de zéro, mais de restaurer la faisabilité des rotations affectées en respectant les contraintes réglementaires liées aux temps de

connexion, aux durées de service et aux temps de repos, tout en garantissant qu'un membre d'équipage ne soit affecté qu'à une seule rotation.

Les objectifs secondaires consistent à limiter l'impact opérationnel des solutions de réparation proposées. Cela inclut la réduction du nombre de vols laissés ouverts, la limitation du recours à des solutions coûteuses telles que les annulations supplémentaires ou les repositionnements excessifs, ainsi que la préservation maximale de la structure initiale des rotations. En particulier, le processus de réparation privilégie des mécanismes de réparation locale, intervenant prioritairement à l'intérieur d'une même rotation, avant d'envisager des réorganisations impliquant plusieurs rotations distinctes.

L'accent est ainsi mis sur la rapidité, la légalité et la maîtrise des coûts des solutions produites, dans un cadre explicitement adapté à la gestion de perturbations mineures en exploitation aérienne.

Pour atteindre ces objectifs, ce travail adopte une approche fondée sur la Programmation Linéaire en Nombres Entiers Mixtes (*Mixed-Integer Programming (MIP)*), combinée à une procédure de génération de rotations alternatives. Les rotations candidates sont produites à l'aide de réseaux espace-temps construits sur des fenêtres de service précisément définies, garantissant par construction les temps de connexion minimaux et des bornes temporelles des services. Les contraintes globales de légalité des rotations sont ensuite validées avant l'intégration des solutions candidates dans le modèle d'optimisation.

Enfin, le recours à un modèle d'optimisation permet de sélectionner, parmi l'ensemble des solutions de réparation envisageables, une combinaison cohérente minimisant un coût global composé du coût des rotations retenues et de pénalités associées aux vols ouverts ou aux équipages non affectés. Cette approche vise à fournir une solution automatisée, homogène et reproductible, réduisant la dépendance aux décisions manuelles et au jugement subjectif des opérateurs humains, tout en restant étroitement alignée avec les pratiques opérationnelles existantes.

1.2 Plan du mémoire

Ce mémoire est structuré en six chapitres, organisés de manière progressive afin d'accompagner le lecteur depuis le contexte opérationnel général jusqu'à la proposition et l'évaluation d'une méthode de réparation des rotations d'équipage après perturbations mineures.

Le présent chapitre introduit le cadre général de la planification des équipages en opérations aériennes. Il met en évidence le rôle central des rotations dans la continuité des opérations, expose la problématique posée par les perturbations mineures affectant ces rotations, et

précise les objectifs et la contribution principale de ce travail.

Le chapitre 2 présente une revue de la littérature consacrée à la gestion des perturbations dans le transport aérien. Nous y discutons plus particulièrement des travaux relatifs à la réparation des équipages, les principales approches de résolution proposées, ainsi que les tendances récentes, telles que les méthodes intégrées et l'apport de techniques issues de l'apprentissage automatique.

Le chapitre 3 définit le problème étudié et décrit les données opérationnelles exploitées. Il présente la chaîne complète de transformation permettant de passer de données brutes issues de la planification initiale à un modèle de données structuré et exploitable. Ce chapitre décrit également la méthodologie de génération des scénarios de perturbation, utilisée pour simuler des situations réalistes d'annulations de vols et de ruptures de faisabilité des rotations d'équipage, qui serviront de base aux méthodes de réparation développées par la suite.

Le chapitre 4 est consacré au cœur méthodologique du mémoire. Il décrit la méthode de réoptimisation et de réparation des rotations après perturbations mineures, en détaillant l'ensemble du processus de réparation. Nous y présentons les mécanismes de correction rapide (*quick-fix*), les procédures de reroutage des vols ouverts, ainsi que la formulation du modèle mathématique permettant de sélectionner une solution globale cohérente.

Le chapitre 5 présente et analyse les résultats obtenus sur différentes instances de test. Les performances de l'approche proposée y sont évaluées au regard d'indicateurs opérationnels et computationnels, afin de mesurer sa capacité à produire rapidement des solutions de qualité tout en limitant les modifications apportées aux plans initiaux.

Enfin, le chapitre 6 conclut ce mémoire en synthétisant les principaux résultats, en discutant les limites de l'étude et en proposant plusieurs pistes d'amélioration et de recherche futures.

Dans son ensemble, ce travail vise à montrer qu'une approche d'optimisation structurée et intégrée, fondée sur une modélisation rigoureuse et une exploitation cohérente des données opérationnelles, peut améliorer de manière significative la réactivité et la qualité de la gestion des perturbations mineures en exploitation aérienne. Les enjeux méthodologiques et opérationnels identifiés ouvrent également la voie à de nouvelles pistes de recherche, notamment à l'interface entre optimisation mathématique et systèmes d'aide à la décision.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue approfondie de la littérature consacrée à la gestion des perturbations dans le transport aérien, en mettant un accent particulier sur la réparation des rotations d’équipages. L’objectif est de situer le problème traité dans ce mémoire par rapport aux travaux existants, d’identifier les principales approches méthodologiques proposées, ainsi que de mettre en évidence les limites et lacunes auxquelles répond notre contribution.

La revue est organisée de la manière suivante. Nous présentons d’abord le contexte général de la gestion des perturbations dans le transport aérien, puis les travaux consacrés à la réparation des équipages. Bien que le transport aérien constitue le contexte principal de ce mémoire, nous ne nous limitons pas uniquement à ce domaine et discutons également d’approches développées dans d’autres contextes de replanification du personnel afin de situer notre contribution dans un cadre méthodologique plus large.

2.1 Introduction à la gestion des perturbations aériennes

L’exploitation d’un réseau aérien repose sur une planification très structurée des vols, des avions et des équipages, élaborée plusieurs semaines ou mois à l’avance. En pratique, cette planification est constamment mise à l’épreuve par des événements imprévus : conditions météorologiques défavorables, pannes techniques, congestions de l’espace aérien, indisponibilités d’équipages ou de passagers, restrictions aéroportuaires, etc. Ces événements, souvent de faible ampleur lorsqu’on les considère individuellement, peuvent se propager dans le réseau et générer des retards en chaîne, des vols annulés et des désalignements importants entre les ressources planifiées et les besoins opérationnels, comme discuté par Clausen et al. (2010); Hassan et al. (2021); Kohl et al. (2007).

La *gestion des perturbations aériennes* (*airline disruption management*) désigne l’ensemble des décisions prises à court terme pour réagir à ces aléas, limiter leur propagation et rétablir un plan d’opérations réalisable à un coût acceptable. Dans la littérature, on distingue généralement quatre familles de problèmes de réparation : la réparation des avions (*aircraft recovery*), des équipages (*crew recovery*), des passagers (*passenger recovery*) et les approches intégrées qui traitent simultanément plusieurs de ces familles (Clausen et al. (2010); Su et al. (2021)). Ces problèmes se posent dans un contexte de forte pression temporelle (Kohl et al., 2007; Yu et al., 2003) : les répartiteurs disposent de quelques minutes pour analyser la situation, évaluer un grand nombre de décisions possibles (annuler un vol, le retarder, modifier

une rotation d'équipage, repositionner un avion, etc.) et choisir une solution qui respecte la réglementation et les contraintes opérationnelles.

Les travaux récents mettent en évidence la complexité croissante de ces décisions dans un environnement où les compagnies aériennes exploitent des réseaux denses, avec des marges de temps réduites et un fort taux d'utilisation des ressources. Plusieurs auteurs proposent des cadres d'optimisation dynamiques, capables de réévaluer le plan au fur et à mesure que de nouvelles perturbations surviennent et que l'incertitude sur l'état du réseau évolue (Lee et al. (2020); Vink et al. (2020)). Néanmoins, l'écart reste important entre les modèles académiques, souvent centrés sur un seul type de ressource (exemple les avions, les équipages ou les passagers) et un horizon de décision bien défini, et les pratiques industrielles, qui combinent outils d'optimisation, règles métiers et expertise des décideurs (Hassan et al. (2021)). Dans ce mémoire, nous nous inscrivons dans ce contexte en nous concentrant sur la réparation des équipages sous l'effet de *perturbations mineures*, pour lesquelles il est possible de proposer des méthodes de réoptimisation rapides, explicitement adaptées aux contraintes opérationnelles de notre partenaire industriel.

2.2 La réparation des horaires d'équipages (*Crew Recovery Problem*)

Dans la pratique, même le meilleur plan de vols et d'équipages est régulièrement remis en cause par des perturbations opérationnelles. Lorsqu'une telle irrégularité survient, le programme de vols planifié ne peut plus être exécuté tel quel et l'exploitant doit rapidement réorganiser l'affectation des équipages pour limiter les annulations et les retards. C'est précisément l'objet du *Crew Recovery Problem* (CRP), que nous pouvons voir comme la contrepartie en temps réel du problème de planification d'équipage.

De façon générale, le CRP consiste à adapter un plan d'équipages déjà optimisé afin de restaurer la faisabilité du programme de vols à moindre coût, tout en respectant l'ensemble des règles de légalité (temps de service, repos, qualification, bases, accords de convention collective, etc.) et en limitant les modifications imposées aux équipages (Chang, 2012; Petersen et al., 2012; Stojković et al., 1998; Yu et al., 2003). Les décisions typiques incluent la réaffectation de vols à des équipages alternatifs, l'introduction de vols en repositionnement (*deadheads*), la coupure ou la fusion de rotations, la modification de périodes de repos, voire l'annulation de certains vols lorsque cela s'avère inévitable (Clausen et al. (2010); Hassan et al. (2021); Su et al. (2021)).

Les travaux recensés dans les revues de la littérature sur la gestion des perturbations aériennes (Clausen et al. (2010); Hassan et al. (2021); Su et al. (2021)) distinguent plusieurs

niveaux de modélisation. Un premier courant se concentre uniquement sur la réorganisation des équipages, en considérant le programme de vols comme donné, éventuellement déjà ajusté par un modèle de réparation des avions (Lee et al. (2020); Vink et al. (2020)). Le CRP est alors généralement formulé sur un réseau espace-temps, où les nœuds représentent des événements (départ ou arrivée d'un vol, début ou fin de service, repos) et les arcs représentent des rotations réalisables pour les équipages (Petersen et al., 2012; Stojković et al., 1998). La solution recherchée est un nouvel ensemble de rotations ou de services couvrant tous les vols critiques, sous réserve de capacité limitée des bases et des contraintes réglementaires. De plus, la littérature consacrée spécifiquement au *Crew Recovery Problem* demeure relativement limitée. À titre d'illustration, Hassan et al. (2021) indiquent que, sur la période 2009–2018, seulement six publications ont été consacrées au CRP, ce qui souligne le caractère encore peu exploré de ce problème comparativement aux autres composantes de la gestion des perturbations aériennes.

Sur le plan méthodologique, nous retrouvons plusieurs grandes familles d'approches. Une première famille repose sur des formulations exactes en programme linéaire en nombres entiers, résolues par des méthodes de type *branch-and-price*. Ces modèles sont proches de ceux utilisés pour la planification initiale, mais adaptés pour intégrer des pénalités de modification de plan (changement de service, rupture de rotation, ajout d'un vol *ferry*, etc.) et parfois des coûts de qualité de service, exemple, sur le nombre de passagers non transportés (Veelenturf et al. (2016); Wei and Vaze (2018)). Une partie de ces travaux développe également des approches dites quasi-robustes, où l'on anticipe différents scénarios de perturbations et où l'on cherche des solutions qui se prêtent bien à une réorganisation ultérieure (Veelenturf et al. (2016)).

Une deuxième famille regroupe les méthodes heuristiques et méta-heuristiques, souvent privilégiées en contexte temps réel. Elles s'appuient sur des règles de construction locales (échanges de segments de rotation, insertion de vols supplémentaires, déplacements de repos) ou sur des recherches à voisinage large pour explorer rapidement l'espace des solutions. Par exemple, Verhaegh et al. (2017) proposent une heuristique temps réel pour les petits incidents dans le transport public, qui construit et évalue rapidement des alternatives de réaffectation pour les conducteurs, en tenant compte de la stabilité du plan et du confort des employés. Des idées similaires apparaissent dans d'autres contextes de réordonnancement de personnel, comme le commerce de détail (Hassani et al. (2021)) ou les hôpitaux (Van den Bergh et al. (2013)), où l'on cherche un compromis explicite entre coût opérationnel et nombre de modifications par rapport au plan initial.

Les modèles de réparation d'équipage diffèrent également par la façon dont ils prennent en compte les autres ressources. Une partie de la littérature considère le CRP de manière

isolée, en supposant que la réparation des avions et des passagers sera traitée dans des modules séparés (Clausen et al. (2010)). D’autres travaux adoptent une vision plus intégrée, où les décisions de réaffectation d’équipage sont coordonnées avec celles sur les avions et les passagers, par exemple via des modèles de réseau multi-couches ou des formulations à objectifs multiples (Hassan et al. (2021); Su et al. (2021)). Ces approches intégrées reflètent mieux la réalité opérationnelle, mais elles restent difficiles à déployer à grande échelle en raison de la taille des modèles et des temps de calcul non admissibles en temps réel.

Malgré la richesse de ces contributions, plusieurs limites ressortent des revues récentes (Hassan et al. (2021); Su et al. (2021)). Premièrement, de nombreux modèles supposent un environnement déterministe ou s’appuient sur un petit nombre de scénarios de perturbation, alors que, dans la pratique, les retards et annulations peuvent se propager de façon complexe dans le réseau. Deuxièmement, les préférences des équipages et certains aspects sociaux (équité entre employés, stabilité du plan, respect des souhaits individuels) sont souvent modélisés de manière très simplifiée, voire ignorés. Troisièmement, une partie importante des travaux se concentre sur des perturbations de forte ampleur, conduisant à une reconstruction quasi complète du plan, alors que les AOCC sont fréquemment confrontés à des perturbations mineures mais répétitives, pour lesquelles des méthodes extrêmement rapides et peu intrusives sont nécessaires. Enfin, le fossé entre les modèles académiques et les systèmes industriels reste important : les règles de légalité utilisées en pratique sont très riches et évoluent avec les conventions collectives, ce qui rend l’intégration d’un modèle d’optimisation complet particulièrement délicate.

2.3 Problème de *Crew Rostering*

La constitution des plans d’équipage, ou *Crew Rostering Problem*, concerne l’affectation d’un ensemble de rotations (vols, activités de formation, congés, réserves) à chaque membre d’équipage pour une période de plusieurs semaines ou plusieurs mois. Contrairement au problème de construction des rotations (*Crew Pairing Problem*), qui se concentre sur la couverture des vols par des rotations anonymes (Quesnel et al., 2020a,b; Tahir et al., 2021), le *Crew Rostering* vise à construire des horaires mensuels, équilibrés, conformes à la réglementation et satisfaisant des critères d’équité et de préférences individuelles.

Dans la littérature, le *Crew Rostering* est reconnu comme l’un des problèmes les plus complexes de la planification aérienne. Van den Bergh et al. (2013) soulignent qu’il combine simultanément : (i) des contraintes réglementaires strictes (temps de service, repos, limites de fatigue), (ii) des préférences individuelles et collectives (équité, ancienneté, jours de congé souhaités), (iii) des objectifs de bien-être organisationnel (distribution équitable des tâches

pénibles, cycles de repos), (iv) et des contraintes opérationnelles liées aux qualifications, aux types d'avions et aux bases d'affectation.

Dans le contexte du *Crew Rostering Problem*, la plupart des approches traditionnelles reposent sur des formulations (MIP) ou des méthodes de génération de colonnes (Tahir et al., 2021), mais l'ampleur du problème rend souvent ces modèles difficiles à résoudre exactement. C'est pourquoi plusieurs travaux proposent des heuristiques, métaheuristiques ou méthodes hybrides combinant optimisations locales, recherche tabou, programmation par contraintes et modèles probabilistes (Van den Bergh et al. (2013); Veelenturf et al. (2016)).

Une difficulté majeure du *Crew Rostering Problem* (CRP) est la nature hautement personnalisée des plans : chaque membre d'équipage possède des qualifications, des contraintes personnelles et des préférences spécifiques, ce qui nécessite de générer des solutions équitables et acceptables, tout en minimisant les coûts associés aux déséquilibres, aux violations mineures des préférences ou aux périodes non productives.

Dans le contexte du présent mémoire, il est important de souligner que nous ne traitons pas le problème complet de reconstruction des plans d'équipage après perturbation. Le rétablissement des horaires individuels constitue un problème à part entière, pour lequel plusieurs approches dédiées existent : modèles de ré-optimisation des horaires en temps réel, approches quasi-robustes prenant en compte l'incertitude opérationnelle (Veelenturf et al. (2016)).

Ces méthodes visent principalement à limiter les modifications imposées aux horaires d'équipages, en conservant autant que possible leurs plans initiaux et leurs préférences, conformément aux pratiques reportées dans l'industrie.

Cependant, dans le cadre de notre projet, nous nous concentrons exclusivement sur la réparation des *rotations* après perturbation. La reconstruction complète des horaires individuels n'est pas abordée dans ce mémoire pour deux raisons :

1. le problème dépasse largement le périmètre opérationnel associé à la gestion de perturbations mineures ;
2. les données Northwest mises à notre disposition ne contiennent pas l'ensemble des éléments nécessaires à la replanification complète des horaires individuels.

Toutefois, bien que nous ne générions pas de nouveaux horaires individuels, nous intégrons pleinement dans notre modèle les contraintes et règles qui découlent du *Crew Rostering*, telles que : les limites quotidiennes et mensuelles de service ; les exigences de repos ; la continuité de qualification avion ; les interdictions relatives aux chevauchements d'activités ; la gestion des bases d'affectation.

Ces règles sont appliquées afin de garantir que toute solution de réparation proposée au Chapitre 4 demeure conforme à un plan réaliste du point de vue des équipages. Ainsi, notre approche se place dans une logique intermédiaire : nous réparons les rotations affectées par la perturbation, tout en respectant les contraintes propres aux plans individuels, sans toutefois reconstruire ces derniers dans leur intégralité.

2.4 Tendances, limites et une synthèse rapide

La littérature consacrée à la gestion des perturbations aériennes et à la réparation des équipages met en évidence plusieurs tendances méthodologiques. Les travaux existants proposent une variété d’approches, allant des modèles d’optimisation exacts aux méthodes heuristiques conçues pour une utilisation en temps réel. Malgré ces avancées, plusieurs limites persistent, notamment en ce qui concerne la complexité des modèles et leur mise en œuvre dans des contextes opérationnels. Cette section présente ainsi les principales tendances identifiées dans la littérature, discute leurs limites et propose une synthèse rapide des enseignements pertinents pour ce mémoire.

De manière générale, trois grandes familles de méthodes dominant la littérature : les approches exactes basées sur des formulations MIP, les heuristiques spécialisées et les algorithmes de génération incrémentale ou dynamique. Ces approches se distinguent par leur capacité à représenter finement les règles opérationnelles, par leur rapidité d’exécution et par les compromis qu’elles impliquent entre optimalité et réactivité.

Une première observation concerne la prépondérance des modèles MIP pour formuler le CRP. Les travaux fondateurs recensés dans le survol de Clausen et al. (2010) montrent que la plupart des contributions s’appuient sur des réseaux espace-temps, permettant de représenter l’évolution des équipages au fil des vols, des périodes de repos et des connexions. Ces modèles souffrent d’une forte complexité combinatoire, ce qui limite leur utilisation dans des environnements en temps réel. Cette difficulté est particulièrement marquée pour les compagnies opérant de grands réseaux, où la taille du modèle peut rapidement devenir prohibitive.

Pour pallier ces limites, plusieurs chercheurs ont proposé des *méthodes heuristiques rapides* conçues spécifiquement pour des perturbations de faible ampleur. Verhaegh et al. (2017) illustrent cette tendance en développant une heuristique en deux phases : la détection des équipages impactés, suivie d’une réparation locale de leurs rotations. Cette approche privilégie la rapidité plutôt que l’optimalité globale, ce qui correspond aux besoins des opérations en temps réel, où les décisions doivent souvent être prises en quelques secondes.

Dans un registre similaire, Hassani et al. (2021), dans un contexte de replanification du

personnel, proposent un algorithme d'étiquetage bi-objectifs visant à produire rapidement des solutions Pareto-optimales. Bien que destiné au secteur du commerce de détail, ce travail illustre une tendance plus générale : l'utilisation de mécanismes d'exploration incrémentale de l'espace des solutions, capables de corriger localement un plan sans devoir le reconstruire entièrement. De telles idées ont progressivement influencé la littérature sur la réparation des horaires d'équipages.

Une autre tendance notable est l'intérêt croissant pour les *approches dynamiques et stochastiques*. Alors que les premiers travaux traitaient les perturbations comme des événements isolés, des modèles plus récents, tels que celui de Lee et al. (2020), intègrent explicitement l'incertitude liée à l'évolution des conditions opérationnelles. Leur modèle *Stochastic Reactive and Proactive Disruption Management* (SRPDM) combine une estimation probabiliste des retards à une optimisation stochastique permettant d'anticiper des perturbations futures. Cette évolution reflète une prise de conscience : les décisions de réparation doivent tenir compte non seulement de l'état actuel du réseau, mais également de sa vulnérabilité à des perturbations ultérieures.

La littérature met également en évidence plusieurs *limites persistantes*. Premièrement, très peu de travaux proposent une intégration complète des différents types de ressources (aéronefs, équipages et passagers). La plupart des modèles traitent un seul sous-problème à la fois, ce qui peut conduire à des solutions sous-optimales lorsqu'une perturbation affecte simultanément plusieurs composantes du système. Deuxièmement, l'obtention de solutions rapides demeure un défi majeur pour les approches exactes, malgré les progrès réalisés en génération de colonnes, en partitionnement d'ensemble et en stabilisation des variables duals. Enfin, plusieurs contraintes opérationnelles, telles que les qualifications multiples des équipages, les règles locales propres aux compagnies ou les interactions fines entre rotations et horaires individuels, restent souvent simplifiées, voire ignorées, pour des raisons de tractabilité.

Dans les contributions plus récentes, on observe une convergence vers des approches hybrides : des modèles exacts appliqués à des sous-ensembles critiques du problème, combinés à des heuristiques permettant une exploration rapide de l'espace des décisions et à des mécanismes de validation par des règles opérationnelles complexes. Les travaux de Veelenturf et al. (2016), par exemple, illustrent cette direction en combinant une approche quasi-robuste avec des mécanismes d'ajustement local afin de produire des solutions à la fois stables et peu coûteuses.

En résumé, les pratiques observées dans la littérature mettent en évidence une tension constante entre précision et rapidité. Les modèles exacts permettent d'obtenir des solutions optimales mais demeurent souvent trop lents pour une utilisation opérationnelle. Les heuristiques, à l'inverse, fournissent des solutions très rapides, mais parfois éloignées de l'optimum.

Les travaux récents tendent ainsi à combiner ces deux approches afin de répondre aux exigences croissantes d'un environnement aérien dynamique et imprévisible. Cette convergence inspire directement les choix méthodologiques développés dans ce mémoire.

2.5 Contributions de ce mémoire

Ce mémoire étudie la ré-optimisation en temps réel des rotations d'équipage après perturbations mineures dans un contexte opérationnel où les décisions doivent être produites rapidement. Nous considérons un plan initial de rotations issu d'un processus classique de planification et cherchons à restaurer sa faisabilité après un nombre limité d'annulations de vols.

La contribution principale de ce mémoire est le développement d'une approche de réparation des rotations d'équipage spécifiquement conçue pour intervenir dans ce contexte de perturbations mineures. Cette approche vise à restaurer rapidement la faisabilité des rotations affectées tout en modifiant le moins possible la structure du plan initial, afin de préserver la stabilité opérationnelle de la planification.

La méthode proposée repose sur plusieurs composantes complémentaires. Elle s'appuie d'abord sur la construction d'un modèle de données structuré permettant de représenter explicitement les vols, les tronçons, les services, les rotations et les blocs mensuels. À partir de ce modèle, une procédure de génération de scénarios de perturbation est mise en place afin de produire des instances réalistes du problème de récupération.

Le processus de réparation repose ensuite sur une combinaison entre une procédure de génération de rotations candidates fondée sur un réseau espace-temps et un modèle de ré-optimisation. Une première phase de réparation rapide vise à corriger localement certaines discontinuités au sein des rotations perturbées. Lorsque ces corrections ne suffisent pas, le réseau espace-temps est utilisé pour générer des rotations alternatives compatibles avec les contraintes temporelles et opérationnelles. Les rotations candidates ainsi obtenues sont ensuite sélectionnées à l'aide d'un MIP permettant d'obtenir une solution globale cohérente assurant la couverture des vols ouverts. L'approche proposée est développée et évaluée sur des données opérationnelles anonymisées de type Northwest, décrites au Chapitre 3, en tenant compte des contraintes spécifiques du contexte industriel considéré.

CHAPITRE 3 DÉFINITION DU PROBLÈME, MODÉLISATION, TRAITEMENT DES DONNÉES ET GÉNÉRATION DES SCÉNARIOS DE PERTURBATION

Ce chapitre présente le cadre du problème étudié ainsi que les données utilisées dans ce travail. Nous définissons d’abord le CRP dans la Section 3.1. Nous décrivons ensuite les données opérationnelles utilisées ainsi que le processus de transformation permettant de construire un modèle de données structuré et exploitable dans la Section 3.2. Le traitement et la structuration de ces données représentent une part importante du travail réalisé dans ce mémoire, car l’objectif était de développer un outil directement exploitable par un partenaire industriel. Pour cette raison, une attention particulière est portée à la construction d’une chaîne de traitement fiable et reproductible, qui constitue une contribution informatique non négligeable de ce travail. Enfin, la Section 3.3 présente la méthode de génération des scénarios de perturbation qui serviront de base aux méthodes de réparation décrites au Chapitre 4.

3.1 Définition du problème

Cette section définit le CRP et en précise le cadre opérationnel, les hypothèses retenues ainsi que les objectifs poursuivis. Le problème étudié s’inscrit dans le contexte des opérations aériennes en temps réel, où des perturbations localisées peuvent compromettre la faisabilité réglementaire et opérationnelle de plans initialement valides. L’objectif n’est pas de reconstruire intégralement les horaires d’équipages, mais de proposer des mécanismes de réparation ciblée permettant de restaurer la légalité des rotations affectées, tout en limitant les modifications apportées aux plans initiaux.

En transport aérien, les rotations d’équipages (ou *pairings*) sont construites à l’avance afin de couvrir l’ensemble des vols programmés tout en respectant un ensemble de contraintes réglementaires, opérationnelles et contractuelles. Ces rotations constituent des séquences planifiées de vols affectées à des équipages, généralement conçues pour débiter et se terminer à une même base de l’équipage, et couvrant un horizon de plusieurs jours. Chaque rotation est composée de services journaliers (*duties*), eux-mêmes constitués de séquences ordonnées de tronçons (*legs*), encadrées par des instants de prise de service (*report time*) et de fin de service (*release time*). Dans ce mémoire, un tronçon désigne l’unité élémentaire de déplacement utilisée dans la construction des rotations. Il correspond à un vol entre deux aéroports donnés, caractérisé par des horaires précis de départ et d’arrivée. Dans certains cas, un tronçon peut également représenter un vol de repositionnement (*deadhead*), durant lequel l’équipage

se déplace comme passager afin de rejoindre le lieu requis pour poursuivre la rotation.

Lors des opérations quotidiennes, des perturbations mineures peuvent survenir, notamment sous la forme d’annulations isolées de vols, de retards ou de décalages temporels limités. Bien que localisées, ces perturbations peuvent suffire à rendre une rotation initialement légale non conforme aux règles en vigueur, en rompant la continuité temporelle ou géographique de la séquence de tronçons planifiée. Les causes principales de non-faisabilité considérées dans ce travail incluent :

- (i) la rupture de la continuité géographique d’une rotation suite à l’annulation d’un vol, empêchant l’équipage de rejoindre le point de départ du tronçon suivant ;
 - (ii) le non-respect du temps minimum de correspondance entre deux vols consécutifs, généralement causé par des retards ou des modifications d’horaires ;
 - (iii) le non-respect du temps de repos minimal requis entre deux services successifs, tel qu’imposé par la réglementation ou les accords contractuels ;
- et (iv) le dépassement du nombre maximal de services autorisés au sein d’une même rotation sur l’horizon de planification considéré.

Lorsqu’une rotation devient non conforme, les vols initialement affectés risquent de devenir *ouverts*, c’est-à-dire dépourvus d’un équipage qualifié (commandant de bord et/ou copilote). Ces vols ouverts constituent une situation critique du point de vue opérationnel, car ils peuvent entraîner des retards en cascade, des annulations supplémentaires ou le recours à des solutions coûteuses de dernier recours.

Dans la pratique, ces situations sont souvent traitées manuellement par des opérateurs humains au sein du AOCC, à l’aide de règles empiriques, de leur expérience, et d’outils d’aide à la décision partiellement automatisés. Cette approche, bien qu’efficace dans des cas simples, présente plusieurs limites : une forte dépendance à l’expertise individuelle, une variabilité significative de la qualité des solutions produites, et une difficulté à garantir systématiquement la conformité réglementaire dans des délais très courts.

La problématique centrale de ce travail consiste donc à concevoir un mécanisme automatisé capable d’identifier les rotations perturbées, d’analyser précisément les causes de non-faisabilité au niveau des tronçons et des services, de générer des solutions de réparation légales et opérationnelles, et de sélectionner une solution globale cohérente assurant la meilleure couverture possible des vols affectés, tout en respectant les contraintes de temps, de ressources et de faisabilité imposées par le contexte opérationnel réel. Dans ce travail, nous nous concentrons sur la réparation des rotations en cours, c’est-à-dire sur les séquences de vols immédiatement touchées par une perturbation mineure et nécessitant une intervention

rapide. Le cadre étudié est celui d’une décision opérationnelle en temps réel, où les délais de réaction sont très courts. Dans cette perspective, l’incidence des solutions de réparation sur les blocs mensuels des membres d’équipage n’est pas prise en compte explicitement. La révision de ces blocs mensuels correspond à un niveau de replanification ultérieur, qui peut être traité dans un second temps lorsque l’exploitant dispose d’un horizon de réaction plus étendu.

3.2 Préparation et analyse des jeux de données

La préparation des données constitue un élément central de ce mémoire : elle permet de transformer des sorties hétérogènes et détaillées issues d’un générateur de rotations et blocs mensuels (pairings et rosters) en un ensemble cohérent, nettoyé, structuré et directement exploitable par le modèle de réoptimisation présenté au Chapitre 4. Cette étape est indispensable pour assurer (i) la traçabilité entre les données sources et les entités manipulées par l’algorithme, (ii) la cohérence spatio-temporelle des séquences de vols, et (iii) la reproductibilité des expériences.

Dans ce projet, nous utilisons des données opérationnelles anonymisées, dérivées d’un réseau de type Northwest Airlines. Ces données correspondent à des instances réalistes du problème de planification des rotations d’équipages couvrant un horizon mensuel complet. Chaque instance est définie pour un type d’appareil donné (p.ex. A319, A320, B727, B757, DC9, etc.) et contient l’ensemble des informations nécessaires à la construction et à la validation des rotations. Une instance comprend notamment :

- 31 fichiers journaliers (`day_1` à `day_31`), chacun décrivant les tronçons planifiés pour une journée donnée ;
- un ensemble total de plusieurs milliers de tronçons couvrant l’horizon mensuel ;
- un fichier `listOfBases` spécifiant les lieux du réseau, leur statut (base ou simple aéroport) ainsi que, le cas échéant, l’effectif rattaché ;
- des fichiers décrivant les équipages (`employees.in`, `employees_ordered.in`) ;
- des fichiers de paramètres et de contraintes (`param.in`, `credit_constraints`, etc.) nécessaires à la génération et à la validation des rotations ;
- des répertoires dédiés aux structures intermédiaires telles que les rotations générées.

Chaque fichier journalier `day_d` contient la liste des tronçons planifiés pour le jour d . Un tronçon représente un vol élémentaire caractérisé par :

- un identifiant unique ;
- un aéroport d’origine ;
- une date et heure de départ ;

- un aéroport de destination ;
- une date et heure d'arrivée.

Par exemple :

```
LEG_12_0 BASE1 2005-01-12 14:30 AIR5 2005-01-13 00:35;
```

Ce tronçon débute le 12 janvier à 14h30 et arrive le 13 janvier à 00h35, ce qui illustre la nécessité d'une représentation temporelle continue sur l'ensemble de l'horizon mensuel. Le fichier `listOfBases` définit les lieux du réseau. Pour chaque code, il indique :

- l'identifiant du lieu ;
- un indicateur binaire précisant s'il s'agit d'une base ;
- le nombre d'équipages rattachés (le cas échéant).

Une *base* désigne un lieu auquel des équipages sont rattachés et qui constitue un point légal de début et de fin des rotations. Un *aéroport* désigne un lieu opérationnel du réseau ne disposant pas d'effectif d'équipage associé.

En plus des données brutes, nous disposons d'un générateur complet de rotations et blocs mensuels, développé initialement par Frédéric Quesnel. Ce générateur permet de produire, pour chaque flotte considérée, un ensemble de rotations légales et blocs mensuels complets des équipages. Il s'appuie sur :

- un moteur de génération de colonnes (`GENCOL`) ;
- un système de description des contraintes (repos, connexions, durée de service, deadheads, etc.) ;
- des fichiers d'entrée structurés : `param.in`, `pairings` et `defaultInputFolders.in`.

Les sorties générées (`solution_x.out`, `labels.out`, `input_x`, etc.) constituent le point de départ du processus d'extraction et de transformation présenté dans ce chapitre. Elles contiennent l'information essentielle permettant de reconstruire les séquences de tronçons, de regrouper ces tronçons en services de vols, puis en rotations, et d'établir l'affectation de ces rotations aux équipages.

L'ensemble du processus de préparation des données repose sur trois grandes phases :

1. **Génération initiale des rotations et des blocs mensuels** à partir du générateur, afin d'obtenir une solution de référence et des structures de données brutes.
2. **Extraction, normalisation et nettoyage des données brutes** pour construire des fichiers intermédiaires normalisés (p.ex. CSV) : unification des formats temporels, validation des identifiants, contrôle de cohérence des origines/destinations et traitement des cas particuliers (p.ex. vols franchissant minuit).

3. **Construction d'un modèle de données orienté objet** (vols, tronçons, services de vols, équipages, rotations) sérialisé pour être utilisé par le moteur de réparation et le modèle de réoptimisation, en garantissant une représentation unique et cohérente de chaque entité sur l'horizon complet.

Chaque étape est décrite en détail dans les sous-sections suivantes, accompagnée de pseudo-algorithmes dérivés des scripts Python développés dans ce projet.

3.2.1 Génération initiale des rotations et des blocs mensuels

La première étape du processus consiste à élaborer un plan complet des rotations et des blocs mensuels. Pour cela, le code du générateur a été étudié en profondeur. Cette étude préliminaire a porté sur la structure générale du code, l'organisation des modules, les formats d'entrée attendus, la hiérarchie des fichiers d'exécution (`pairings`, `defaultInputFolders.in`, fichiers d'instance, etc.), ainsi que sur leur fonctionnement et les paramètres à modifier.

Aucune modification n'a été apportée au code du générateur. Les paramètres d'entrée ont uniquement été ajustés afin de produire des instances correspondant aux besoins spécifiques de ce projet (type d'instance, volume de vols, caractéristiques des équipages, granularité temporelle, etc.). Après une phase de compréhension et de validation du fonctionnement du générateur, plusieurs exécutions ont été réalisées afin de produire les rotations et les blocs mensuels initiaux utilisés dans l'ensemble des expérimentations.

Sorties produites par le générateur des rotations : La génération des rotations est effectuée indépendamment pour chaque instance considéré. Pour un instance donné, les fichiers de sortie sont regroupés dans un dossier `GeneratedPairings/scenarioX/Out/`. Ce dossier contient notamment :

- `solution_i` : solutions finales des rotations produites par GENCOL, où i désigne l'indice de l'exécution pour le cas de données considéré. Les solutions intermédiaires (`solution_0` à `solution_4`) correspondent à des résultats partiels ou à des configurations intermédiaires du générateur, tandis que la solution `solution_5` représente la solution complète finale retenue et exploitée dans ce projet ;
- `out` : journal d'exécution détaillé du moteur de génération, contenant les informations relatives à la résolution ;
- `Calcultimes` : fichiers de statistiques temporelles indiquant les temps de calcul associés aux différentes exécutions.

Les fichiers `solution_i.out` décrivent l'ensemble des rotations générées, incluant le bloc mensuel correspondant ainsi que la séquence ordonnée de tronçons (opérés ou repositionnés)

associée à chaque rotation. Ces fichiers constituent la référence principale pour la reconstruction des rotations utilisées dans la phase de réparation.

Sorties produites par le générateur des blocs mensuels : La génération des blocs mensuels repose sur un second module du projet de Quesnel, appliqué aux rotations préalablement générées. Les sorties correspondantes sont regroupées dans des dossiers de type

`GeneratedRosters/scenarioX/Out/solution/`. On y trouve notamment :

- `solution_0.out` : Solution finale de planification mensuelle, décrivant les blocs mensuels attribués aux membres d’équipage ;
- `out` et `Calcultimes` : journaux et mesures de performance.

Le fichier `solution_0.out` constitue la sortie principale exploitée dans ce travail. Il fournit, pour chaque membre d’équipage, la rotation qui lui est assignée sur l’horizon considéré. Cette information permet de reconstruire les blocs mensuels initiaux servant de point de départ aux procédures de réparation étudiées par la suite.

Ces sorties, rotations et des blocs mensuels, constituent le point de départ de l’extraction des données brutes. Comme elles ne sont pas fournies sous un format directement exploitable (absence de CSV, structure interne, indentation variable), une phase d’interprétation et de reconstruction logique a été nécessaire pour extraire correctement les informations pertinentes : vols, rotations, repos, assignations équipage–vol, etc.

3.2.2 Extraction et prétraitement des données

Les fichiers générés par l’outil de Quesnel sont produits dans un format textuel propre au moteur GENCOL, dépourvu de structure tabulaire et donc difficilement exploitable directement dans une chaîne de traitement. Afin de les intégrer dans notre environnement d’analyse, nous avons développé une procédure d’extraction permettant de convertir ces sorties brutes en tables structurées.

Les fichiers considérés regroupent notamment le fichier des bases (`listOfBases`), les fichiers journaliers de vols (`day_*`), ainsi que les fichiers de solution contenant les rotations et les blocs mensuels (`solution_*`). Pour chacun de ces fichiers, nous appliquons une logique commune fondée sur la lecture séquentielle, le filtrage des lignes pertinentes, l’identification du type d’information traité, puis l’extraction des champs utiles par analyse lexicale.

Cette étape permet de construire quatre tables structurées correspondant aux principales entités manipulées dans la suite du travail : les aéroports, les vols, les rotations et les blocs mensuels. Les informations extraites sont ensuite exportées dans les fichiers `airports.csv`,

`flights.csv`, `pairings.csv` et `rosters.csv`.

À ce stade, l'objectif est de passer d'un ensemble de sorties brutes, hétérogènes et difficiles à exploiter directement, à une première base de données structurée servant d'entrée aux phases de nettoyage, de normalisation et d'enrichissement décrites dans la sous-section suivante.

3.2.3 Nettoyage et enrichissement des données

Après l'extraction des fichiers bruts, une phase de préparation est nécessaire afin d'assurer la cohérence et l'exploitabilité des données. Les sorties du générateur présentent en effet des variations de format, des doublons et certaines informations temporelles implicites qui doivent être explicitées avant toute modélisation. Une chaîne de traitement dédiée est donc mise en place afin d'assurer la normalisation, la validation et l'enrichissement des tables.

Les notations utilisées dans les algorithmes sont définies dans la liste maître des notations présentée en annexe.

L'Algorithme 3.1 présente une vue d'ensemble de la chaîne de préparation des données adoptée dans ce mémoire. Il s'agit d'une représentation synthétique des différents scripts de traitement développés pour nettoyer, normaliser et structurer les données brutes. L'objectif n'est pas de détailler chaque implémentation individuellement, mais de mettre en évidence la logique générale du processus, depuis les tables sources jusqu'aux tables structurées utilisées par le modèle.

Algorithme 3.1 Chaîne globale de nettoyage, normalisation et structuration des données

Entrées : tables brutes $\mathcal{A}, \mathcal{F}, \mathcal{R}, \mathcal{T}$.

Sorties : tables nettoyées $\mathcal{A}^c, \mathcal{F}^c, \mathcal{R}^c, \mathcal{T}^c, \mathcal{L}^c, \mathcal{S}^c, \mathcal{C}^c$.

0. Initialisation

Charger les tables brutes $\mathcal{A}, \mathcal{F}, \mathcal{R}, \mathcal{T}$.

1. Nettoyage élémentaire

Pour toute table $X \in \{\mathcal{A}, \mathcal{F}, \mathcal{R}, \mathcal{T}\}$ faire

Normaliser les identifiants et convertir les types.

Supprimer les lignes incomplètes sur les clés essentielles ainsi que les doublons.

Produire la table nettoyée correspondante X^c .

2. Construction de l'ensemble des tronçons

Construire $\mathcal{L}^c$ à partir de $\mathcal{R}^c$ et de $\mathcal{F}^c$ en associant à chaque tronçon u son identifiant, la rotation r à laquelle il appartient, sa base, ses dates et heures, ainsi que son indicateur $\delta(u)$ de repositionnement.

3. Reconstruction temporelle des blocs mensuels

Définir $\Theta : f \mapsto (t^{\text{dep}}(f), t^{\text{arr}}(f))$ à partir de $\mathcal{F}^c$.

Pour toute rotation $r \in \mathcal{R}^c$ faire

Déterminer l'ensemble $\mathcal{L}(r)$ des tronçons associés à r .

Calculer $t^{\text{dep}}(r) = \min_{u \in \mathcal{L}(r)} t^{\text{dep}}(u)$.

Calculer $t^{\text{arr}}(r) = \max_{u \in \mathcal{L}(r)} t^{\text{arr}}(u)$.

Associer ces bornes temporelles aux blocs mensuels correspondants dans $\mathcal{T}^c$ lorsque leurs dates et heures de début ou de fin ne sont pas renseignées.

4. Segmentation en services

Fixer $REST_{\min}, CONN_{\min}, BRIEF, DEBRIEF$.

Pour chaque groupe de tronçons partageant le même configuration ω , le même membre d'équipage e , la même base b et la même rotation r faire

Ordonner les tronçons par heure de départ croissante.

Construire des services successifs en ouvrant un nouveau service lorsque l'écart entre deux tronçons consécutifs satisfait une condition de repos,

ou lorsque le temps de correspondance entre ces deux tronçons est inférieur à $CONN_{\min}$.

Associer à chaque service son identifiant, son heure de prise de service calculée à partir du premier tronçon et de *BRIEF*,

ainsi que son heure de fin de service calculée à partir du dernier tronçon et de *DEBRIEF*.

Obtenir ainsi l'ensemble $\mathcal{S}^c$.

5. Construction de l'ensemble des équipages

Construire $\mathcal{C}^c$ par agrégation des blocs mensuels nettoyés au niveau (ω, e, b) ,

en associant à chaque équipage les tronçons de $\mathcal{L}^c$ qui lui correspondent ainsi que leur nombre total.

6. Exportation

Exporter $\mathcal{A}^c, \mathcal{F}^c, \mathcal{R}^c, \mathcal{T}^c, \mathcal{L}^c, \mathcal{S}^c, \mathcal{C}^c$.

L'Algorithme 3.1 formalise la chaîne complète de préparation des données adoptée dans ce mémoire. Il s'agit d'une représentation synthétique du pipeline de traitement implémenté, dans lequel chaque module applique des transformations déterministes afin d'assurer la cohérence et la reproductibilité des résultats.

La procédure débute par une phase de nettoyage élémentaire des tables brutes (étape 1). Cette étape consiste à normaliser les identifiants, convertir les types de données et supprimer les lignes incomplètes ou redondantes. Les tables nettoyées obtenues constituent la base des traitements ultérieurs.

Une fois ces opérations réalisées, l'ensemble des tronçons est reconstruit (étape 2). Chaque tronçon est défini à partir des informations contenues dans les tables des rotations et des vols. Il est associé à la rotation à laquelle il appartient, à sa base, à ses horaires et à un indicateur permettant d'identifier les éventuels repositionnements.

Les bornes temporelles des rotations sont ensuite reconstruites à partir des horaires des tronçons (étape 3). Pour chaque rotation, l'heure de départ correspond au départ du premier tronçon et l'heure d'arrivée à l'arrivée du dernier tronçon. Ces informations sont ensuite utilisées pour compléter les blocs mensuels lorsque leurs bornes temporelles ne sont pas explicitement renseignées dans les fichiers sources.

La chaîne de traitement se poursuit par la segmentation des tronçons en services (étape 4). Les tronçons associés à une même combinaison instance–équipage–base–rotation sont d'abord ordonnés chronologiquement, puis regroupés en services successifs. La segmentation tient compte de paramètres opérationnels tels que les temps de briefing et de débriefing, les contraintes de repos minimal entre services et les temps de correspondance entre tronçons.

Enfin, l'ensemble des équipages est construit par agrégation des blocs mensuels nettoyés (étape 5). Un bloc mensuel correspond à l'ensemble des rotations attribuées à un équipage au cours d'un mois dans le plan de rotations initial. Les tables nettoyées et enrichies obtenues à l'issue de ce processus sont ensuite exportées afin de constituer une base de données structurée utilisée par les modules de modélisation et les procédures de réparation présentées au chapitre suivant.

3.2.4 Modélisation objet des données, sérialisation et stockage

Après le nettoyage, les tables structurées sont transformées en une représentation orientée objet destinée à être utilisée directement par le moteur de réparation. Cette étape vise à matérialiser explicitement les relations opérationnelles entre les entités du problème et à permettre une navigation efficace entre les objets, sans recourir à des jointures répétées lors des procédures de réoptimisation.

Les tables nettoyées sont ainsi converties en objets typés représentant les aéroports (*Airport*), les vols (*Flight*), les tronçons (*Leg*), les services (*Duty*), les rotations (*Pairing*), les blocs mensuels (*Roster*) et les membres d'équipage (*Crew*). L'ensemble de ces objets est ensuite consolidé dans une structure globale unique représentant l'état complet du système.

Algorithme 3.2 Construction hiérarchique du modèle objet

Entrées : tables nettoyées $\mathcal{A}^c$ (aéroports), $\mathcal{F}^c$ (vols), $\mathcal{L}^c$ (tronçons), $\mathcal{S}^c$ (services), $\mathcal{R}^c$ (rotations), $\mathcal{T}^c$ (blocs mensuels).

Sortie : modèle consolidé $\mathcal{D}$.

0. Initialisation

Charger les tables nettoyées $\mathcal{A}^c, \mathcal{F}^c, \mathcal{L}^c, \mathcal{S}^c, \mathcal{R}^c, \mathcal{T}^c$.

1. Reconstruction des tronçons

Pour tout $u \in \mathcal{L}^c$ **faire**

Associer au tronçon u le vol $f \in \mathcal{F}^c$ tel que $\text{id}(f) = \text{id}(u)$.

Construire l'objet tronçon associé à u à partir du vol f , de son type et de ses attributs.

2. Agrégation des tronçons en services

Regrouper les tronçons de $\mathcal{L}^c$ par identifiant de service.

Pour chaque groupe G_s associé au service s **faire**

Ordonner les tronçons par heure de départ croissante.

Définir $\text{rep}(s) = \min_{u \in G_s} t^{\text{dep}}(u) - \Delta_{\text{brief}}$, avec $\Delta_{\text{brief}} = 1\text{h}$.

Définir $\text{rel}(s) = \max_{u \in G_s} t^{\text{arr}}(u) + \Delta_{\text{debrief}}$, avec $\Delta_{\text{debrief}} = 30\text{min}$.

Construire le service $s = (G_s, \text{rep}(s), \text{rel}(s))$.

3. Construction des rotations

Regrouper les services par identifiant de rotation.

Pour chaque rotation r **faire**

Assembler la séquence ordonnée $\mathcal{S}(r) = \{s_1, \dots, s_k\}$.

Définir la base b de la rotation ainsi que $\text{start}_r = \min_i \text{rep}(s_i)$.

Construire la rotation $r = (b, \mathcal{S}(r))$.

4. Structuration des blocs mensuels

Pour tout enregistrement $(\omega, e, b, r) \in \mathcal{T}^c$ **faire**

Associer la rotation r au membre d'équipage e dans ω et à la base b .

Ajouter cette affectation à l'horaire individuel de e .

5. Assemblage global

Définir $\mathcal{D}$ comme le modèle consolidé réunissant les objets aéroport, vol, tronçon, service, rotation et équipage,

chaque composante étant indexée par identifiant.

6. Sérialisation

Sauvegarder $\mathcal{D}$ afin de permettre son rechargement sans reconstruction complète.

L'Algorithme 3.2 formalise la transformation des tables nettoyées en une structure hiérarchique orientée objet.

Dans un premier temps (étape 1), les tronçons sont reconstruits à partir des tables nettoyées. Chaque tronçon $u \in \mathcal{L}^c$ est associé au vol correspondant $f \in \mathcal{F}^c$ partageant le même identifiant, puis converti en un objet tronçon enrichi par les attributs opérationnels du vol.

Dans un second temps (étape 2), les tronçons sont agrégés en services. Pour chaque service s , les tronçons associés sont ordonnés chronologiquement et les bornes temporelles du service sont déterminées à partir du premier départ et de la dernière arrivée, en tenant compte des paramètres de briefing et de débriefing.

À l'étape 3, les services sont ensuite regroupés afin de reconstruire les rotations. Chaque rotation r est définie comme une séquence ordonnée de services et associée à une base ainsi qu'à une date de début déterminée à partir du premier service.

À l'étape 4, les blocs mensuels sont structurés en associant chaque membre d'équipage à la rotation correspondante dans un cas donné. Cette étape permet de reconstruire l'horaire individuel de chaque membre d'équipage.

L'ensemble des entités construites est ensuite assemblé dans un modèle consolidé $\mathcal{D}$ regroupant les différents niveaux hiérarchiques du système (aéroports, vols, tronçons, services, rotations et équipages).

Enfin, ce modèle est sérialisé afin de permettre son rechargement direct sans relancer la chaîne complète de préparation des données.

3.2.5 Modèle conceptuel de données

Le modèle conceptuel de données présenté à la Figure 3.1 formalise la structure finale des données manipulées dans ce projet. Il synthétise l'organisation logique des entités après les phases d'extraction, de nettoyage et de modélisation objet décrites précédemment.

Le modèle s'organise autour de plusieurs entités principales. Les *aéroports* (*Airport*) représentent les nœuds géographiques du réseau et peuvent jouer le rôle d'origine, de destination ou de base des rotations. Les *vols* (*Flight*) décrivent les mouvements élémentaires dans le temps et l'espace, caractérisés par leurs horaires de départ et d'arrivée ainsi que par leur état opérationnel. Chaque vol est encapsulé dans un *tronçon* (*Leg*), qui correspond à son utilisation effective dans une rotation et permet notamment de distinguer les vols opérés des repositionnements passagers.

Les tronçons sont regroupés en *services* (*Duty*), qui représentent des séquences temporelles continues d'activité pour un équipage sur une journée donnée. Les services sont ensuite agrégés en *rotations* (*Pairing*), qui constituent l'unité principale de planification et sont rattachées à une base spécifique.

Du côté des ressources humaines, chaque *membre d'équipage* (*Crew*) possède un *bloc mensuel* (*Roster*) décrivant l'ensemble des rotations qui lui sont attribuées. Les affectations de rotation (*PairingAssignment*) assurent le lien entre les blocs mensuels et les rotations, tout en précisant la position occupée par l'équipage au sein de la rotation.

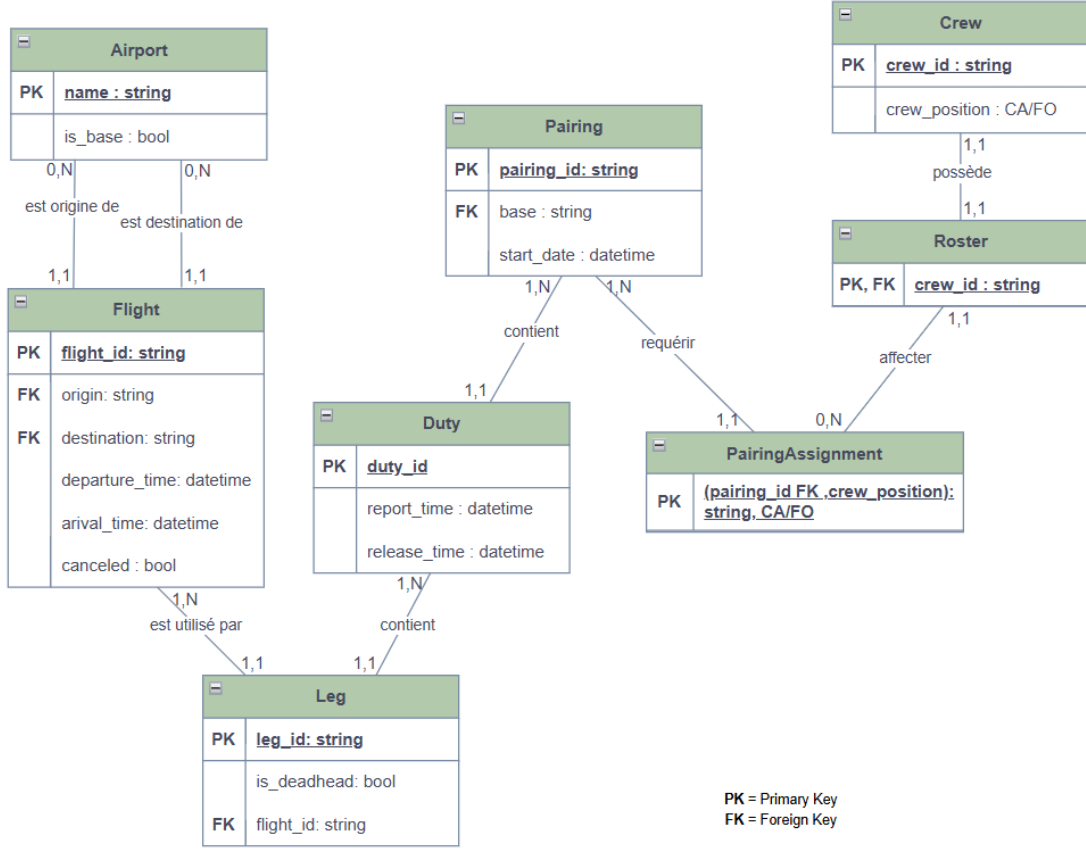


FIGURE 3.1 Modèle conceptuel de données

Ce modèle met en évidence une hiérarchie structurale claire : une rotation contient plusieurs services, eux-mêmes composés de tronçons, qui encapsulent des vols. Cette structuration reflète la logique opérationnelle. Par ailleurs, la distinction entre besoin de position au sein d'une rotation et bloc mensuel effective d'un membre d'équipage permet de séparer explicitement la dimension structurale de la planification de la dimension individuelle des ressources, ce qui constitue un élément central pour la procédure de réparation développée au chapitre suivant.

3.3 Génération des scénarios de perturbation

Afin d'évaluer la robustesse de l'approche de résolution du CRP présenté au Chapitre 4, nous générons un ensemble de scénarios de perturbation réalistes à partir du modèle propre $\mathcal{D}$ obtenu à l'issue de la chaîne complète de préparation et de modélisation des données.

Nous considérons des perturbations mineures, définies non pas par le nombre de vols annulés

mais par le nombre de rotations impactées. Chaque scénario est construit de manière à perturber au plus une dizaine de rotations, conformément au cadre opérationnel visé : une intervention rapide, localisée et conforme à la légalité, sans remise en cause globale du plan initial.

Les perturbations simulées reposent exclusivement sur des annulations de vols, mécanisme réaliste et directement pertinent pour l'analyse de la faisabilité des rotations d'équipages.

3.3.1 Principe général

L'annulation d'un vol peut rompre la continuité temporelle ou géographique d'une rotation et générer une situation d'incohérence de positionnement de l'équipage (crew out-of-position), dans laquelle l'équipage ne se trouve plus dans l'aéroport requis pour assurer le tronçon suivant.

Le jeu de données utilisé ne contient aucune information relative à l'affectation des avions. Il n'est donc pas possible d'assurer un équilibre fin au niveau des appareils individuels. Afin d'éviter l'introduction de biais artificiels, nous adoptons une hypothèse d'équilibrage par type d'appareil : toute annulation peut être compensée par une autre portant sur le même type d'avion, préservant ainsi la cohérence agrégée du programme de vols.

3.3.2 Types de perturbations simulées

Deux catégories d'annulations sont distinguées selon leur impact sur la faisabilité des rotations.

1. **Annulations neutres sur la position de l'équipage.** L'annulation simultanée de deux tronçons consécutifs dont l'origine du premier coïncide avec la destination du second ne modifie pas la position finale de l'équipage. La rotation demeure géographiquement cohérente, bien que certains vols ne soient plus opérés.
2. **Annulations entraînant une incohérence de positionnement.** L'annulation d'un tronçon isolé peut rompre la continuité géographique de la rotation et laisser l'équipage dans un aéroport différent de celui requis pour assurer le tronçon suivant. Cette situation rend la rotation non faisable et constitue le cas critique étudié dans ce travail.

Les scénarios retenus dans la suite reposent principalement sur la seconde catégorie, qui correspond aux situations de perturbation opérationnelle nécessitant une réparation.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur les perturbations causées par des annulations de vols. Ce choix permet de mettre en évidence de manière claire les problèmes de discontinuité

géographique des équipages et les situations de *crew out-of-position*. Les retards peuvent également entraîner des violations de contraintes opérationnelles (temps de correspondance, contraintes de service ou de repos), mais leur modélisation nécessite une représentation plus fine des dynamiques temporelles. Afin de conserver un cadre expérimental contrôlé et de se concentrer sur les mécanismes de réparation des rotations, ces perturbations ne sont pas explicitement considérées dans les scénarios étudiés.

3.3.3 Approche retenue pour la génération des scénarios

Chaque scénario correspond à la construction d'un modèle perturbé $\mathcal{D}'$ à partir du modèle propre $\mathcal{D}$. La taille d'un scénario est mesurée par le nombre de rotations impactées, noté $|\mathcal{R}_{\text{pert}}|$, et borné par N_{max} .

La génération des scénarios repose sur une procédure d'annulation progressive de vols. À chaque itération, un vol candidat est sélectionné parmi les vols encore opérants selon sa typologie (BB , BN , NB ou NN). Cette sélection est réalisée de manière à garantir que le nombre total de rotations affectées demeure inférieur à la borne fixée N_{max} .

Une fois les vols annulés identifiés, les objets impactés dans le modèle (vols, tronçons, services et rotations) sont mis à jour afin de refléter explicitement l'état perturbé du système.

Algorithme 3.3 Génération contrôlée d'un scénario par annulations

Entrée : modèle propre $\mathcal{D}$, borne N_{max} .
Sortie : modèle perturbé $\mathcal{D}'$.

0. Initialisation
 $\mathcal{F}_{\text{ann}} \leftarrow \emptyset$; $\mathcal{R}_{\text{pert}} \leftarrow \emptyset$.

1. Sélection incrémentale
Tant que $|\mathcal{R}_{\text{pert}}| < N_{\text{max}}$ **faire**
 Choisir une catégorie $k \in \{BB, BN, NB, NN\}$.
 Choisir un vol $f \in \{g \in \mathcal{F} \setminus \mathcal{F}_{\text{ann}} : \tau(g) = k\}$.
 Définir $\mathcal{R}_f$ comme l'ensemble des rotations de $\mathcal{R}$ contenant le vol f .
 Si $|\mathcal{R}_{\text{pert}} \cup \mathcal{R}_f| \leq N_{\text{max}}$ **alors**
 $\mathcal{F}_{\text{ann}} \leftarrow \mathcal{F}_{\text{ann}} \cup \{f\}$;
 $\mathcal{R}_{\text{pert}} \leftarrow \mathcal{R}_{\text{pert}} \cup \mathcal{R}_f$.
 Si aucun vol admissible ne peut être sélectionné **alors arrêter**.

2. Propagation des annulations
Pour toute $r \in \mathcal{R}_{\text{pert}}$ **faire**
 Marquer comme annulés les vols de la rotation r appartenant à $\mathcal{F}_{\text{ann}}$.
 Mettre à jour les statuts des tronçons, des services et de la rotation r .

3. Construction du modèle perturbé
Définir $\mathcal{D}'$ comme le modèle $\mathcal{D}$ muni des statuts mis à jour.
Sérialiser $\mathcal{D}'$.

Chaque exécution de l'Algorithme 3.3 produit ainsi un modèle perturbé $\mathcal{D}'$ caractérisé par un nombre borné de rotations affectées. La taille du scénario est donc définie par $|\mathcal{R}_{\text{pert}}|$,

et non par $|\mathcal{F}_{\text{ann}}|$. Ce choix permet de contrôler directement l'ampleur des perturbations appliquées au plan initial et, par conséquent, la difficulté des instances du CRP étudiées dans ce mémoire.

Le modèle perturbé obtenu constitue alors une instance expérimentale indépendante servant de point de départ aux procédures de réparation et de réoptimisation des rotations présentées au Chapitre 4.

3.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a posé les bases informatiques du travail en définissant le CRP dans son contexte opérationnel, puis en décrivant la structure et le traitement des données utilisées. Nous avons ensuite présenté le modèle conceptuel de données retenu ainsi que la construction du modèle exploitable pour l'expérimentation. Enfin, la génération contrôlée de scénarios de perturbation a permis de définir le cadre expérimental nécessaire à l'évaluation des méthodes de réparation présentées au chapitre suivant.

CHAPITRE 4 MODÈLE DE RÉPARATION ET MÉTHODES DE RÉOPTIMISATION APRÈS PERTURBATIONS MINEURES

Ce chapitre décrit les différentes composantes du processus de réparation des rotations. Nous présentons d’abord une vue globale du processus de réparation proposé (Section 4.1), puis une description plus détaillée de ses différentes étapes (Section 4.2). Les sections suivantes introduisent ensuite les composantes principales de cette approche. Nous présentons d’abord le moteur de validation des règles (Section 4.3), puis le mécanisme de réparation rapide (Quick Fix) (Section 4.4). Le modèle mathématique du problème, formulé sous la forme d’un programme linéaire en nombres entiers mixtes, est ensuite présenté (Section 4.5). Nous décrivons également la construction du réseau espace-temps utilisé pour générer des rotations alternatives (Section 4.6), avant de présenter la procédure de réacheminement visant le recouvrement des vols ouverts (Section 4.7).

Deux méthodes de réparation sont présentées :

- **Mécanisme de réparation rapide** : visant à reconstruire localement des rotations faisables dans un horizon temporel restreint en limitant les modifications apportées à l’horaire initial ;
- **Procédure de réacheminement pour le recouvrement des vols ouverts** : présentée selon deux scénarios : soit à partir des seules rotations perturbées, soit à partir d’un ensemble élargi incluant également des rotations initialement saines (non perturbées).

Ces méthodes s’appuient sur les données nettoyées et structurées présentées au Chapitre 3 et constituent les briques fondamentales du processus de réparation étudié dans ce mémoire.

4.1 Processus global de réparation

Le processus de réparation proposé vise à restaurer la faisabilité des rotations d’équipage après l’apparition de perturbations mineures dans le programme de vols. À partir du plan initial perturbé, les rotations sont d’abord analysées afin d’identifier celles qui deviennent non valides. Des mécanismes de réparation sont ensuite appliqués afin de reconstruire des rotations faisables et de rétablir la couverture des vols ouverts, tout en limitant les modifications apportées au plan initial.

La Figure 4.1 illustre l’architecture générale du processus de réparation. Celui-ci repose sur trois composantes principales, chacune correspondant à une boîte du schéma et représen-

tant une étape clé du mécanisme de réparation. Nous en présentons ci-dessous une brève description ; les détails sont fournis aux sections 4.3, 4.5 et 4.6, respectivement.

1. **Le moteur de règles :** Le moteur de règles opérationnelles analyse les rotations afin d'identifier celles devenues non valides à la suite des perturbations, notamment en raison de pertes de continuité ou de violations de contraintes réglementaires. Il intervient également lors de la génération des nouvelles rotations en vérifiant leur validité opérationnelle (Section 4.3).
2. **Construction du réseau et génération de nouvelles rotations :** Lorsque des perturbations sont détectées, des rotations alternatives sont générées à l'aide d'un réseau espace-temps. Cette étape vise à reconstruire des rotations faisables tout en tenant compte du caractère bi-objectif du problème, qui consiste à minimiser à la fois le coût opérationnel des solutions et le nombre de modifications apportées au plan initial. Comme illustré à la Figure 4.1, le contrôle du nombre de modifications est assuré par la gestion progressive du voisinage exploré dans le réseau. Le premier voisinage explore une réparation locale consistant à ajouter un vol de repositionnement afin de reconnecter un équipage hors position. Si cette correction est insuffisante, le voisinage est progressivement élargi afin de permettre un réacheminement plus large des équipages afin d'offrir plus d'options pour couvrir les vols ouverts (Section 4.6).
3. **Résolution du modèle de ré-optimisation :** Les rotations candidates validées sont intégrées dans un modèle formulé en programme linéaire en nombres entiers mixtes, qui sélectionne un ensemble cohérent de rotations couvrant les vols ouverts tout en respectant les contraintes de ressources. Le processus est itératif et améliore progressivement la couverture des vols jusqu'à stabilisation de la solution (Section 4.5).

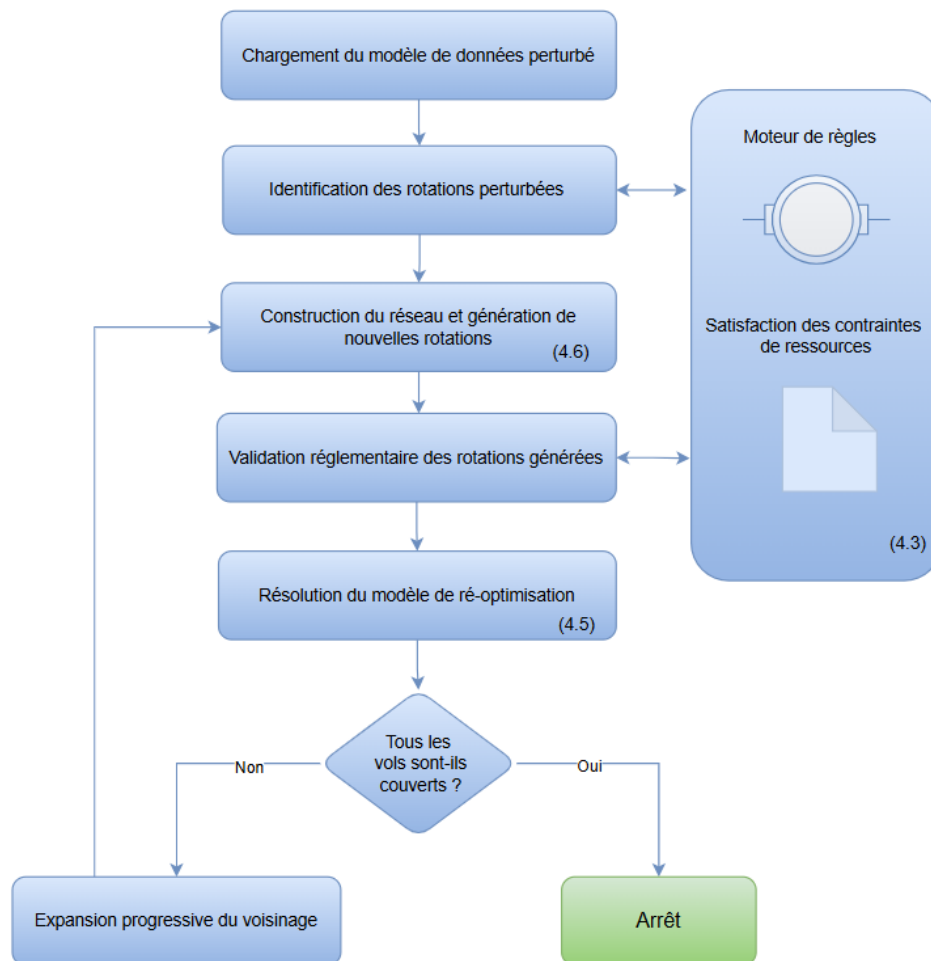


FIGURE 4.1 Processus global de réparation des rotations à partir d'un modèle de données perturbé.

4.2 Processus détaillé de réparation

L'Algorithme 4.1 présente le déroulement du processus de réparation appliqué à un modèle de données déjà perturbé. Il synthétise l'enchaînement des différentes composantes du processus, depuis l'identification des rotations non valides jusqu'à la génération itérative de rotations candidates et la résolution successive du modèle de réoptimisation. Les différentes étapes décrites dans cet algorithme sont ensuite détaillées et analysées dans les sections suivantes.

Par abus de langage, une rotation r pourra être assimilée à l'ensemble des vols qui la composent lorsque cela simplifie la notation dans les expressions de l'algorithme.

Algorithme 4.1 Processus détaillé de réparation des rotations

Entrée : modèle perturbé $\mathcal{D}'$.
Sorties : $\mathcal{R}^*$ (rotations sélectionnées), $\mathcal{F}_{\text{ouverts}}$ (vols ouverts).

0. Initialisation
Appliquer le moteur de règles à $\mathcal{D}'$ pour obtenir $\mathcal{R}_{\text{pert}}$.
 $\mathcal{F}_{\text{cibles}} \leftarrow \{f \in \mathcal{F}_{\text{op}} \mid f \text{ appartient à une rotation } r \in \mathcal{R}_{\text{pert}}\}$.
 $\mathcal{F}_{\text{ouverts}} \leftarrow \mathcal{F}_{\text{cibles}}, \quad \mathcal{R}_{\text{rapide}} \leftarrow \emptyset, \quad \mathcal{R}_{\text{cand}} \leftarrow \mathcal{R}_{\text{pert}}$.

1. Correction rapide (premier voisinage)
Pour tout $r \in \mathcal{R}_{\text{pert}}$ **faire**
 Si r présente une discontinuité géographique **alors**
 générer des rotations r' par repositionnement dans un réseau espace-temps local.
 Si r' est valide (moteur de règles) **et** $r' \notin \mathcal{R}_{\text{cand}}$ **alors**
 ajouter r' à $\mathcal{R}_{\text{rapide}}$.
 $\mathcal{R}_{\text{cand}} \leftarrow \mathcal{R}_{\text{cand}} \cup \mathcal{R}_{\text{rapide}}$.

2. Sélection initiale par ré-optimisation
Résoudre le modèle MIP sur $\mathcal{R}_{\text{cand}}$ pour obtenir $\mathcal{R}^*$ et $\mathcal{F}_{\text{ouverts}} \subseteq \mathcal{F}_{\text{cibles}}$.
 $k \leftarrow 0, \quad n_{\text{ouv}}^{\text{prec}} \leftarrow |\mathcal{F}_{\text{ouverts}}| + 1$.

3. Boucle génération / sélection
Tant que $\mathcal{F}_{\text{ouverts}} \neq \emptyset$ **et** $k < K_{\text{max}}$ **faire**
 $k \leftarrow k + 1$.
 (a) Choisir le périmètre de génération
 Si $|\mathcal{F}_{\text{ouverts}}| \geq n_{\text{ouv}}^{\text{prec}}$ **alors** $\sigma \leftarrow 1$ **sinon** $\sigma \leftarrow 0$.
 $n_{\text{ouv}}^{\text{prec}} \leftarrow |\mathcal{F}_{\text{ouverts}}|$.
 (b) Définir les rotations de départ
 Si $\sigma = 0$ **alors** $\mathcal{R}_0 \leftarrow \mathcal{R}_{\text{pert}}$
 Sinon $\mathcal{R}_0 \leftarrow \mathcal{R}_{\text{pert}} \cup \text{Top}(\mathcal{R} \setminus \mathcal{R}_{\text{pert}}, \text{score}(\cdot, \mathcal{F}_{\text{ouverts}}))$.
 (c) Réacheminement et génération de rotations candidates
 $\Delta\mathcal{R} \leftarrow \emptyset$.
 Pour tout $r \in \mathcal{R}_0, s \in \mathcal{S}(r)$ **faire**
 Construire un réseau espace-temps $\mathcal{G}(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$.
 Énumérer des chemins réalisables $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$ dans ce réseau.
 Filtrer $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}}) \leftarrow \{\pi \in \Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}}) : \phi(\pi) \cap \mathcal{F}_{\text{cibles}} \neq \emptyset\}$.
 Trier les chemins selon un ordre privilégiant (i) couverture, (ii) faible abandon, (iii) faible ajout.
 Pour les L meilleurs π **faire**
 $r' \leftarrow \text{Remplacer}(r, s, \pi)$.
 supprimer les vols annulés et **tronquer** à la première discontinuité.
 Si r' est valide **et** $r' \notin \mathcal{R}_{\text{cand}}$ **alors**
 Ajouter r' à $\Delta\mathcal{R}$.
 Si $\Delta\mathcal{R} = \emptyset$ **alors sortir de la boucle**.
 $\mathcal{R}_{\text{cand}} \leftarrow \mathcal{R}_{\text{cand}} \cup \Delta\mathcal{R}$.
 (d) Re-sélection et mise à jour des vols ouverts
 Résoudre de nouveau le modèle MIP sur $\mathcal{R}_{\text{cand}}$.
 Obtenir $\mathcal{R}^*$ et $\mathcal{F}_{\text{ouverts}}$.
 Détecter les vols abandonnés $\mathcal{F}_{\text{ab}} \subseteq \mathcal{F}_{\text{op}}$.
 $\mathcal{F}_{\text{cibles}} \leftarrow \mathcal{F}_{\text{cibles}} \cup \mathcal{F}_{\text{ab}}$.
 $\mathcal{F}_{\text{ouverts}} \leftarrow \mathcal{F}_{\text{ouverts}} \cup \mathcal{F}_{\text{ab}}$.
 Mettre à jour $\mathcal{R}_{\text{pert}}$ si nécessaire.
Retourner $\mathcal{R}^*$ et $\mathcal{F}_{\text{ouverts}}$.

Le processus débute par l'application du moteur de validation des règles (étape 0, Section 4.3), qui identifie l'ensemble des rotations devenues non valides, noté $\mathcal{R}_{\text{pert}}$. À partir de ces rotations, on détermine l'ensemble des vols cibles $\mathcal{F}_{\text{cibles}}$, correspondant aux vols opérants appartenant aux rotations perturbées. Les vols ouverts $\mathcal{F}_{\text{ouverts}}$ représentent les vols cibles qui ne

sont pas encore couverts par la solution courante.

À l'étape 1, un mécanisme de réparation rapide, détaillé dans la Section 4.4, est appliqué dans un voisinage local. Pour chaque rotation perturbée présentant une discontinuité géographique, une tentative de reconnexion est effectuée par ajout d'un repositionnement réalisable dans un réseau espace-temps local. Toute rotation réparée r' validée par le moteur de règles est ajoutée à l'ensemble des rotations candidates $\mathcal{R}_{\text{cand}}$, sous réserve qu'elle n'y figure pas déjà.

À l'étape 2, une première sélection est réalisée en résolvant le modèle de réoptimisation formulé en programme linéaire en nombres entiers mixtes (Section 4.5) sur l'ensemble des rotations candidates $\mathcal{R}_{\text{cand}}$. Cette résolution produit une solution $\mathcal{R}^*$ et permet d'identifier les vols encore ouverts.

L'étape 3 correspond à une boucle itérative alternant génération et sélection. Elle se décompose en plusieurs sous-étapes. La première consiste à déterminer le périmètre de génération, qui contrôle l'étendue du voisinage exploré lors de la génération de nouvelles rotations. La seconde vise à définir l'ensemble des rotations de départ à partir duquel le réacheminement sera tenté.

La troisième sous-étape consiste à générer de nouvelles rotations candidates à l'aide d'un réseau espace-temps (Section 4.6). Les chemins réalisables dans ce réseau sont ensuite filtrés et triés selon plusieurs critères, privilégiant notamment la couverture des vols ouverts, la limitation des abandons de vols existants et la réduction du nombre de modifications apportées aux rotations initiales. Cette génération permet ainsi d'explorer différentes possibilités de réacheminement pour couvrir les vols ouverts (Section 4.7).

Le modèle de réoptimisation est ensuite résolu de nouveau sur l'ensemble enrichi $\mathcal{R}_{\text{cand}}$, ce qui permet de mettre à jour la solution $\mathcal{R}^*$ ainsi que l'ensemble des vols ouverts.

4.3 Moteur de validation des règles

Le moteur de validation des règles constitue un composant central du processus de réparation. Son objectif est d'assurer la cohérence opérationnelle des rotations tout au long du processus. Il intervient d'abord pour identifier les rotations devenues non valides à la suite des perturbations, puis pour valider les rotations candidates générées avant leur intégration dans le modèle d'optimisation.

Chaque rotation est évaluée indépendamment selon un ensemble de contraintes structurelles, temporelles et géographiques inspirées des règles opérationnelles de planification des équipages. Ces règles visent notamment à garantir la continuité géographique des équipages, le respect des temps minimaux de correspondance entre vols, ainsi que les exigences de repos

entre services conformément aux principes réglementaires du domaine aérien¹. Les principales règles appliquées par le moteur de validation sont résumées dans le Tableau 4.1.

TABLEAU 4.1 Règles de validation appliquées par le moteur de validation des règles.

Règle	Description
Présence de vols annulés	Une rotation est considérée perturbée si elle contient au moins un vol annulé. Dans ce cas, la continuité opérationnelle de la rotation n'est plus garantie, ce qui nécessite l'application d'une procédure de réparation.
Nombre maximal de services	Le nombre de services composant une rotation doit respecter la limite maximale $D_{\max}$. Toute rotation comportant un nombre de services supérieur à cette limite est considérée non valide.
Repos minimal entre services	Pour deux services consécutifs s_i et s_{i+1} , l'intervalle de repos $\text{rep}(s_{i+1}) - \text{rel}(s_i)$ doit être supérieur ou égal au repos minimal $REST_{\min}$ afin de respecter les exigences opérationnelles relatives au repos des équipages. Ici, $\text{rel}(s_i)$ désigne l'heure de fin du service s_i et $\text{rep}(s_{i+1})$ l'heure de début du service s_{i+1} .
Temps minimal de correspondance	Pour toute paire de vols consécutifs (f_i, f_{i+1}) appartenant à un même service, le temps séparant l'arrivée du premier vol et le départ du suivant doit être supérieur ou égal au temps minimal de correspondance MCT .
Continuité géographique	La position géographique de l'équipage doit rester cohérente entre les vols successifs. Si l'aéroport d'arrivée d'un vol ne correspond pas à l'aéroport de départ du vol suivant, une discontinuité géographique est détectée et la rotation est considérée perturbée.

Toute rotation violant au moins une des règles présentées dans le Tableau 4.1 est classée comme rotation perturbée et intégrée à l'ensemble $\mathcal{R}_{\text{pert}}$, qui constitue le périmètre initial du processus de réparation.

4.4 Mécanisme de réparation rapide (Quick Fix)

Avant d'engager une réoptimisation globale plus coûteuse, nous introduisons un mécanisme de réparation rapide constituant le premier voisinage exploré dans la procédure de réparation. Cette étape vise à corriger localement les rotations perturbées lorsque la perturbation reste limitée et qu'une reconnexion simple de l'équipage est possible.

L'idée consiste à identifier les situations où une discontinuité géographique est causée par l'annulation d'un unique vol au sein d'un service. Dans ce cas, le mécanisme tente de rétablir la continuité de la rotation par l'ajout d'un vol de repositionnement réalisable dans une fenêtre temporelle locale.

1. Ces règles s'inspirent notamment des exigences relatives aux temps de service et de repos définies dans la réglementation européenne EASA CS-FTL.

À titre d'illustration, supposons qu'un équipage effectue un service comprenant un vol AIR18 → AIR26 suivi d'un vol AIR26 → AIR45. Si le premier vol est annulé, l'équipage ne peut plus rejoindre l'aéroport AIR26 pour opérer le vol suivant vers AIR45. Le mécanisme de correction rapide cherche alors un vol de repositionnement disponible permettant d'acheminer l'équipage de AIR18 vers AIR26 dans un intervalle de temps proche afin de rétablir la continuité de la rotation.

Cette approche permet ainsi de restaurer rapidement certaines rotations sans recourir immédiatement au processus complet de génération de nouvelles rotations et de réoptimisation globale.

Algorithme 4.2 Mécanisme de réparation rapide (Quick Fix)

Entrées : ensemble des rotations perturbées $\mathcal{R}_{\text{pert}}$; modèle de données $\mathcal{D}$.

Sortie : ensemble $\mathcal{R}_{\text{rapide}}$ de rotations réparées.

1. Initialisation

$\mathcal{R}_{\text{rapide}} \leftarrow \emptyset$.

2. Correction locale

Pour tout $r \in \mathcal{R}_{\text{pert}}$ **faire**

Si $\text{disc}(r) = 0$ **alors continuer.**

$\mathcal{L}^{\text{op}}(r) \leftarrow$ tronçons opérants de r .

$\mathcal{L}^{\text{ann}}(r) \leftarrow$ tronçons annulés de r .

Si $|\mathcal{L}^{\text{ann}}(r)| \neq 1$ **alors continuer.**

Identifier le service impacté $s \in \mathcal{S}(r)$ tel que $\mathcal{L}^{\text{ann}}(r) \subseteq G_s$.

Si plus d'un service est impacté **alors continuer.**

Déterminer la fenêtre locale :

Si un tronçon opérant précède l'annulation **alors**

$(loc^{\text{start}}, t^{\text{start}}) \leftarrow (\text{dest}(u^-), \text{arr}(u^-))$.

Sinon

$(loc^{\text{start}}, t^{\text{start}}) \leftarrow (\text{orig}(u^{\text{ann}}), \text{rep}(s))$.

Si un tronçon opérant suit l'annulation **alors**

$(loc^{\text{end}}, t^{\text{end}}) \leftarrow (\text{orig}(u^+), \text{dep}(u^+))$.

Sinon

$(loc^{\text{end}}, t^{\text{end}}) \leftarrow (\text{dest}(u^{\text{ann}}), \text{rel}(s))$.

Construire le réseau espace-temps $\mathcal{G}(r, s, \mathcal{F}_{\text{sec}})$ dans cette fenêtre locale.

Énumérer des chemins réalisables $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{sec}})$.

Pour tout $\pi \in \Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{sec}})$ **faire**

Construire $r' \leftarrow \text{Remplacer}(r, s, \pi)$.

Marquer $\delta(u) = 1$ pour tout tronçon ajouté $u \notin \mathcal{L}^{\text{op}}(r)$.

Ajouter r' à $\mathcal{R}_{\text{rapide}}$.

Retourner $\mathcal{R}_{\text{rapide}}$.

L'Algorithme 4.2 décrit le fonctionnement détaillé du mécanisme de correction rapide. Dans notre implémentation, cette étape cible exclusivement les cas les plus fréquents observés dans les scénarios étudiés, à savoir l'annulation d'un unique tronçon au sein d'un service entraînant une rupture de continuité géographique. Les rotations présentant plusieurs annulations ou affectant plusieurs services sont considérées comme trop complexes pour cette phase locale et sont directement transmises aux étapes ultérieures de réacheminement.

Pour chaque rotation perturbée admissible, une fenêtre temporelle locale est identifiée autour de la discontinuité créée par l’annulation. Cette fenêtre est définie entre la dernière arrivée opérante précédant la discontinuité et le prochain départ opérant qui la suit ou, en l’absence de tels tronçons, entre les bornes temporelles du service concerné.

Un ensemble restreint de vols opérants susceptibles de reconnecter l’équipage entre ces deux positions est ensuite recherché dans le modèle de données, en ne conservant que les options respectant les contraintes temporelles.

Lorsqu’un vol de repositionnement admissible est identifié, une nouvelle rotation candidate est générée en conservant l’ensemble des tronçons opérants originaux et en ajoutant le tronçon de secours sous forme de repositionnement ($\delta(u) = 1$).

Cette opération repose sur la construction d’un réseau espace-temps local, utilisé également dans les étapes de réacheminement. Cela garantit la cohérence structurelle des solutions produites et maintient une définition uniforme des voisinages explorés par le modèle.

Les rotations corrigées sont ensuite soumises au moteur de validation des règles afin de vérifier leur conformité opérationnelle. Seules les rotations validées sont transmises au modèle d’optimisation comme candidates, tandis que les cas non résolus sont pris en charge par le processus de réacheminement itératif.

Ainsi, cette phase constitue le premier niveau d’intervention visant à restaurer rapidement la continuité des rotations avec un coût computationnel limité, avant d’activer des mécanismes de génération plus étendus.

4.5 Modèle mathématique de réparation

Une fois les rotations candidates générées et validées par le moteur de règles, nous modélisons un problème de programme linéaire en nombres entiers mixtes. L’objectif du modèle est de déterminer un sous-ensemble cohérent de ces rotations permettant de couvrir un maximum de vols ouverts tout en respectant les contraintes opérationnelles définies dans le modèle de données.

Nous présentons dans cette section la formulation mathématique complète du problème. Nous introduisons d’abord les ensembles et paramètres nécessaires à la définition du modèle, puis les variables de décision associées à la sélection des rotations. Nous définissons ensuite la fonction objectif qui guide le processus d’optimisation, avant de détailler les contraintes assurant la cohérence et la faisabilité de la solution.

Ensembles et paramètres

C	: ensemble des membres d'équipage,
F	: ensemble des vols,
P_c	: ensemble des rotations faisables pour le membre d'équipage $c \in C$,
$C^{\text{CA}} \subseteq C$	: sous-ensemble des commandants de bord,
$C^{\text{FO}} \subseteq C$	: sous-ensemble des premiers officiers,
$a_{fp} \in \{0, 1\}$	: paramètre indiquant si le vol $f \in F$ est inclus dans la rotation p , c.-à-d. $a_{fp} = 1$ si f appartient à p , et 0 sinon,
$c_p \geq 0$	: coût opérationnel associé à la sélection de la rotation p ,
$p_f^{(\text{CA})} \geq 0$	: pénalité pour un vol f dépourvu de commandant de bord,
$p_f^{(\text{FO})} \geq 0$	: pénalité pour un vol f dépourvu de premier officier,
$p_c \geq 0$	: pénalité associée à la non-affectation du membre d'équipage c .

Variables de décision

$x_{cp} \in \{0, 1\}$	: vaut 1 si le membre d'équipage $c \in C$ est affecté à la rotation $p \in P_c$, et 0 sinon,
$s_c \geq 0$	: variable d'écart associée au membre d'équipage c , représentant le niveau de non-affectation et pénalisée dans la fonction objectif,
$s_f^{(\text{CA})} \geq 0$	: variable d'écart associée à l'absence de commandant de bord pour le vol f , permettant de modéliser une couverture incomplète,
$s_f^{(\text{FO})} \geq 0$	: variable d'écart associée à l'absence de premier officier pour le vol f , également pénalisée dans la fonction objectif.

Fonction objectif

Nous minimisons le coût opérationnel total, composé du coût des rotations sélectionnés, des pénalités pour vols non couverts et des pénalités pour membres d'équipage non affectés :

$$\min Z = \underbrace{\sum_{c \in C} \sum_{p \in P_c} c_p x_{cp}}_{\text{Coût total des rotations}} + \underbrace{\sum_{f \in F} \left(p_f^{(\text{CA})} s_f^{(\text{CA})} + p_f^{(\text{FO})} s_f^{(\text{FO})} \right)}_{\text{Pénalités pour vols ouverts}} + \underbrace{\sum_{c \in C} p_c s_c}_{\text{Pénalités pour équipages non affectés}}. \quad (4.1)$$

Contraintes

Affectation des équipages. Chaque membre d'équipage est affecté à au plus une rotation légale :

$$\sum_{p \in P_c} x_{cp} + s_c = 1, \quad \forall c \in C. \quad (4.2)$$

Couverture des vols par rôle. Chaque vol doit disposer d'un commandant de bord et d'un premier officier (sous peine de payer les pénalités associées) :

$$\sum_{c \in C^{CA}} \sum_{p \in P_c} a_{fp} x_{cp} \geq 1 - s_f^{(CA)}, \quad \forall f \in F, \quad (4.3)$$

$$\sum_{c \in C^{FO}} \sum_{p \in P_c} a_{fp} x_{cp} \geq 1 - s_f^{(FO)}, \quad \forall f \in F. \quad (4.4)$$

Domaines des variables.

$$x_{cp} \in \{0, 1\}, \quad s_c \geq 0, \quad s_f^{(CA)} \geq 0, \quad s_f^{(FO)} \geq 0. \quad (4.5)$$

La formulation du problème sous forme de programme linéaire en nombres entiers mixtes permet d'exploiter efficacement la structure combinatoire de la sélection des rotations. En effet, le MIP offre un cadre rigoureux entre plusieurs objectifs opérationnels : la couverture des vols, la limitation des modifications et le respect des contraintes, tout en garantissant l'obtention d'une solution optimale au regard de la fonction objectif définie. De plus, bien que le modèle puisse théoriquement couvrir un vol avec plusieurs pilotes et co-pilotes, en pratique (comme observé lors des tests réalisés), cela se produit très rarement. En effet, afin de maximiser la couverture des vols, il est nécessaire de répartir les membres d'équipage entre les vols de manière optimale. Lorsque cela ne suffit pas, des membres d'équipage supplémentaires sont repositionnés. Ce processus intervient fréquemment, même lors de la planification initiale. Ainsi, en restreignant l'espace de recherche aux rotations candidates préalablement filtrées par les étapes de réparation et de validation, la taille du modèle demeure maîtrisée. Ce mécanisme permet également de contrôler implicitement le nombre de modifications apportées au plan initial, puisque seules des rotations proches de la solution perturbée sont introduites dans le modèle. La résolution demeure ainsi rapide et compatible avec un contexte de décision quasi temps réel.

D'un point de vue implémentation, le modèle est formulé en Python à l'aide de la bibliothèque *Pyomo*, qui permet de structurer le problème en ensembles, paramètres, variables et contraintes, avant de le transmettre au solveur MIP externe *HiGHS* pour la phase de

résolution.

4.6 Réseau espace-temps et structure du graphe

Nous construisons un graphe orienté $G = (V, A)$ dans lequel chaque nœud représente un état de l'équipage défini par un couple $(station, instant)$. Dans ce mémoire, une station correspond à un aéroport.

Pour chaque service considéré (voir l'étape 3 de l'Algorithme 4.1), deux nœuds particuliers sont ajoutés : un nœud *source*, représentant la position initiale de l'équipage au moment de la prise de service, et un nœud *puits*, représentant la position finale au moment de la fin du service. Ces deux nœuds délimitent l'intervalle temporel dans lequel la génération de nouvelles séquences de vols est autorisée.

Pour chaque vol inclus dans l'ensemble candidat, nous créons un nœud de départ associé à son origine et à son heure de départ, ainsi qu'un nœud d'arrivée associé à sa destination et à une heure d'arrivée ajustée du temps minimal de correspondance (MCT). Ce décalage temporel garantit qu'une transition vers un vol suivant respecte implicitement le temps minimal de connexion au sol.

Le graphe contient deux types principaux d'arcs :

- **Arcs de vol** : pour chaque vol f , nous ajoutons un arc orienté reliant le nœud de départ ($orig(f), dep(f)$) au nœud d'arrivée ($dest(f), arr(f) + MCT$). Cet arc porte l'attribut **FLIGHTID**, identifiant le vol correspondant. Les vols de repositionnement sont modélisés de la même manière : ils correspondent à des arcs de vol particuliers dans le réseau et se distinguent uniquement par un indicateur binaire de repositionnement associé au vol
- **Arcs au sol** : afin de représenter l'attente au sein d'une même station, des arcs sont ajoutés entre nœuds consécutifs appartenant à une même station et ordonnés chronologiquement. Ces arcs ne correspondent à aucun vol (**FLIGHTID=None**) et assurent la continuité temporelle des déplacements de l'équipage.

Cette construction fournit une représentation compacte des connexions temporellement réalisables entre vols dans une fenêtre donnée. La faisabilité temporelle est directement intégrée dans la structure du graphe grâce à l'ordonnancement des nœuds et à l'utilisation du temps minimal de correspondance.

Comme illustré à la Figure 4.2, chaque nœud représente un état $(station, instant)$ de l'équipage, tandis que les arcs modélisent soit l'exécution d'un vol opérant, soit une transition au

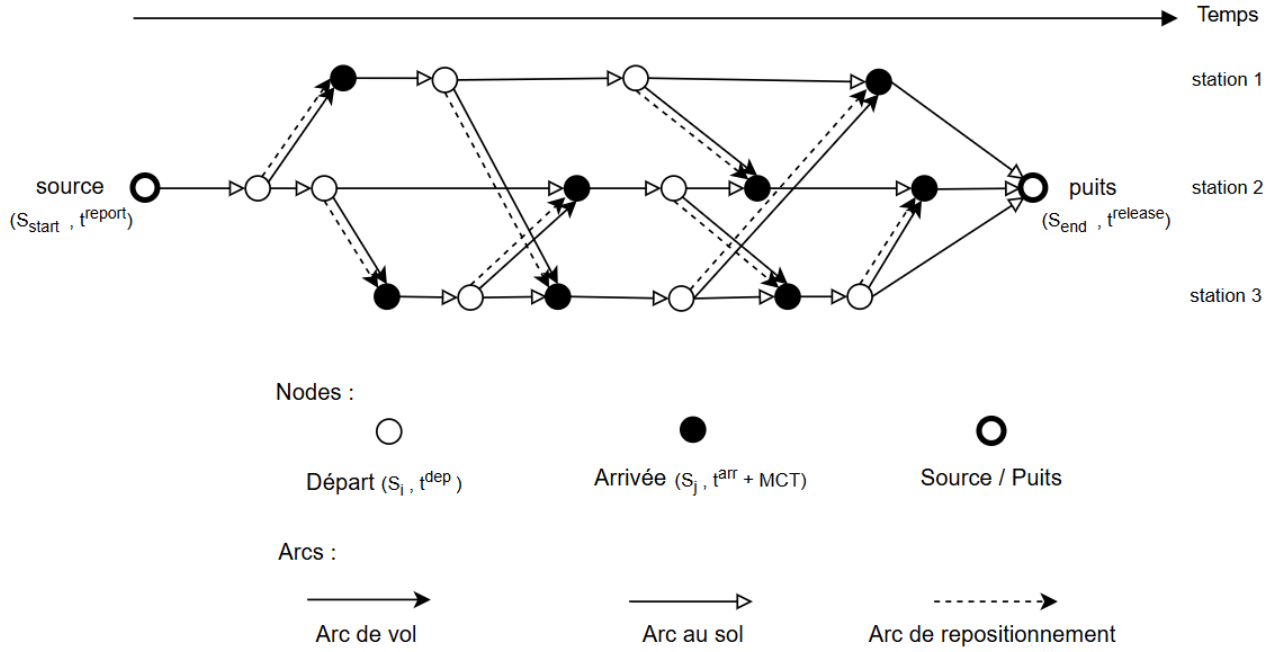


FIGURE 4.2 Structure du réseau espace-temps utilisé pour la génération de séquences de réacheminement.

sol respectant les contraintes temporelles, incluant le temps minimal de correspondance.

Génération des chemins réalisables

À partir du réseau construit pour un service donné, nous générons des chemins réalisables reliant le nœud source au nœud puits. Chaque chemin correspond à une séquence potentielle d'exécution pour l'équipage dans la fenêtre temporelle du service considéré, c'est-à-dire l'intervalle $[\text{rep}(s), \text{rel}(s)]$. La génération s'effectue au niveau des services. Pour chaque rotation candidate et chacun de ses services, nous vérifions d'abord l'existence d'au moins un vol cible dont l'heure de départ se situe dans la fenêtre temporelle du service.

Lorsque cette condition est satisfaite, le réseau espace-temps est utilisé pour énumérer les chemins réalisables reliant les nœuds source et puits. Chaque chemin est ensuite converti en une séquence ordonnée de vols, correspondant à une modification potentielle du service considéré. Cette séquence permet de construire une nouvelle rotation candidate obtenue par remplacement local du service initial. Dans la suite, la notation $\mathcal{G}(r, s, \mathcal{F})$ désigne le graphe orienté $G = (V, A)$ construit pour le service s de la rotation r , à partir d'un ensemble admissible de vols $\mathcal{F}$. Dans l'Algorithme 4.3, cet ensemble correspond à $\mathcal{F}_{\text{ouverts}}$.

Algorithme 4.3 Génération de chemins réalisables pour un service avec réacheminement

Entrées : modèle de données $\mathcal{D}$; ensemble des vols ouverts $\mathcal{F}_{\text{ouverts}}$; rotation $r \in \mathcal{R}$; service $s \in \mathcal{S}(r)$; contexte Γ .

Sortie : ensemble $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$ des chemins réalisables générés.

0. Initialisation
 $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}}) \leftarrow \emptyset$.
Si $G_s = \emptyset$ **alors retourner** $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$.
Si $\nexists f \in \mathcal{F}_{\text{ouverts}}$ tel que $\text{rep}(s) \leq t^{\text{dep}}(f) \leq \text{rel}(s)$ **alors retourner** $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$.
 $loc^{\text{start}} \leftarrow \text{orig}(u)$, où u est le premier tronçon de G_s .
 $t^{\text{start}} \leftarrow \text{rep}(s)$.

1. Construction du réseau espace-temps et énumération
Pour chaque station finale admissible loc^{end} **faire**
 $t^{\text{end}} \leftarrow \text{rel}(s)$.
Construire le réseau espace-temps $\mathcal{G}(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$ entre $(loc^{\text{start}}, t^{\text{start}})$ et $(loc^{\text{end}}, t^{\text{end}})$.
Parcourir le réseau en profondeur depuis le nœud source jusqu'au nœud puits afin d'énumérer les chemins simples.
Pour chaque chemin simple π obtenu **faire**
Si $\phi(\pi) \cap \mathcal{F}_{\text{ouverts}} = \emptyset$ **alors continuer**.
Si $|\phi(\pi)| > \text{MAX_PATH_LENGTH} = 8$ **alors continuer**.
Si le nombre de vols ajoutés à r dans π dépasse $\text{MAX_DEADHEAD_LEGS} = 2$ **alors continuer**.
Si la durée entre le premier et le dernier vol de π dépasse $\text{MAX_DUTY_HOURS} = 14$ h **alors continuer**.
Ajouter π à $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$.

2. Classement des chemins
Trier les chemins de $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$ selon un score privilégiant :
 (i) la couverture des vols ouverts;
 (ii) le plus faible nombre de vols abandonnés;
 (iii) le plus faible nombre de vols ajoutés.
Conserver au plus les L meilleurs chemins.

3. Sortie
Retourner $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$.

L'Algorithme 4.3 décrit la procédure de génération de chemins réalisables à partir du réseau espace-temps construit pour un service donné s d'une rotation r . Ce processus consiste à énumérer les chemins simples reliant le nœud source au nœud puits, en respectant les contraintes temporelles et géographiques des services. Chaque chemin représente une séquence de vols potentiels qui peut être utilisée pour remplacer un service perturbé dans une rotation. Les chemins sont ensuite validés et filtrés en fonction de critères de performance, tels que la couverture des vols cibles, le nombre de vols abandonnés et les vols de repositionnement (deadheads), afin de garantir qu'ils respectent les contraintes opérationnelles et minimisent les perturbations dans la rotation.

Le processus de génération des chemins est régi par plusieurs contraintes définies par des paramètres spécifiques :

1. **Temps de correspondance minimal (MCT)** : Chaque vol doit respecter un temps de correspondance minimal entre l'arrivée d'un vol et le départ du vol suivant. Cette contrainte assure que les transitions entre les vols sont réalisables sur le plan temporel.

2. **Longueur maximale du chemin** : Les chemins générés ne doivent pas excéder une longueur maximale de `MAX_PATH_LENGTH`, afin de ne pas dépasser un nombre raisonnable de vols pour un service donné.
3. **Nombre maximal de deadheads** : Un maximum de `MAX_DEADHEAD_LEGS` vols de repositionnement est autorisé dans un chemin, afin de limiter l'impact des repositionnements d'équipage sur l'efficacité du réacheminement.
4. **Durée maximale de service** : La durée totale d'un service ne peut pas dépasser `MAX_DUTY_HOURS`, respectant ainsi les contraintes légales et opérationnelles.
5. **Critères de couverture des vols cibles** : Un chemin est validé s'il couvre au moins un vol cible, défini comme un vol ouvert qui doit être couvert dans le cadre de la perturbation. Si un chemin couvre plus de vols cibles que d'autres, il obtient un score plus élevé.

Ces critères permettent de filtrer les chemins générés et de garantir que seules les solutions valides, minimisant les perturbations et respectant les contraintes opérationnelles, sont retenues.

4.7 Procédure de réacheminement pour le recouvrement des vols ouverts

Après l'application du mécanisme de correction rapide et une première résolution du modèle de réparation, certains vols peuvent demeurer non couverts. Ces vols, désignés comme *vols ouverts*, correspondent à des tronçons pour lesquels aucune rotation valide n'a pu être sélectionnée compte tenu des contraintes de légalité et de disponibilité des équipages.

La procédure de réacheminement vise alors à générer de nouvelles rotations candidates capables d'assurer leur couverture tout en limitant les modifications apportées au plan de rotations existant. Elle constitue une phase d'exploration structurée des voisinages de réparation, débutant par une génération restreinte centrée sur les rotations perturbées, puis s'étendant progressivement à l'ensemble du réseau lorsque les solutions locales deviennent insuffisantes.

Algorithme 4.4 Génération de rotations candidates par réacheminement (pool de vols ouverts)

Entrées : modèle de données $\mathcal{D}$; ensemble de vols ouverts $\mathcal{F}_{\text{ouverts}}$; stratégie $\sigma \in \{0, 1\}$; contexte Γ .
Sortie : ensemble $\Delta\mathcal{R}$ de rotations candidates générées (éventuellement vide).

0. Initialisation

$\mathcal{F}_{\text{pool}} \leftarrow \{f \in \mathcal{F}_{\text{ouverts}} : f \text{ opérant}\}.$

Si $\mathcal{F}_{\text{pool}} = \emptyset$ **alors retourner** $\Delta\mathcal{R} \leftarrow \emptyset$.

$\Delta\mathcal{R} \leftarrow \emptyset$.

1. Définir le pool de rotations à traiter

$\mathcal{R}_{\text{pool}} \leftarrow \begin{cases} \mathcal{R}_{\text{pert}}, & \text{si } \sigma = 0 \text{ (génération restreinte),} \\ \mathcal{R}, & \text{si } \sigma = 1 \text{ (génération étendue).} \end{cases}$

Si $\mathcal{R}_{\text{pool}} = \emptyset$ **alors retourner** $\Delta\mathcal{R} \leftarrow \emptyset$.

2. Génération par service

Pour tout $r \in \mathcal{R}_{\text{pool}}$:

Pour tout $s \in \mathcal{S}(r)$:

Si s est vide **alors continuer**.

Si $\nexists f \in \mathcal{F}_{\text{pool}}$ tel que $\text{rep}(s) \leq \text{dep}(f) \leq \text{rel}(s)$ **alors continuer**.

Construire le réseau espace-temps $\mathcal{G}(r, s, \mathcal{F}_{\text{pool}})$.

Énumérer des chemins réalisables $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{pool}})$.

Pour tout $\pi \in \Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{pool}})$:

$r' \leftarrow \text{Remplacer}(r, s, \pi)$.

Si $r' = \emptyset$ **alors continuer**.

Si $\text{Val}(r', \Gamma, r) = 0$ **alors continuer**.

Si $r \notin \mathcal{R}_{\text{pert}}$ **alors appliquer** un critère exigeant un gain net strictement positif.

Si $\text{Add}(r', \Gamma) = 1$ **alors** $\Delta\mathcal{R} \leftarrow \Delta\mathcal{R} \cup \{r'\}$.

3. Sortie

Retourner $\Delta\mathcal{R}$.

L'Algorithme 4.4 décrit la procédure de génération de rotations candidates par réacheminement à partir d'un ensemble de vols ouverts. À l'étape 0, l'algorithme construit l'ensemble de travail $\mathcal{F}_{\text{pool}} \subseteq \mathcal{F}_{\text{ouverts}}$ contenant uniquement les vols ouverts encore opérants, un vol est dit *opérant* s'il appartient à l'ensemble des vols non annulés dans le scénario de perturbation considéré, et qu'il peut donc être utilisé dans la génération des rotations candidates. Si cet ensemble est vide, aucune tentative de réacheminement n'est possible et la procédure se termine immédiatement.

À l'étape 1, l'ensemble de rotations à explorer est déterminé en fonction du paramètre de stratégie σ . Lorsque $\sigma = 0$, l'exploration est restreinte aux rotations perturbées $\mathcal{R}_{\text{pert}}$. Lorsque $\sigma = 1$, le pool est étendu à l'ensemble des rotations $\mathcal{R}$ du modèle, ce qui permet d'élargir l'exploration lorsque les ajustements locaux deviennent insuffisants.

À l'étape 2, l'algorithme parcourt successivement chaque rotation r du pool sélectionné et chacun de ses services s . Un service est considéré uniquement si sa fenêtre temporelle $[\text{rep}(s), \text{rel}(s)]$ intersecte au moins un vol de l'ensemble $\mathcal{F}_{\text{pool}}$. Dans ce cas, un réseau espace-temps $\mathcal{G}(r, s, \mathcal{F}_{\text{pool}})$ est construit et un ensemble de chemins réalisables $\Pi(r, s, \mathcal{F}_{\text{pool}})$ est généré. Chaque chemin π est ensuite utilisé pour construire une rotation candidate $r' =$

Remplacer(r, s, π) obtenue en remplaçant le service s par la séquence de vols associée au chemin.

Les rotations générées sont ensuite filtrées. Les solutions invalides sont éliminées par le moteur de règles opérationnelles via la fonction de validation $\text{Val}(\cdot)$, tandis qu'un mécanisme d'anti-duplication contrôle l'insertion dans l'ensemble des candidats via la fonction $\text{Add}(\cdot)$. Lorsque la rotation initiale n'est pas perturbée, un critère de gain net strictement positif est imposé afin d'éviter toute dégradation de la couverture globale des vols.

Enfin, à l'étape 3, l'ensemble $\Delta\mathcal{R}$ contenant toutes les rotations candidates générées est retourné.

4.7.1 Réacheminement à partir des seules rotations perturbées

Dans ce premier scénario, la génération de nouvelles solutions est limitée aux seules rotations perturbées issues des annulations initiales ou des étapes de réparation rapide. Cette stratégie privilégie des ajustements locaux en évitant de modifier des rotations initialement saines, ce qui permet de contenir l'ampleur des perturbations induites par la réparation.

Pour chaque rotation perturbée, l'algorithme examine successivement ses services et identifie ceux dont la fenêtre temporelle intersecte au moins un vol ouvert compatible d'un point de vue temporel et spatial. Lorsqu'un service possède une fenêtre temporelle couvrant l'intervalle du vol ouvert, un réseau espace-temps est construit sur cette fenêtre afin de générer des séquences de vols réalisables, en excluant les tronçons annulés et les connexions non compatibles.

Les chemins générés sont ensuite transformés en rotations candidates par remplacement local du service ciblé, tandis que le reste de la rotation demeure inchangé. Les solutions sont déduplicuées à l'aide d'une signature basée sur les tronçons opérants, puis validées par le moteur de règles avant leur ajout à l'ensemble des candidats du modèle de réparation. Le processus est répété tant que la couverture des vols ouverts continue de s'améliorer.

4.7.2 Réacheminement avec extension aux rotations saines

Lorsque le réacheminement limité aux rotations perturbées ne suffit pas à résorber l'ensemble des vols ouverts, le périmètre de recherche est étendu aux rotations initialement saines. Cette étape marque une phase d'exploration plus large du voisinage de réparation, puisqu'elle autorise des modifications sur des rotations auparavant exécutables, tout en restant guidée par un principe de perturbation minimale.

Dans ce scénario, l'ensemble des rotations du modèle de données peut servir de point de départ

à la génération de nouvelles solutions. Afin de contrôler la propagation des modifications, les rotations déjà exploitées lors d'itérations précédentes sont exclues, et chaque solution générée est systématiquement soumise au moteur de validation des règles avant son intégration au modèle d'optimisation.

Le mécanisme de génération demeure identique à celui du réacheminement restreint : pour chaque rotation considérée, les services temporellement compatibles avec au moins un vol ouvert sont identifiés. Un réseau espace-temps est ensuite construit sur leur fenêtre opérationnelle afin d'énumérer des séquences réalisables. Chaque séquence retenue remplace localement la portion concernée, le reste de la rotation demeurant inchangé.

L'élargissement de l'espace de recherche augmente naturellement le nombre de combinaisons explorées. Des mécanismes de filtrage, suppression des duplicats, validation systématique et sélection progressive sont donc appliqués afin de préserver la performance computationnelle et la stabilité du plan de rotations. Cette extension graduelle permet d'assurer la couverture des vols ouverts tout en sollicitant les rotations saines uniquement lorsque les solutions locales ne suffisent plus.

4.8 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté une approche de réparation des rotations reposant sur une articulation progressive entre des mécanismes heuristiques et un modèle d'optimisation en nombres entiers mixtes. Une procédure de réparation rapide permet d'abord de traiter localement les discontinuités simples, puis un mécanisme de réacheminement génère de nouvelles rotations candidates à partir d'un réseau espace-temps. L'intégration de ces rotations dans un modèle de ré-optimisation permet finalement d'obtenir des solutions cohérentes, opérationnellement réalisables et adaptées à un contexte de décision en temps contraint.

CHAPITRE 5 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente et analyse les résultats obtenus à partir des différentes instances étudiées. La section 5.1 décrit les caractéristiques des instances considérées, tandis que la Section 5.2 introduit les indicateurs d'évaluation et les métriques de performance. Les résultats de la procédure de réparation sont ensuite présentés et comparés dans la Section 5.3, puis complétés par une analyse computationnelle en Section 5.4. Enfin, la Section 5.5 propose une discussion globale des résultats obtenus.

5.1 Présentation des instances étudiées

Dans cette section, nous présentons les différentes instances utilisées pour l'évaluation expérimentale de la méthode de réparation proposée. L'objectif est de caractériser de manière descriptive la structure des jeux de données opérationnels considérés, afin de préciser le cadre expérimental et d'éclairer l'analyse des résultats présentés dans les sections suivantes. À partir du modèle de données développé au Chapitre 3, nous avons construit un ensemble de statistiques descriptives permettant d'examiner la distribution des vols, l'organisation des rotations d'équipages ainsi que plusieurs propriétés structurelles du réseau étudié.

Les expérimentations reposent sur plusieurs instances dérivées du jeu de données Northwest, chacune correspondant à une flotte distincte. Pour chaque instance, nous considérons différents scénarios de perturbation construits à partir d'annulations de vols, conformément à la méthodologie décrite précédemment. Deux niveaux de perturbation sont étudiés. Le premier correspond à des annulations unitaires, utilisées principalement pour évaluer le comportement du mécanisme de correction rapide et sa capacité à restaurer localement la faisabilité des rotations. Le second niveau regroupe des scénarios d'annulations multiples, destinés à analyser le fonctionnement de la procédure de réacheminement et son impact sur la restructuration des rotations à plus grande échelle.

Afin d'explorer différents contextes, plusieurs types d'annulations sont considérés, notamment selon la nature des aéroports impliqués (base vers base, base vers non-base, et non-base vers base). Cette diversité de scénarios permet d'observer le comportement du modèle dans des contextes variés, en mettant en évidence l'influence de la structure du réseau et des contraintes opérationnelles sur la qualité des solutions de réparation obtenues.

Dans ce qui suit, l'instance NW319 est présentée de manière détaillée à titre d'exemple représentatif. Les autres instances présentent des caractéristiques structurelles similaires. Un

résumé est donné au Tableau 5.1 à la fin de cette section.

5.1.1 Instance NW319

Afin de caractériser la structure opérationnelle de l'instance NW319, nous avons réalisé une analyse statistique détaillée couvrant l'ensemble de l'horizon temporel étudié. L'instance comprend un total de 5886 vols sur l'horizon mensuel et est structurée autour de 3 bases. Les indicateurs présentés ci-dessous permettent de mieux comprendre la distribution des rotations ainsi que le comportement global des équipages avant l'introduction des perturbations.

Dynamique des vols sur l'horizon étudié

Nous commençons par analyser la distribution du nombre de vols opérés par jour sur l'horizon mensuel considéré. Cette analyse permet d'observer la stabilité globale du programme de vols ainsi que les variations journalières pouvant influencer la difficulté des procédures de réparation.

Nous étudions également la répartition horaire des vols touchant une base, afin d'identifier les périodes de forte activité. Ces informations sont particulièrement pertinentes pour comprendre les contraintes temporelles imposées au mécanisme de correction rapide.

La Figure 5.1 présente l'évolution quotidienne du volume d'activité aérienne pour l'instance NW319.

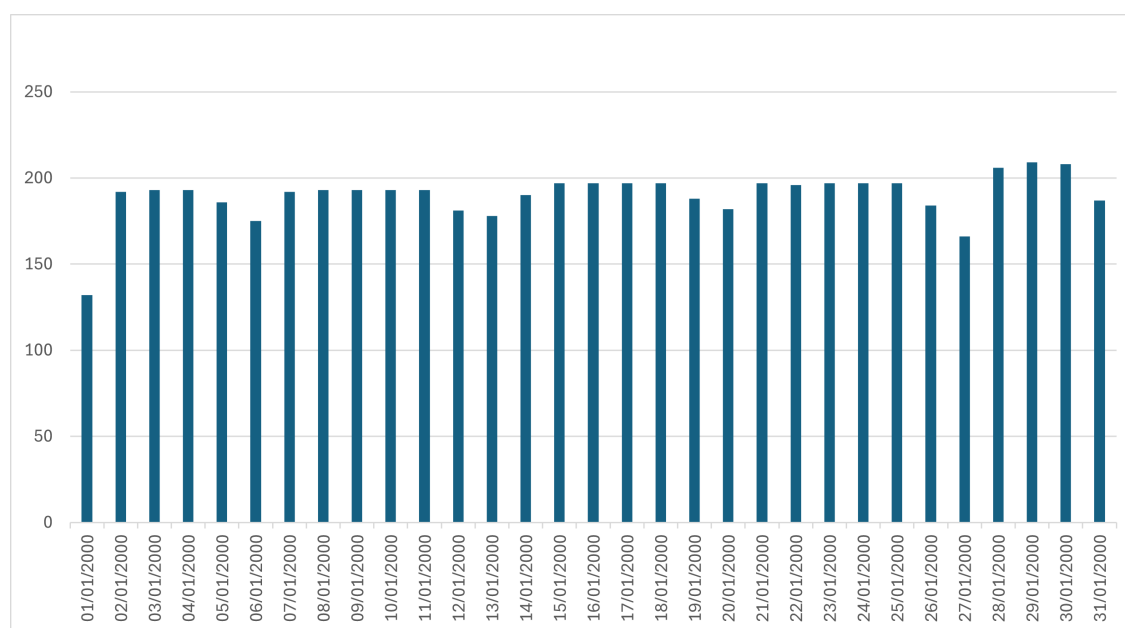


FIGURE 5.1 Nombre total de vols par jour sur l'horizon étudié pour l'instance NW319.

Nous observons une activité relativement stable sur la majorité de la période, avec un volume quotidien de vols oscillant autour d'un niveau relativement constant, proche de 200 vols par jour. Quelques variations ponctuelles apparaissent néanmoins, avec des journées présentant une activité légèrement plus faible ou plus élevée. Entre autres, lors de la première journée, certains vols ont été retiré de l'horaire parce qu'ils sont couverts par des rotations débutant avant le début de l'horizon. Cette stabilité indique que le volume de trafic reste relativement constant sur l'horizon étudié. L'analyse met en évidence que les caractéristiques structurelles du réseau, notamment l'organisation des rotations et leur répartition spatiale, contribuent à définir la dynamique opérationnelle des données avant l'introduction des perturbations.

Afin d'analyser plus finement la structure temporelle des opérations, nous examinons la distribution horaire des vols pour l'instance NW319. La Figure 5.2 présente, pour la journée du 15 janvier, le nombre total de vols débutant à chaque heure, ainsi que le nombre de vols touchant une base et débutant à cette même heure. Cette journée est choisie à titre d'exemple comme une journée représentative située au milieu de l'horizon mensuel.

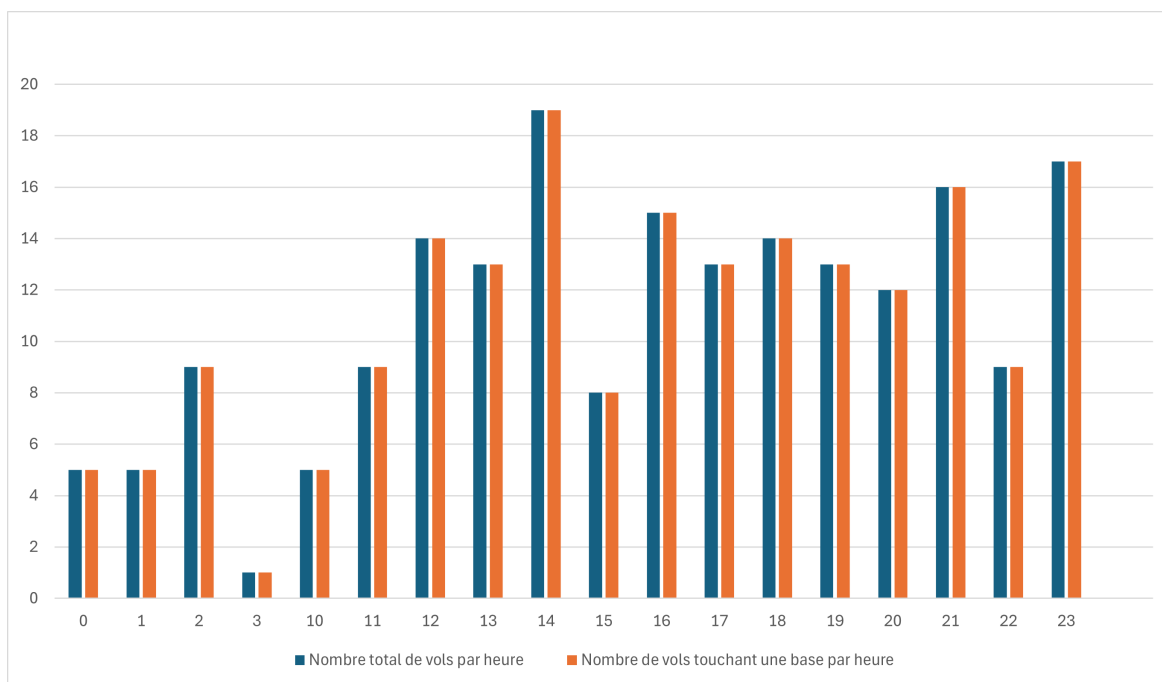


FIGURE 5.2 Distribution horaire du nombre total de vols et des vols touchant une base pour la journée du 15 janvier dans l'instance NW319

Nous observons que, pour chaque tranche horaire, le nombre de vols touchant une base est équivalent au nombre total de vols opérés. Cette observation indique que l'ensemble des vols considérés dans cette instance implique une base, ce qui reflète une forte centralisation des

opérations autour des bases principales du réseau.

Afin d'identifier les activités réellement éloignées des bases, nous analysons tout d'abord l'évolution quotidienne des départs effectués depuis des aéroports non-base. La Figure 5.3 présente le nombre total de départs hors base pour chaque jour de l'horizon étudié.

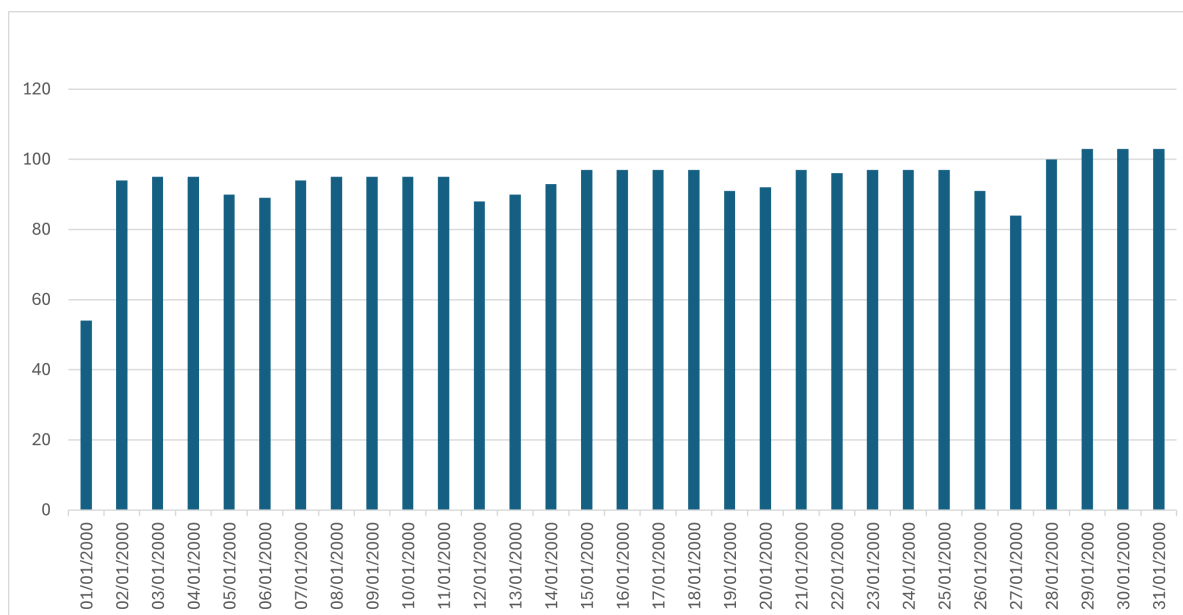


FIGURE 5.3 Nombre total de départs depuis des aéroports non-base par jour pour l'instance NW319.

Nous observons que le nombre de départs depuis des aéroports non-base reste relativement élevé et stable sur la majorité de la période, avec des valeurs proches de 90 à 100 départs quotidiens et une légère augmentation vers la fin du mois. Le niveau plus faible observé au début de l'horizon s'explique par le fait que les rotations commencent principalement depuis les bases, tandis que l'augmentation progressive vers la fin de la période reflète le retour des équipages vers leur base. Cette figure permet ainsi d'avoir une vue globale de l'activité hors base sur l'ensemble de l'horizon étudié.

Afin d'illustrer plus finement la structure horaire de ces départs, nous présentons ensuite un exemple détaillé pour la journée du 15 janvier. La Figure 5.4 montre le nombre de départs depuis des aéroports non-base par tranche horaire pour cette journée spécifique.

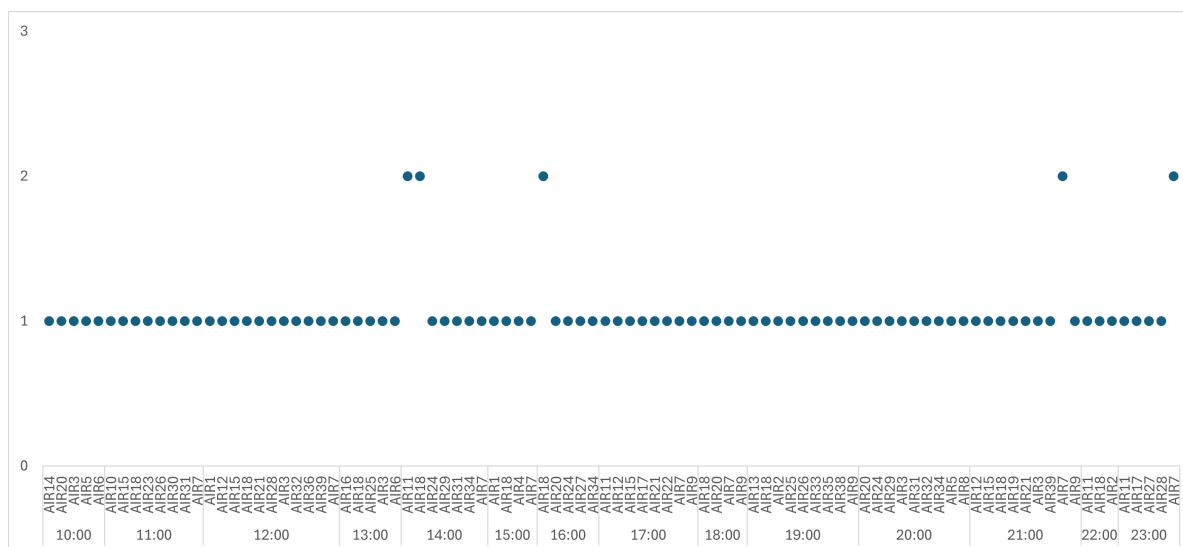


FIGURE 5.4 Nombre de départs depuis des aéroports non-base par heure pour la journée du 15 janvier de l'instance NW319.

Comme illustré à la Figure 5.4, ces situations restent très limitées à l'échelle horaire. Nous observons quelques cas isolés, notamment deux vols associés aux aéroports AIR6 et AIR18, ainsi qu'un départ ponctuel depuis AIR7. Cette analyse confirme que la majorité des opérations débute depuis une base, tandis que les départs depuis des non-bases demeurent marginaux.

Structure des rotations d'équipage

La structure des rotations est ensuite analysée à travers plusieurs indicateurs, notamment le nombre de rotations générées par jour ainsi que leur répartition selon les bases. Ces statistiques permettent de caractériser l'organisation globale des rotations et d'observer la manière dont l'activité opérationnelle est distribuée au sein du réseau avant l'introduction des perturbations.

Nous commençons par examiner l'évolution quotidienne du nombre de rotations générées sur l'horizon étudié. La Figure 5.5 présente la distribution du nombre de rotations débutant chaque jour pour l'instance NW319.

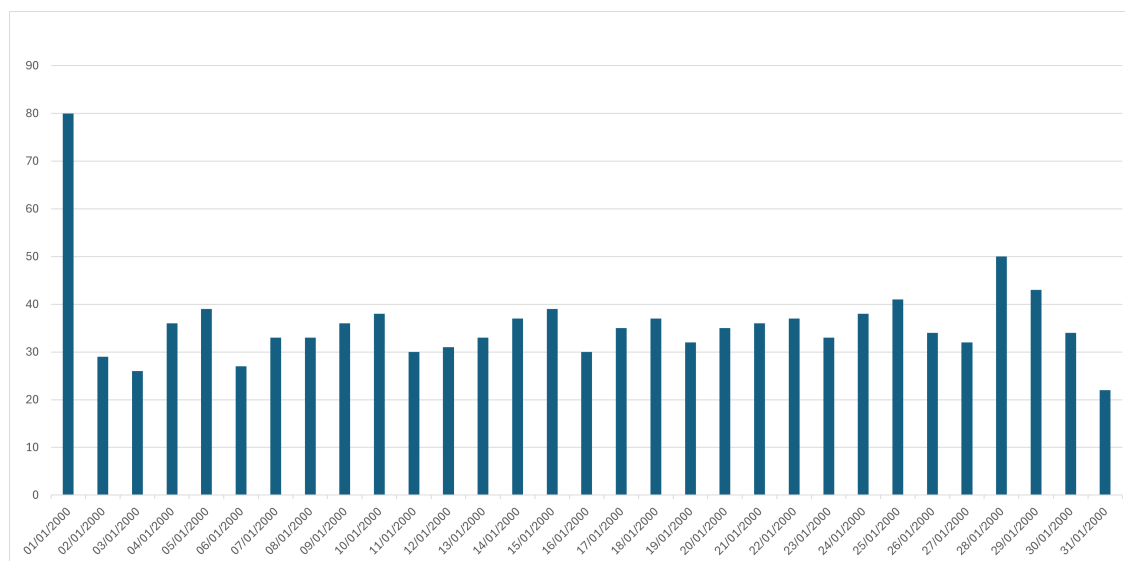


FIGURE 5.5 Nombre de rotations générées par jour pour l'instance NW319.

Nous observons que le nombre de rotations est particulièrement élevé au début de l'horizon, atteignant près de 80 rotations le premier jour du mois. Par la suite, l'activité varie de manière fluctuante, avec un volume quotidien compris entre 20 et 50 rotations. Cette évolution est marquée par la présence de plusieurs pics d'activité, chacun étant suivi d'une baisse du nombre de rotations. Le niveau le plus faible est observé vers la fin de la période, notamment autour du 31 janvier, avec environ 24 rotations. Ce comportement reflète la structure temporelle de l'organisation initiale des rotations et met en évidence des variations successives.

La répartition des rotations selon les bases est ensuite analysée. La Figure 5.6 présente le nombre total de rotations associées à chaque base pour l'instance NW319.

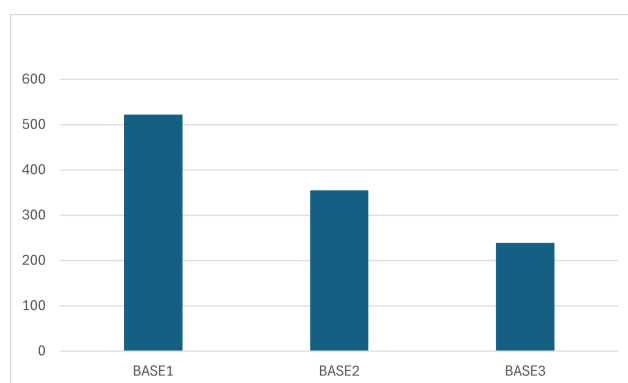


FIGURE 5.6 Répartition du nombre total de rotations par base pour l'instance NW319.

Cette répartition montre que la majorité des rotations est associée à la base 1, qui concentre la plus grande part de l'activité opérationnelle avec un total dépassant les 500 rotations sur l'horizon étudié. La base 2 présente un volume intermédiaire de rotations, tandis que la base 3 affiche le nombre le plus faible, avec environ 240 rotations. Cette différence met en évidence un déséquilibre relatif entre les bases.

Afin d'obtenir une vision plus détaillée de cette organisation, nous analysons également la répartition des rotations par base et par jour. La Figure 5.7 illustre l'évolution quotidienne du nombre de rotations pour chaque base.

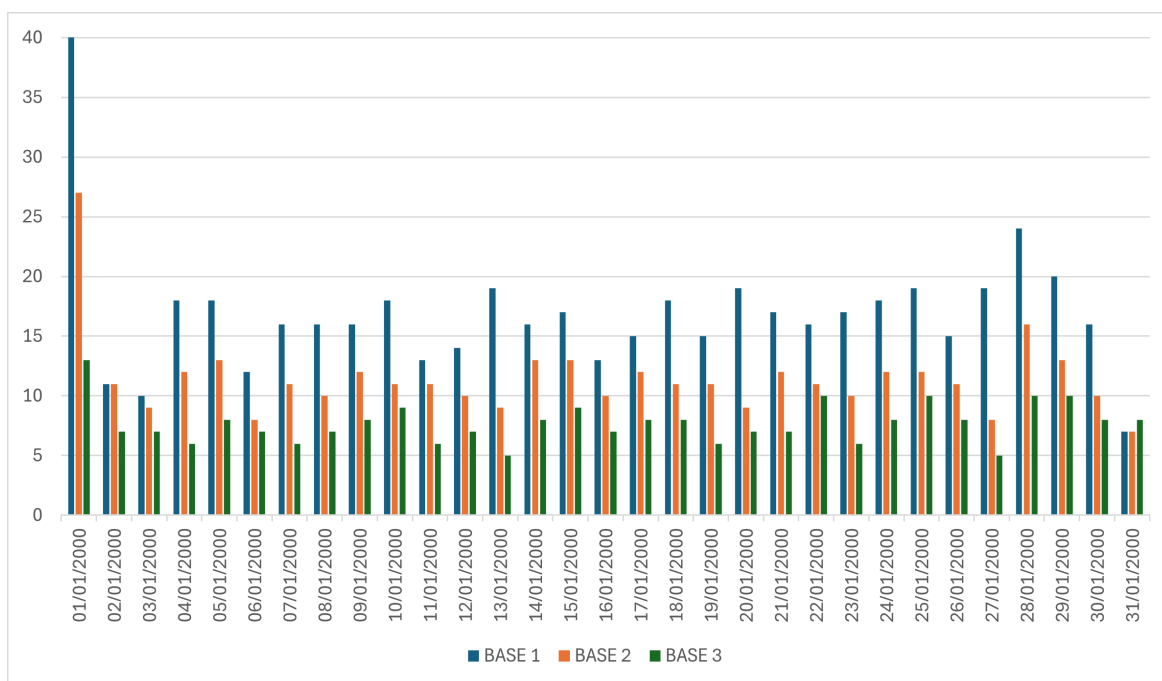


FIGURE 5.7 Nombre de rotations par base et par jour pour l'instance NW319.

Nous remarquons un niveau d'activité particulièrement élevé au début de l'horizon pour la base 1, avec un pic atteignant environ 40 rotations lors des premiers jours. Par la suite, l'activité alterne régulièrement entre les bases, avec des valeurs oscillant généralement entre 5 et 20 rotations par jour. Ce niveau initialement élevé s'explique par le fait que la majorité des équipages débutent leur rotation depuis leur base d'affectation au commencement de l'horizon, ce qui concentre un nombre important de départs sur les premiers jours de la période étudiée. La base 1 demeure globalement la plus active sur l'ensemble de la période, tandis que la base 3 présente le nombre de rotations le plus faible dans la majorité des cas. Cette répartition met en évidence une activité quotidienne variable selon les bases, tout en conservant une structure relativement régulière au cours de l'horizon étudié.

Positionnement et retour des équipages

Enfin, nous examinons le comportement des équipages à travers plusieurs indicateurs liés à leur positionnement quotidien. Nous analysons notamment le nombre d'équipages retournant à leur base d'origine ainsi que ceux ne terminant pas leur rotation à la base le même jour.

La Figure 5.8 présente l'évolution quotidienne du nombre d'équipages retournant à leur base par rapport à ceux ne retournant pas à la base pour l'instance NW319.

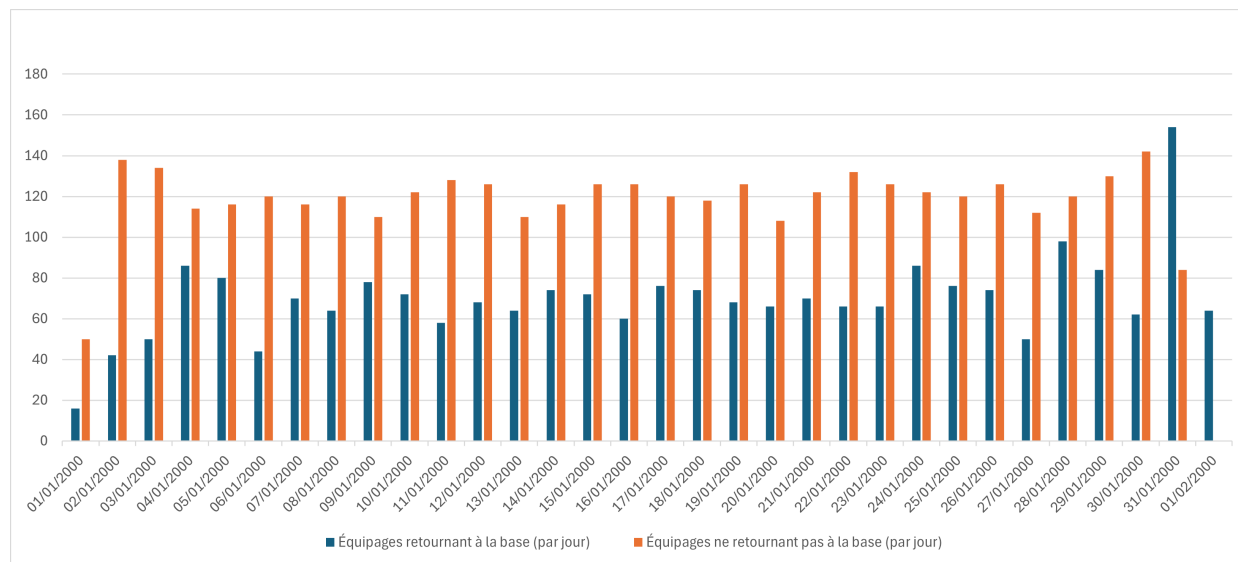


FIGURE 5.8 Nombre d'équipages retournant à leur base et ne retournant pas à la base par jour pour l'instance NW319.

Nous observons que le nombre d'équipages ne retournant pas à leur base demeure plus élevé que celui des équipages retournant à la base sur la majorité des jours de l'horizon étudié. Les équipages revenant à leur base présentent des valeurs plus variables, tandis que les équipages terminant hors base restent relativement stables au fil de la période. Cette configuration reflète une structure de rotations où plusieurs équipages poursuivent leur activité sur plusieurs jours avant de revenir à leur base d'origine.

Afin de mieux comprendre la localisation des équipages ne retournant pas à leur base, nous analysons ensuite l'endroit où ces services se terminent. La Figure 5.9 distingue les équipages terminant leur service dans une autre base et ceux se retrouvant dans un aéroport non-base.

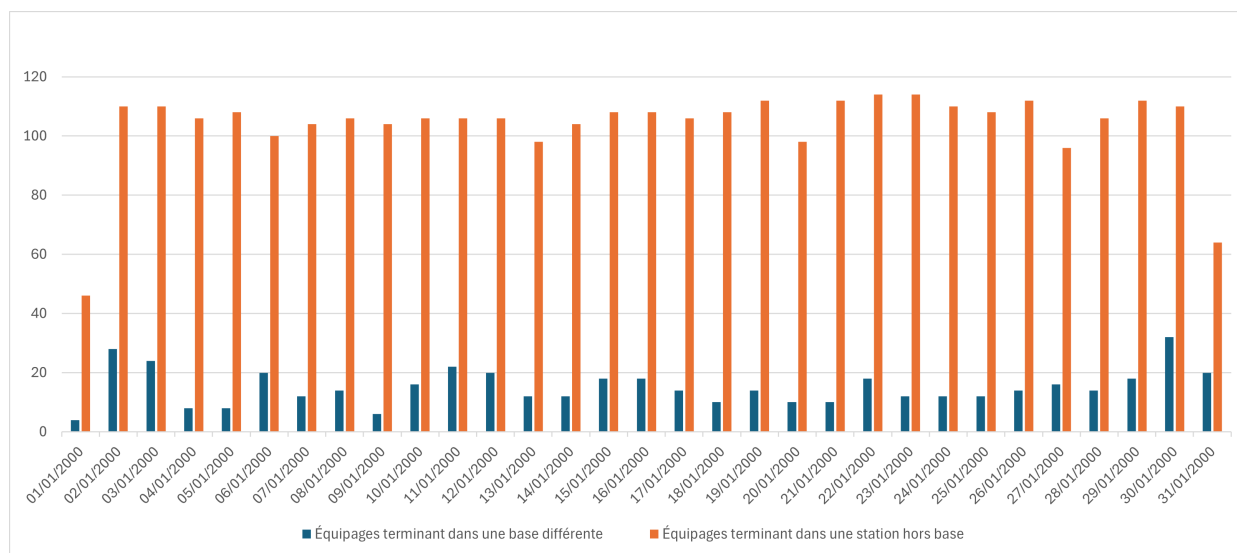


FIGURE 5.9 Répartition quotidienne des équipages terminant dans une autre base ou dans un aéroport non-base pour l'instance NW319.

Nous constatons que la grande majorité des équipages ne retournant pas à leur base à la fin d'une journée termine leur rotation dans des aéroports non-base, avec des valeurs quotidiennes dépassant généralement la centaine. À l'inverse, le nombre d'équipages terminant dans une autre base reste nettement plus faible et présente des variations limitées. Cette observation indique que les situations de fin de rotation hors base sont principalement associées à des aéroports non-base plutôt qu'à un repositionnement direct vers une autre base.

5.1.2 Caractéristiques globales des instances.

Le Tableau 5.1 synthétise les principales caractéristiques des différentes instances étudiées. Ces indicateurs permettent de situer la taille des problèmes considérés et de faciliter la comparaison des résultats expérimentaux présentés dans la suite du chapitre.

TABLEAU 5.1 Caractéristiques structurelles des instances expérimentales.

Instance	Nombre de vols	Nombre de rotations	Nombre d'équipages	Base majoritaire	Vols impliquant une base (%)	Vols au départ d'un non-base (%)
NW319	5886	1116	360	BASE1	100.00	49.29
NW320	7765	1691	642	BASE1	100.00	49.18
NW727	1013	197	54	BASE2	100.00	49.75
NW757	5743	1389	476	BASE1	99.69	45.60
NWDC9	1500	348	54	BASE3	100.00	49.73

À partir du Tableau 5.1, nous formulons les observations générales suivantes :

- Les instances étudiées présentent des tailles contrastées, avec un nombre de vols variant de 1013 (NW727) à 7765 (NW320), et un nombre de rotations compris entre 197 et 1691, traduisant des niveaux de complexité hétérogènes.
- La proportion de vols impliquant une base est quasi totale pour l'ensemble des instances (entre 99,69 % et 100 %), tandis qu'environ la moitié des vols partent d'un aéroport non-base (entre 45,60 % et 49,75 %), ce qui introduit des contraintes importantes de continuité des rotations.
- Les tailles des équipages varient significativement (de 54 à 642), ce qui influence directement la flexibilité du système face aux perturbations et la capacité à absorber les vols ouverts.
- Ces caractéristiques structurelles mettent en évidence la nécessité d'une procédure de réparation capable de gérer des réseaux de tailles variées, tout en traitant efficacement les déséquilibres induits par les vols au départ d'aéroports non-base et en limitant les modifications apportées aux rotations initiales.

5.2 Indicateurs d'évaluation et métriques de performance

Afin d'évaluer de manière rigoureuse la performance de la procédure de réparation proposée, nous définissons un ensemble d'indicateurs permettant d'analyser à la fois la qualité opérationnelle des solutions obtenues et le comportement computationnel de l'algorithme. Ces métriques sont appliquées de façon uniforme à l'ensemble des instances étudiées ainsi qu'aux différents scénarios de perturbation considérés, incluant les annulations simples et les annulations multiples.

Les indicateurs retenus visent à mesurer la capacité du mécanisme de réparation à rétablir la faisabilité opérationnelle tout en limitant l'impact sur les rotations existantes et sur la structure globale du réseau. Nous distinguons ainsi des métriques liées à la couverture des vols, aux modifications apportées aux affectations des équipages, aux impacts opérationnels induits par ces modifications, ainsi qu'au temps de calcul nécessaire pour obtenir une solution.

- **Taux de couverture des vols :** Le taux de couverture des vols mesure la proportion de vols initialement ouverts qui sont réintégrés dans des rotations valides après l'application de la procédure de réparation. Cet indicateur constitue une mesure directe de l'efficacité globale de l'approche proposée. Un taux de couverture élevé indique que le mécanisme de correction rapide et de réacheminement parvient à absorber une grande partie des perturbations tout en maintenant la cohérence opérationnelle du réseau.
- **Nombre de vols ouverts restants :** Nous analysons également le nombre de vols

demeurant non couverts après la phase de réparation. Cette métrique complète le taux de couverture en permettant d'identifier les situations où certaines perturbations demeurent trop complexes pour être entièrement résolues dans le cadre des contraintes opérationnelles imposées.

- **Nombre de rotations supplémentaires modifiées** : Cet indicateur mesure le nombre de rotations initialement saines ayant dû être modifiées au cours de la procédure de réparation, à l'exclusion des rotations déjà perturbées au départ. Il permet d'évaluer le degré d'intrusion du mécanisme de réparation dans la planification initiale. Une valeur faible indique que la correction demeure majoritairement locale et contenue aux rotations affectées, tandis qu'une augmentation de cet indicateur reflète un recours plus important au réacheminement étendu et une restructuration plus globale du plan.
- **Présence de vols de repositionnement** : Nous considérons également la présence éventuelle de vols de repositionnement, introduits afin de permettre à un équipage de rejoindre un lieu nécessaire à la poursuite ou à la reconstruction d'une rotation. Cet indicateur permet d'évaluer le coût opérationnel indirect des solutions générées, dans la mesure où l'ajout de vols de repositionnement augmente la complexité logistique et peut engendrer des coûts supplémentaires.
- **Impact sur les temps de repos des équipages** : L'analyse de l'impact sur les temps de repos vise à vérifier que les solutions obtenues respectent les contraintes opérationnelles liées à la récupération des équipages. Nous examinons notamment les modifications introduites dans la structure des rotations afin d'identifier d'éventuels ajustements affectant les périodes de repos.
- **Temps d'exécution** : Le temps d'exécution constitue une métrique essentielle pour évaluer la capacité de la méthode proposée à être utilisée dans un contexte décisionnel en temps contraint. Nous mesurons le temps total nécessaire pour appliquer la procédure complète de réparation, incluant les phases de correction rapide, de réacheminement et de résolution du modèle d'optimisation.
- **Nombre d'équipages ne retournant plus à leur base** : Cet indicateur mesure le nombre d'équipages dont le service, initialement prévue pour se terminer à leur base d'affectation, se termine, après application de la procédure de réparation, dans un aéroport non-base. Nous ne comptabilisons pas les équipages qui terminaient déjà hors base dans la solution initiale, même si leur aéroport de destination est modifié. Cet indicateur permet d'évaluer l'impact de la procédure de réparation sur le retour des équipages à leur base.

5.3 Résultats comparatifs de la procédure de réparation

Cette section présente une analyse comparative des performances de la procédure de réparation appliquée aux différentes instances étudiées. L’objectif est d’évaluer la capacité des mécanismes de correction rapide et de réacheminement à restaurer la faisabilité opérationnelle dans des contextes de perturbation variés.

Les expérimentations ont été réalisées en Python, en s’appuyant sur la bibliothèque *Pyomo* pour la modélisation des problèmes MIP. La résolution des instances est effectuée à l’aide du solveur MIP *HiGHS*. Les différents modules du processus, moteur de règles, mécanisme de correction rapide et génération de candidats, sont implémentés sous forme de scripts Python interconnectés.

L’analyse est structurée en deux volets complémentaires. Nous examinons d’abord les résultats globaux par instance, puis nous proposons une analyse détaillée des impacts opérationnels afin de caractériser plus finement la nature des modifications introduites par chaque mécanisme.

5.3.1 Résultats globaux par instance

Nous présentons dans un premier temps une vue d’ensemble des performances obtenues pour chaque instance. Cette analyse globale permet de comparer le comportement de la méthode sur des réseaux présentant des structures et des volumes différents. Les tableaux regroupent les principales métriques définies précédemment.

La première série de résultats concerne la phase de correction rapide, qui vise à traiter les perturbations simples par des ajustements locaux. Nous évaluons dans quelle mesure cette étape permet de restaurer efficacement la couverture des vols sur l’ensemble des instances. Les résultats présentés dans les tableaux suivants sont obtenus, pour chaque instance, à partir d’un modèle de données perturbé construit par annulation d’un ensemble de vols. Ce dispositif expérimental permet d’évaluer le comportement de la méthode sur des perturbations de nature et d’ampleur variables, plutôt que sur un cas isolé. Pour chaque instance, la correction rapide est d’abord appliquée au modèle de données perturbé. Lorsque cette étape ne suffit pas à couvrir tous les vols ouverts, la procédure de réacheminement est ensuite activée afin de compléter la réparation. Les résultats présentés dans les tableaux correspondent ensuite à des valeurs agrégées à l’échelle de l’instance, sous forme de cumuls ou de moyennes selon l’indicateur considéré.

L’agrégation dépend de la nature de l’indicateur considéré. Les métriques de comptage, telles que le nombre de vols ouverts, de vols réparés, de rotations modifiées, de vols de reposition-

nement, d'équipages hors base ou de vols ouverts restants ou encore le nombre d'itérations, sont cumulées à l'échelle de l'instance. En revanche, les taux de couverture ainsi que les temps d'exécution sont rapportés sous forme de moyennes, afin de refléter le comportement moyen de la méthode pour chaque instance. Ce choix permet de distinguer les indicateurs de volume, qui reflètent l'ampleur globale des perturbations traitées, des indicateurs de performance, qui décrivent le comportement moyen de la procédure. Pour chaque instance, nous avons testé des annulations multiples, construites selon la nature des vols perturbés, en distinguant notamment les cas base-base, base-non-base et non-base-base. Dans le cas de l'instance NW757, nous considérons en outre des scénarios non-base-non-base, puisque cette instance est la seule à contenir ce type de vols.

TABLEAU 5.2 Résultats globaux de la correction rapide (QF) pour l'ensemble des instances.

Instance	Vols ouverts initiaux cumulés	Vols réparés par QF	Vols ouverts restants après QF	Vols de repositionnement	Temps moyen d'exécution (s)
NW319	137	81	56	15	0.011
NW320	122	61	61	16	0.018
NW727	94	52	42	10	0.022
NW757	57	39	18	9	0.012
NWDC9	32	0	32	0	0.009

Le Tableau 5.2 présente les résultats globaux obtenus pour la phase de correction rapide sur les cinq instances étudiées. Pour chaque instance, les résultats sont obtenus à partir d'un modèle de données perturbé, dans lequel un certain nombre de vols ont été annulés. Le nombre de vols annulés n'est pas fixé a priori, il est varié afin d'évaluer la performance de la méthode sur des scénarios de perturbation de complexité croissante, incluant des cas plus extrêmes. Ainsi, 25 vols sont annulés pour l'instance NW319, 27 pour NW320, 21 pour NW727, 13 pour NW757 et 11 pour NWDC9. Les valeurs reportées pour les vols ouverts initiaux correspondent au nombre de vols devenus non couverts à la suite des annulations pour chaque instance. Nous observons que, pour les instances NW319, NW320, NW727 et NW757, la correction rapide permet de traiter efficacement une part significative des perturbations. En particulier, lorsque la procédure est applicable, elle permet de couvrir entièrement les vols concernés.

En termes de volume, la correction rapide permet de réparer respectivement 81 vols sur 137 pour NW319, 61 sur 122 pour NW320, 52 sur 94 pour NW727 et 39 sur 57 pour NW757. Ces résultats montrent que cette phase traite une proportion importante des vols ouverts, tout en laissant subsister un nombre non négligeable de vols nécessitant l'activation du mécanisme de réacheminement.

L'efficacité de cette étape s'accompagne d'un impact opérationnel limité. Le nombre de vols de repositionnement reste relativement faible, avec 15 pour NW319, 16 pour NW320, 10 pour

NW727 et 9 pour NW757. Par ailleurs, les temps d'exécution demeurent extrêmement faibles, compris entre 0.011 et 0.022 secondes, ce qui confirme que la correction rapide constitue un mécanisme particulièrement adapté à une utilisation en temps réel.

Il est également important de souligner que cette phase n'introduit pas de modifications supplémentaires sur des rotations initialement saines. En effet, la correction rapide agit uniquement sur les rotations perturbées, ce qui explique l'absence d'un indicateur relatif aux rotations supplémentaires modifiées dans ce tableau. Ce comportement confirme le caractère local et non intrusif de cette première étape de réparation.

En revanche, pour l'instance NWDC9, la correction rapide ne permet de réparer aucun vol, puisqu'aucun vol de repositionnement adapté n'est disponible. L'ensemble des 32 vols ouverts reste donc non couvert après cette phase. Ce résultat indique que la procédure de réacheminement devient alors indispensable pour restaurer la faisabilité des rotations.

La seconde série de résultats porte sur la phase de réacheminement, activée lorsque la correction rapide ne suffit pas à couvrir l'ensemble des vols ouverts. Nous présentons d'abord une synthèse globale des performances par instance afin d'évaluer l'efficacité du mécanisme sur les différentes flottes considérées.

TABLEAU 5.3 Résultats globaux du réacheminement pour l'ensemble des instances.

Instance	Vols pris en charge par le réacheminement	Vols réparés par réacheminement	Taux moyen de couverture (%)	Rotations supplémentaires modifiées	Vols de repositionnement	Temps moyen d'exécution (s)
NW319	56	56	100.0	0	0	0.015
NW320	61	61	100.0	0	0	0.021
NW727	42	42	100.0	1	0	0.023
NW757	18	27	98.53	7	0	0.088
NWDC9	32	32	100.0	0	0	0.014

Le Tableau 5.3 présente les performances globales de la phase de réacheminement sur l'ensemble des instances étudiées. Cette phase intervient en complément de la correction rapide afin de traiter les vols ouverts restants lorsque les ajustements locaux ne suffisent pas.

Nous observons tout d'abord que, pour les instances NW319, NW320, NW727 et NWDC9, le réacheminement permet de couvrir intégralement les vols pris en charge, avec un taux moyen de couverture très proches de 100 %. Cela indique que, dans ces cas, le mécanisme de réacheminement est capable de restaurer complètement la faisabilité des vols restants après la phase de correction rapide.

En termes de volume, le réacheminement traite respectivement 56 vols pour NW319, 61 pour NW320, 42 pour NW727 et 32 pour NWDC9, et parvient à réparer l'intégralité de ces vols. Ces résultats montrent que cette phase constitue un mécanisme robuste permettant de compléter efficacement la réparation lorsque la correction rapide est insuffisante.

Le cas de l'instance NW757 présente un comportement légèrement différent. Le nombre de vols réparés (27) est supérieur au nombre de vols ouverts en entrée de la phase de réacheminement (18), ce qui s'explique par la présence d'un impact en aval des modifications introduites par le réacheminement. En effet, certaines rotations modifiées entraînent la libération ou la création de nouveaux vols ouverts au cours du processus, qui sont ensuite intégrés et réparés dans les itérations suivantes. Le taux de couverture moyen de 98,53 % reflète ainsi une couverture quasi-complète, tout en indiquant la présence de quelques vols résiduels non couverts à l'issue du processus.

Contrairement à la correction rapide, le réacheminement peut nécessiter la modification de rotations initialement saines. Cet effet reste toutefois limité pour la majorité des instances, avec 0 rotation supplémentaire modifiée pour NW319, NW320 et NWDC9, et seulement 1 pour NW727. En revanche, pour NW757, ce nombre atteint 7, ce qui confirme que cette instance nécessite des ajustements plus globaux et une intervention plus intrusive pour absorber les perturbations.

Par ailleurs, aucun vol de repositionnement n'est observé pour les instances considérées. Cela indique que les solutions générées par le réacheminement reposent principalement sur une recomposition des rotations existantes, sans nécessiter de déplacements supplémentaires d'équipages sous forme de vols dédiés.

Enfin, les temps d'exécution demeurent faibles pour l'ensemble des instances, bien qu'ils soient légèrement supérieurs à ceux de la correction rapide. Ils varient entre 0.014 et 0.023 secondes pour la majorité des cas, et atteignent 0.088 secondes pour NW757, ce qui reflète une complexité accrue liée au nombre plus important de modifications et d'itérations nécessaires. En complément, le temps maximal observé pour la phase de réacheminement reste faible : il atteint 0.032 secondes pour NW319, 0.042 pour NW320, 0.040 pour NW727, 0.390 pour NW757 et 0.044 pour NWDC9.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que le réacheminement constitue un mécanisme complémentaire essentiel, capable de traiter des perturbations plus complexes au prix d'un niveau d'intrusion plus élevé dans la planification initiale, tout en conservant des temps de calcul faibles.

Nous proposons ensuite une analyse détaillée selon les différents types de perturbations considérés. Plus précisément, les vols annulés sont classés selon la nature de leur aéroport d'origine et de destination : base-base, base-non base, non-base-base et non-base-non base. Ces catégories permettent de capturer différentes configurations opérationnelles et d'évaluer l'impact de la structure du réseau sur la difficulté de la réparation.

Cette analyse fine, illustrée pour l’instance NW319 à titre d’exemple représentatif, permet d’examiner l’influence de ces configurations sur la qualité des solutions obtenues et d’évaluer la robustesse du mécanisme face à des perturbations de complexité variable.

TABLEAU 5.4 Résultats globaux du réacheminement selon les scénarios de perturbation.

Instance	Scénario	Vols pris en charge par le réacheminement	Vols réparés par réacheminement	Taux moyen de couverture (%)	Rotations modifiées	Temps moyen d’exécution (s)
NW319	Base-Base	37	37	100.0	0	0.016
NW319	Base-Non-base	6	6	100.0	0	0.016
NW319	Non-base-Base	13	13	100.0	0	0.012

Le Tableau 5.4 présente les résultats du réacheminement pour chaque type de perturbation. Nous observons que l’analyse met en évidence des performances homogènes du mécanisme de réacheminement pour l’ensemble des cas considérés. Pour l’instance NW319, les trois types de scénarios : Base-Base, Base-Non-base et Non-base-Base, présentent un taux de couverture moyen de 100 %, indiquant que l’ensemble des rotations pris en charge est entièrement réparé. En termes de volume, les scénarios Base-Base représentent la majorité des cas avec 37 vols traités, suivis des scénarios Non-base-Base avec 13 vols et Base-Non-base avec 6 vols. Malgré des structures différentes, le réacheminement parvient à reconstruire des rotations faisables dans tous les cas, sans nécessiter de modifications supplémentaires de rotations initialement saines. Les temps d’exécution restent très faibles, compris entre 0.012 et 0.016 secondes. Ces résultats montrent que, pour cette instance, le mécanisme de réacheminement est robuste vis-à-vis de la nature des perturbations et capable de traiter efficacement des cas variés du réseau.

5.3.2 Analyse détaillée des impacts opérationnels

Au-delà des indicateurs globaux, nous examinons plus finement la nature des modifications introduites dans les rotations. Cette analyse vise à comprendre comment les mécanismes de réparation affectent la structure opérationnelle du réseau.

Nous étudions notamment l’évolution du nombre de rotations supplémentaires modifiées ainsi que les effets observés sur le positionnement des équipages. Une attention particulière est portée aux différences entre la correction rapide, généralement plus localisée, et le réacheminement, susceptible d’entraîner des ajustements plus étendus.

Le Tableau 5.5 présente les impacts opérationnels associés à la réparation rapide pour l’ensemble des instances.

TABLEAU 5.5 Impacts opérationnels détaillés de la correction rapide.

Instance	Rotations impactées	Temps de repos affecté	Équipages hors base	Vols de repositionnement	Vols ouverts restants
NW319	14	0.0	0	15	56
NW320	13	0.0	0	16	61
NW727	9	0.0	0	10	42
NW757	9	0.0	0	9	18
NWDC9	0	0.0	0	0	32

Le Tableau 5.5 présente les impacts détaillés associés à la phase de correction rapide pour l'ensemble des instances étudiées. Nous observons tout d'abord que le nombre de rotations impactées reste limité pour toutes les instances, avec respectivement 14 pour NW319, 13 pour NW320, 9 pour NW727 et NW757, et aucune pour NWDC9. Cela confirme que la correction rapide agit de manière localisée en se concentrant uniquement sur les rotations directement perturbées, sans propagation des modifications à l'ensemble du réseau.

L'impact sur les temps de repos est nul pour toutes les instances, ce qui indique que les ajustements effectués respectent strictement les contraintes réglementaires et n'introduisent pas de dégradation des conditions de repos des équipages. De même, aucun équipage ne se retrouve hors base à l'issue de cette phase, ce qui montre que la correction rapide préserve la structure initiale des rotations et garantit le retour des équipages à leur base d'affectation.

En revanche, cette phase repose partiellement sur l'introduction de vols de repositionnement, avec 15 pour NW319, 16 pour NW320, 10 pour NW727 et 9 pour NW757. Ces vols permettent de réaligner localement les équipages afin de restaurer la faisabilité des rotations, tout en évitant des modifications plus profondes du plan initial.

Malgré ces ajustements, un nombre significatif de vols ouverts restent non couverts après la correction rapide, avec 56 pour NW319, 61 pour NW320, 42 pour NW727 et 18 pour NW757. Ces résultats montrent que, bien que rapide et peu intrusive, cette phase ne suffit pas à elle seule à résoudre l'ensemble des perturbations et nécessite l'intervention du mécanisme de réacheminement pour compléter la réparation.

Enfin, pour l'instance NWDC9, aucun impact n'est observé sur l'ensemble des indicateurs, ce qui confirme que la correction rapide ne parvient pas à traiter les perturbations dans ce cas. L'ensemble des vols ouverts demeure inchangé, soulignant le caractère insuffisant des ajustements locaux face à la structure spécifique de cette instance.

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence que la correction rapide constitue un mécanisme efficace pour traiter des perturbations simples avec un impact très limité. Elle permet de préserver la structure du réseau et les contraintes équipage, au prix toutefois d'une

couverture partielle des vols, nécessitant une phase de réacheminement complémentaire pour atteindre une solution complète.

Le Tableau 5.6 propose ensuite une analyse détaillée du réacheminement selon les différents types de perturbation, illustrée pour l'instance NW319 à titre d'exemple représentatif.

TABLEAU 5.6 Impacts opérationnels détaillés du réacheminement.

Instance	Scénario	Rotations impactées	Temps de repos affecté	Équipages hors base	Vols de repositionnement	Vols ouverts restants
NW319	Base-Base	7	0.0	2	0	0
NW319	Base-Non-base	1	0.0	0	0	0
NW319	Non-base-Base	3	0.0	2	0	0

Le Tableau 5.6 présente les impacts opérationnels détaillés du réacheminement selon les différents types de perturbation pour l'instance NW319.

Nous observons tout d'abord que le réacheminement permet d'éliminer entièrement les vols ouverts dans l'ensemble des cas, comme en témoigne l'absence de vols ouverts restants. Cela confirme l'efficacité de cette phase pour restaurer complètement la faisabilité des rotations, indépendamment de la nature de la perturbation.

Cette amélioration s'accompagne toutefois d'un impact opérationnel plus marqué que celui observé pour la correction rapide. Le nombre de rotations impactées varie selon le cas, avec 7 pour les cas Base-Base, 1 pour Base-Non-base et 3 pour Non-base-Base. Ces valeurs montrent que le réacheminement nécessite des ajustements plus étendus, en particulier dans les cas impliquant un fort volume de vols à traiter.

Par ailleurs, des équipages se retrouvent hors base dans certains cas, avec 2 équipages concernés pour les scénarios Base-Base et Non-base-Base, tandis qu'aucun impact de ce type n'est observé pour les scénarios Base-Non-base. Ce résultat met en évidence que, pour assurer une couverture complète des vols, le réacheminement peut modifier la structure finale des rotations et affecter le retour des équipages à leur base d'affectation.

En revanche, aucun impact n'est observé sur les temps de repos, qui restent nuls pour l'ensemble des scénarios. Cela indique que les solutions générées respectent les contraintes réglementaires liées aux périodes de repos, malgré les modifications introduites dans les rotations.

De plus, aucun vol de repositionnement n'est utilisé dans cette phase, ce qui suggère que le réacheminement repose principalement sur une recomposition des rotations existantes plutôt que sur l'ajout de vols supplémentaires.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que le réacheminement permet d'atteindre une couverture complète des perturbations au prix d'un niveau d'intrusion plus élevé dans la planifi-

cation initiale. Il introduit des modifications structurelles, notamment sur les rotations et le positionnement des équipages, tout en maintenant le respect des contraintes opérationnelles essentielles. Cette phase apparaît ainsi comme un mécanisme global, complémentaire à la correction rapide, permettant de traiter les situations les plus complexes.

5.4 Analyse computationnelle et comportement algorithmique

Cette section est consacrée à l'étude du comportement algorithmique de la procédure de réparation proposée, en complément des résultats opérationnels présentés précédemment. L'objectif est d'analyser la performance computationnelle de l'approche ainsi que sa capacité à converger vers une solution stable dans des contextes de perturbation variés.

Nous examinons d'une part les temps d'exécution observés pour les différentes instances et pour chaque étape du processus de réparation, et d'autre part la dynamique de convergence de la méthode au fil des itérations de résolution. Cette analyse permet de mieux comprendre l'efficacité globale de l'approche et sa capacité à être utilisée dans un contexte opérationnel nécessitant des décisions rapides.

5.4.1 Temps d'exécution

La correction rapide présente généralement des temps d'exécution faibles, ce qui confirme son rôle de mécanisme initial visant à traiter rapidement les perturbations simples. À l'inverse, la phase de réacheminement implique la résolution d'un modèle d'optimisation plus complexe et peut entraîner une augmentation du temps de calcul, en particulier lorsque plusieurs perturbations doivent être traitées simultanément.

L'analyse comparative des temps d'exécution entre les différentes instances permet également d'observer l'influence de la taille du réseau et du nombre de rotations sur la charge computationnelle globale. Ces observations contribuent à évaluer la robustesse de l'approche face à des instances de complexité croissante.

TABLEAU 5.7 Temps d'exécution des différentes phases de la procédure de réparation.

Instance	Temps correction rapide (s)	Temps réacheminement (s)	Temps résolution MIP (s)	Temps total (s)	Nombre d'itérations	Taux de scénarios résolus (%)
NW319	0.002	0.004	0.014	0.051	11	100.0
NW320	0.005	0.006	0.021	0.11	14	100.0
NW727	0.004	0.006	0.028	0.047	13	100.0
NW757	0.002	0.027	0.028	0.07	7	92.31
NWDC9	0.0	0.003	0.02	0.032	10	100.0

Le Tableau 5.7 présente les temps d'exécution des différentes phases de la procédure de

réparation, ainsi que le comportement itératif de l'algorithme pour l'ensemble des instances. Les temps reportés correspondent à des moyennes calculées sur l'ensemble des cas testés pour chaque instance. Nous observons que les temps d'exécution sont extrêmement faibles pour toutes les instances, confirmant l'efficacité computationnelle de la méthode proposée. La phase de correction rapide s'exécute en quelques millisecondes, avec des temps compris entre 0.002 et 0.005 secondes. La phase de réacheminement reste également très rapide, variant entre 0.003 et 0.006 secondes pour la majorité des instances, à l'exception de NW757 où elle atteint 0.027 secondes, en raison d'une complexité accrue des cas traités.

Le temps de résolution du modèle MIP constitue la composante principale du temps total, avec des valeurs comprises entre 0.014 et 0.028 secondes. Malgré cela, le temps total de la procédure demeure très faible, inférieur à 0.11 seconde pour toutes les instances, ce qui confirme la capacité de la méthode à être utilisée dans un contexte opérationnel en temps réel. En complément, le temps total maximal observé parmi les cas testés reste lui aussi faible : il atteint 0.081 secondes pour NW319, 0.093 secondes pour NW320, 0.058 secondes pour NW727, 0.427 secondes pour NW757 et 0.051 secondes pour NWDC9. Même dans les cas les plus complexes, la durée d'exécution demeure inférieure à une demi-seconde, ce qui confirme la robustesse et la capacité de la méthode à être utilisée en temps réel.

Le nombre d'itérations nécessaires à la convergence reste également limité, avec des valeurs comprises entre 7 et 14 selon les instances. Cela indique que le processus converge rapidement vers une solution stable, même en présence de perturbations nécessitant plusieurs phases de réacheminement.

Enfin, le taux de cas résolus est de 100 % pour la majorité des instances, à l'exception de NW757 où il atteint 92,31 %. Ce résultat montre que, bien que la méthode soit globalement très efficace, certains cas plus complexes peuvent nécessiter davantage d'ajustements ou conduire à une couverture légèrement incomplète.

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence une procédure de réparation à la fois rapide et légitime, capable de produire des solutions de qualité en un temps très court et avec un nombre réduit d'itérations, ce qui constitue un atout majeur pour une utilisation en environnement opérationnel.

5.4.2 Convergence du processus de réparation

Nous étudions ensuite la convergence du processus de réparation au fil des itérations de résolution. Chaque cycle vise à réduire progressivement le nombre de vols ouverts en intégrant de nouvelles rotations candidates et en ajustant la solution précédente.

L'analyse de la convergence repose notamment sur l'évolution du nombre de vols ouverts restants, la convergence des rotations sélectionnées ainsi que la diminution progressive des modifications apportées aux équipages. Dans les cas simples, la correction rapide permet d'atteindre rapidement une solution optimale, tandis que les cas plus complexes nécessitent plusieurs phases de réacheminement avant d'obtenir une solution satisfaisante.

Cette étude met en évidence le caractère progressif et itératif de la méthode proposée, illustrant sa capacité à améliorer la solution de manière graduelle tout en maintenant une cohérence opérationnelle du réseau.

TABLEAU 5.8 Analyse de la convergence du processus de réparation.

Instance	Nombre de rotations perturbées initiales	Vols ouverts initiaux	Vols ouverts après correction rapide	Vols ouverts après itération 1	Vols ouverts après itération 2	Vols ouverts finaux	Temps total (s)
NW319	25	137	56	0	0	0	0.051
NW320	27	122	61	0	0	0	0.11
NW727	21	94	42	1	0	0	0.047
NW757	13	57	18	3	1	1	0.07
NWDC9	10	32	32	0	0	0	0.032

Le Tableau 5.8 présente l'analyse de la convergence du processus de réparation pour chaque instance, à partir du modèle de données perturbé considéré. Les valeurs reportées correspondent à l'évolution du nombre de vols ouverts au fil des différentes phases de la procédure. Le nombre de rotations modifiées n'est pas détaillé par itération dans ce tableau, il évolue au fil des itérations en fonction des rotations candidates retenues lors de chaque résolution du modèle. Nous observons tout d'abord que les scénarios considérés couvrent des perturbations de faible à moyenne ampleur, tout en incluant volontairement des cas plus extrêmes. En effet, le nombre de rotations perturbées initialement varie entre 10 et 27 selon les instances. Dans un contexte industriel, notre partenaire IBS considère généralement qu'une perturbation mineure implique au plus une dizaine de rotations affectées. Dans ce travail, nous avons étendu ce cadre en testant des scénarios allant jusqu'à 27 rotations perturbées, soit plus du double des perturbations considérées comme mineures. Ces résultats montrent que la méthode proposée reste performante au-delà des conditions opérationnelles usuelles et qu'elle est capable de traiter des perturbations de plus grande ampleur, tout en conservant des temps de calcul très faibles. Les instances NWDC9 (10 rotations), NW757 (13 rotations) et NW727 (21 rotations) correspondent à des perturbations relativement modérés, tandis que NW319 (25 rotations) et NW320 (27 rotations) illustrent des situations plus exigeantes.

L'analyse de la convergence montre que la correction rapide permet une réduction significative du nombre de vols ouverts dès la première étape. Par exemple, pour NW319, le nombre de vols ouverts passe de 137 à 56, et pour NW320 de 122 à 61. Cette phase agit donc efficacement comme un mécanisme de réduction initiale, sans toutefois permettre d'atteindre une couverture complète, ce qui justifie le recours au réacheminement.

Le processus de réacheminement permet ensuite une convergence rapide vers une solution quasi optimale. Pour la majorité des instances, l'ensemble des vols ouverts est résorbé dès la première itération, avec 0 vol ouvert restant après l'itération 1 pour NW319, NW320 et NWDC9. Pour NW727, un seul vol ouvert subsiste après la première itération, mais la convergence est atteinte dès l'itération suivante.

Le cas de NW757 illustre un scénario plus contraignant, où le nombre de vols ouverts diminue progressivement de 18 après correction rapide à 3 après la première itération, puis à 1 après la deuxième, avec un vol résiduel en fin de processus. Ce comportement reflète une structure plus restrictive du réseau dans cette instance, nécessitant plusieurs ajustements successifs pour approcher une solution quasi complète.

Les temps totaux demeurent extrêmement faibles pour l'ensemble des instances, inférieurs à 0.11 seconde, confirmant que cette convergence rapide est obtenue avec un coût négligeable, même pour des scénarios dépassant largement le cadre des perturbations mineures.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la méthode proposée converge rapidement vers une solution quasi optimale, en particulier pour des perturbations de type mineur à modéré. La combinaison de la correction rapide et du réacheminement permet une réduction progressive et efficace des vols ouverts, tout en maintenant un temps de calcul compatible avec une utilisation en temps réel.

5.5 Discussion des résultats

Les résultats obtenus mettent en évidence l'efficacité de la méthode proposée pour restaurer la faisabilité des rotations d'équipage sous perturbations. La combinaison d'une correction rapide et d'un réacheminement permet de traiter les perturbations de manière progressive, en réduisant d'abord localement le nombre de vols ouverts, puis en complétant la réparation à l'aide d'un mécanisme de génération des rotations.

La correction rapide joue un rôle essentiel en traitant une part importante des perturbations avec un impact opérationnel limité et des temps d'exécution très faibles. Le réacheminement permet ensuite de couvrir les cas plus complexes, conduisant dans la majorité des instances à une couverture complète ou quasi complète des vols.

Les résultats montrent également que la méthode reste performante pour des niveaux de perturbation supérieurs à ceux généralement considérés en pratique. Alors que les perturbations mineures impliquent typiquement un nombre limité de rotations, les cas testés atteignent jusqu'à 27 rotations perturbées, tout en conservant des temps de calcul très faibles. Ces résultats confirment que l'approche proposée est adaptée à une utilisation en contexte opérationnel et

demeure robuste face à des situations plus exigeantes.

L'analyse des impacts opérationnels indique par ailleurs que les modifications introduites restent globalement limitées, avec peu de rotations supplémentaires affectées et un recours restreint aux vols de repositionnement.

Certaines limites apparaissent néanmoins. La correction rapide ne permet pas toujours de résoudre les perturbations les plus contraignantes, nécessitant l'intervention du réacheminement. De plus, certains scénarios peuvent requérir plusieurs itérations et laisser subsister un faible nombre de vols non couverts.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la méthode proposée constitue une approche efficace et rapide pour la réparation des rotations, tout en maintenant un bon compromis entre qualité des solutions et impact opérationnel.

5.6 Conclusion du chapitre

Les résultats présentés dans ce chapitre mettent en évidence l'efficacité de l'approche proposée pour la réparation des rotations d'équipage en contexte de perturbations mineures. La combinaison d'un mécanisme de correction rapide, d'une procédure de génération de rotations candidates et d'un modèle MIP permet de restaurer un niveau élevé de couverture des vols, tout en limitant les modifications apportées au plan initial.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Synthèse des travaux et limitations

Ce mémoire s’est intéressé à la problématique de la réparation des rotations d’équipage en présence de perturbations mineures en exploitation des compagnies aériennes, dans un contexte nécessitant des décisions rapides et fiables. L’objectif principal était de proposer une méthode automatisée capable de restaurer la faisabilité réglementaire et opérationnelle des rotations, tout en limitant les modifications apportées à la planification initiale.

La contribution principale de ce travail réside dans la conception et l’implémentation d’un cadre de réparation sur deux phases : (i) une phase de correction locale rapide (*quick-fix*) visant à traiter efficacement les perturbations simples tout en préservant la structure des rotations existantes, et (ii) une phase de réacheminement permettant de couvrir les vols ouverts restants. Ce positionnement, volontairement centré sur les perturbations mineures, se distingue des approches classiques de la littérature qui privilégient souvent des modèles intégrés plus généraux mais également plus coûteux sur le plan computationnel. Il permet de proposer une stratégie de réparation progressive combinant efficacité et rapidité d’exécution, compatible avec les exigences des centres de contrôle des opérations.

Un autre apport important de ce travail réside dans l’intégration explicite des contraintes opérationnelles à toutes les étapes du processus. Les règles de continuité géographique, de temps de connexion, de repos, de composition d’équipage et de structure des rotations sont utilisées à la fois pour la détection des perturbations et pour la génération des solutions candidates, garantissant ainsi la production de solutions rapide et légale.

Malgré ces contributions, certaines limites doivent être soulignées. Tout d’abord, les données disponibles se limitent aux équipages techniques (commandant de bord et premier officier), sans prise en compte des équipages cabine, ce qui restreint le réalisme opérationnel des solutions obtenues. De plus, certaines contraintes importantes, telles que les qualifications spécifiques des équipages ou les restrictions réglementaires liées aux aéroports ou aux zones géographiques, n’ont pas pu être intégrées faute de données appropriées.

Par ailleurs, le cadre étudié se concentre principalement sur des scénarios d’annulation de vols. Bien que la méthodologie soit générique, l’extension à d’autres types de perturbations, tels que les indisponibilités d’équipage ou les variations dynamiques des temps de connexion, nécessiterait des adaptations du modèle ainsi que l’accès à des données plus riches. Ces limitations ouvrent naturellement la voie à plusieurs perspectives d’amélioration, qui sont

discutées dans la section suivante.

6.2 Améliorations futures

Les perspectives d'évolution de ce travail sont multiples et concernent à la fois l'enrichissement du cadre de modélisation, l'extension du périmètre décisionnel et l'amélioration des performances algorithmiques.

Un premier axe d'amélioration porte sur l'extension du modèle de données afin d'intégrer des contraintes opérationnelles supplémentaires actuellement absentes, notamment la prise en compte des équipages cabine, des qualifications spécifiques des équipages, des restrictions réglementaires propres à certains aéroports ou zones géographiques, ainsi que des temps de connexion dépendant du contexte opérationnel. L'enrichissement des données constitue une étape essentielle pour rapprocher davantage le cadre proposé des conditions réelles d'exploitation.

Un second axe concerne l'extension du problème au niveau des blocs mensuels. Dans ce travail, l'attention s'est portée sur la réparation des rotations, qui constitue le niveau critique immédiatement affecté par les perturbations. Cependant, une fois ces rotations réparées, des incohérences peuvent subsister au niveau des blocs mensuels individuels, notamment en termes d'équilibre de charge de travail, de continuité temporelle et de respect des contraintes contractuelles. Un prolongement naturel consiste donc à développer un cadre intégré de récupération hiérarchique, dans lequel la réparation des rotations est suivie d'une phase de ré-optimisation des blocs mensuels sur un horizon plus large. Cette perspective constitue un axe central de poursuite dans le cadre d'un projet doctoral.

Un troisième axe d'amélioration concerne les performances computationnelles et la qualité des solutions générées. Bien que les temps de résolution observés soient très faibles, l'introduction de techniques avancées, telles que des heuristiques de génération de colonnes, des stratégies de sélection adaptatives ou des approches hybrides combinant optimisation et apprentissage, pourrait permettre d'améliorer encore la rapidité et la robustesse du processus de réparation, en particulier dans des scénarios de perturbations de plus grande ampleur.

Par ailleurs, l'intégration de mécanismes d'aide à la décision constitue une perspective importante. Le développement d'outils interactifs permettant aux opérateurs de visualiser, comprendre et ajuster les solutions proposées favoriserait l'acceptabilité opérationnelle du système et faciliterait son déploiement en environnement réel.

Enfin, dans l'ensemble, ces perspectives ouvrent la voie à un cadre de récupération plus complet, capable de traiter des perturbations plus complexes tout en conservant les exigences

de rapidité, de robustesse et de conformité réglementaire propres au contexte opérationnel aérien.

RÉFÉRENCES

- S.-C. Chang. A duty based approach in solving the aircrew recovery problem. *Journal of Air Transport Management*, 19 :16–20, 2012.
- J. Clausen, A. Larsen, J. Larsen, and N. J. Rezanova. Disruption management in the airline industry—concepts, models and methods. *Computers & Operations Research*, 37(5) :809–821, 2010.
- L. K. Hassan, B. F. Santos, and J. Vink. Airline disruption management : A literature review and practical challenges. *Computers & Operations Research*, 127 :105137, 2021.
- R. Hassani, G. Desaulniers, and I. Elhallaoui. Real-time bi-objective personnel re-scheduling in the retail industry. *European Journal of Operational Research*, 293(1) :93–108, 2021.
- N. Kohl, A. Larsen, J. Larsen, A. Ross, and S. Tiourine. Airline disruption management—perspectives, experiences and outlook. *Journal of Air Transport Management*, 13(3) :149–162, 2007.
- J. Lee, L. Marla, and A. Jacquillat. Dynamic disruption management in airline networks under airport operating uncertainty. *Transportation Science*, 54(4) :973–997, 2020. doi : 10.1287/trsc.2020.0983.
- J. D. Petersen, G. Sölveling, J.-P. Clarke, E. L. Johnson, and S. Shebalov. An optimization approach to airline integrated recovery. *Transportation Science*, 46(4) :482–500, 2012.
- F. Quesnel, G. Desaulniers, and F. Soumis. A branch-and-price heuristic for the crew pairing problem with language constraints. *European Journal of Operational Research*, 283 (3) :1040–1054, 2020a.
- F. Quesnel, G. Desaulniers, and F. Soumis. Improving air crew rostering by considering crew preferences in the crew pairing problem. *Transportation Science*, 54(1) :97–114, 2020b.
- M. Stojković, F. Soumis, and J. Desrosiers. The operational airline crew scheduling problem. *Transportation Science*, 32(3) :232–245, 1998.
- Y. Su, K. Xie, H. Wang, Z. Liang, W. A. Chaovalitwongse, and P. M. Pardalos. Airline disruption management : A review of models and solution methods. *Engineering*, 7(4) : 435–447, 2021.
- A. Tahir, F. Quesnel, G. Desaulniers, I. El Hallaoui, and Y. Yaakoubi. An improved integral column generation algorithm using machine learning for aircrew pairing. *Transportation Science*, 55(6) :1411–1429, 2021.

- J. Van den Bergh, J. Beliën, P. De Bruecker, E. Demeulemeester, and L. De Boeck. Personnel scheduling : A literature review. *European Journal of Operational Research*, 226(3) :367–385, 2013.
- L. P. Veelenturf, D. Potthoff, D. Huisman, L. G. Kroon, G. Maróti, and A. P. M. Wagelmans. A quasi-robust optimization approach for crew rescheduling. *Transportation Science*, 50(1) : 204–215, 2016.
- T. Verhaegh, D. Huisman, P.-J. Fioole, and J. C. Vera. A heuristic for real-time crew rescheduling during small disruptions. *Public Transport*, 9 :325–342, 2017.
- J. Vink, B. F. Santos, W. J. C. Verhagen, I. Medeiros, and R. Filho. Dynamic aircraft recovery problem : An operational decision support framework. *Computers & Operations Research*, 117 :104892, 2020.
- K. Wei and V. Vaze. Modeling crew itineraries and delays in the national air transportation system. *Transportation Science*, 52(5) :1276–1296, 2018.
- G. Yu, M. Argüello, G. Song, S. M. McCowan, and A. White. A new era for crew recovery at Continental Airlines. *Interfaces*, 33(1) :5–22, 2003.

ANNEXE A LISTE MAÎTRE DES NOTATIONS

Cette annexe regroupe l'ensemble des notations utilisées dans le mémoire. Elles sont organisées par familles afin de faciliter la lecture des modèles, des algorithmes et des résultats présentés dans les chapitres précédents.

Tableau A.1 Liste maître des notations utilisées dans le mémoire.

Symbole	Définition
Ensembles, tables et modèles de données	
$\mathcal{A}$	ensemble des aéroports (ou table des aéroports selon le niveau de représentation).
$\mathcal{F}$	ensemble des vols (ou table des vols).
$\mathcal{L}$	ensemble des tronçons.
$\mathcal{S}$	ensemble des services.
$\mathcal{R}$	ensemble des rotations.
$\mathcal{T}$	ensemble des blocs mensuels.
$\mathcal{C}$	ensemble des membres d'équipage.
X	table ou collection de données générique.
$\mathcal{D}$	modèle de données consolidé.
$\mathcal{D}'$	modèle de données perturbé.
$\mathcal{A}^c$	ensemble nettoyé des aéroports.
$\mathcal{F}^c$	ensemble nettoyé des vols.
$\mathcal{L}^c$	ensemble nettoyé des tronçons.
$\mathcal{S}^c$	ensemble nettoyé des services.
$\mathcal{R}^c$	ensemble nettoyé des rotations.
$\mathcal{T}^c$	ensemble nettoyé des blocs mensuels.
$\mathcal{C}^c$	ensemble nettoyé des membres d'équipage.
X^c	version nettoyée de la table ou collection générique X .
Éléments individuels	
f	vol.
u	tronçon.
s	service.
r	rotation.
c	membre d'équipage.
b	base.
ω	une configuration d'entrée utilisée par le générateur de données.

Symbole	Définition
Dates, heures et attributs temporels	
$t^{\text{dep}}(f)$	date et heure de départ du vol f .
$t^{\text{arr}}(f)$	date et heure d'arrivée du vol f .
$t^{\text{dep}}(u)$	date et heure de départ du tronçon u .
$t^{\text{arr}}(u)$	date et heure d'arrivée du tronçon u .
$t^{\text{dep}}(r)$	date et heure de départ de la rotation r .
$t^{\text{arr}}(r)$	date et heure d'arrivée de la rotation r .
start_r	date ou instant initial de la rotation r .
$\text{rep}(s)$	heure de début du service s .
$\text{rel}(s)$	heure de fin du service s .
$\text{dep}(u)$	instant de départ du tronçon u dans les procédures de réparation.
$\text{arr}(u)$	instant d'arrivée du tronçon u dans les procédures de réparation.
Fonctions de structure	
$\mathcal{L}(r)$	ensemble des tronçons associés à la rotation r .
$\mathcal{S}(r)$	séquence ordonnée des services de la rotation r .
G_s	ensemble des tronçons composant le service s .
$\Theta(f)$	horaires du vol f , soit $\Theta(f) = (t^{\text{dep}}(f), t^{\text{arr}}(f))$.
$\text{id}(x)$	identifiant unique associé à l'objet x .
$\delta(u)$	indicateur de repositionnement du tronçon u : $\delta(u) = 1$ si u est un repositionnement, 0 sinon.
$\tau(f)$	fonction de typologie du vol f selon ses aéroports d'origine et de destination.

Tableau A.1 (suite) Liste maître des notations utilisées dans le mémoire.

Symbole	Définition
Paramètres de construction des services	
$REST_{\min}$	temps minimal de repos entre deux services.
$CONN_{\min}$	temps minimal de correspondance entre deux tronçons consécutifs.
$BRIEF$	durée de préparation avant service.
$DEBRIEF$	durée de clôture après service.
Δ_{brief}	durée de briefing utilisée pour calculer l'heure de prise de service.
Δ_{debrief}	durée de débriefing utilisée pour calculer l'heure de fin de service.
Typologie des vols	
BB	vol reliant une base à une base.
BN	vol reliant une base à un aéroport hors base.
NB	vol reliant un aéroport hors base à une base.
NN	vol reliant deux aéroports hors base.
Notations liées aux perturbations	
$\mathcal{F}_{\text{ann}}$	ensemble des vols annulés.
$\mathcal{R}_{\text{pert}}$	ensemble des rotations perturbées ou non valides.
$\mathcal{R}_f$	ensemble des rotations contenant le vol f .
$N_{\max}$	nombre maximal de rotations perturbées autorisé lors de la génération d'un scénario.

Symbole	Définition
Notations liées à la réparation	
$\mathcal{F}_{\text{op}}$	ensemble des vols opérés après perturbation, c'est-à-dire les vols maintenus dans le programme (non annulés) et disponibles pour la construction ou la réparation des rotations.
$\mathcal{F}_{\text{cibles}}$	ensemble des vols à couvrir par le processus de réparation.
$\mathcal{F}_{\text{ouverts}}$	ensemble des vols non couverts à une étape donnée du processus.
$\mathcal{F}_{\text{ab}}$	ensemble des vols abandonnés induits par la solution sélectionnée.
$\mathcal{R}_{\text{rapide}}$	ensemble des rotations obtenues par la correction rapide.
$\mathcal{R}_{\text{cand}}$	ensemble des rotations candidates considérées par le modèle de sélection.
$\Delta\mathcal{R}$	ensemble des nouvelles rotations générées à une itération.
$\mathcal{R}^*$	ensemble des rotations sélectionnées par le modèle de ré-optimisation.
$\mathcal{R}_0$	ensemble des rotations servant de point de départ à la génération à une itération donnée.
Notations spécifiques au mécanisme de correction rapide	
$\mathcal{L}^{\text{op}}(r)$	ensemble des tronçons opérants de la rotation r .
$\mathcal{L}^{\text{ann}}(r)$	ensemble des tronçons annulés de la rotation r .
$\text{disc}(r)$	indicateur de discontinuité géographique de la rotation r .
u^-	dernier tronçon opérant précédant une annulation dans un service.
u^+	premier tronçon opérant suivant une annulation dans un service.
u^{ann}	tronçon annulé considéré dans la réparation locale.
$\text{orig}(u)$	aéroport d'origine du tronçon u .
$\text{dest}(u)$	aéroport de destination du tronçon u .
$(loc^{\text{start}}, t^{\text{start}})$	localisation et instant de début de la fenêtre locale de réparation.
$(loc^{\text{end}}, t^{\text{end}})$	localisation et instant de fin de la fenêtre locale de réparation.

Tableau A.1 (suite) Liste maître des notations utilisées dans le mémoire.

Symbole	Définition
Notations liées au réseau espace-temps et à la génération	
$\mathcal{G}(r, s, \mathcal{F})$	réseau espace-temps construit pour le service s de la rotation r à partir d'un ensemble admissible de vols $\mathcal{F}$. Selon le contexte, ce réseau est utilisé soit dans le mécanisme de correction rapide, soit dans la procédure de réacheminement.
$\Pi(r, s, \mathcal{F})$	ensemble des chemins réalisables générés dans le réseau espace-temps construit pour le couple (r, s) à partir de l'ensemble admissible de vols $\mathcal{F}$.
π	chemin réalisable dans un réseau espace-temps.
$\phi(\pi)$	ensemble des vols induits par le chemin π .
$\mathcal{F}_{\text{sec}}$	ensemble des vols admissibles utilisés dans la phase locale de correction rapide.
$\text{Remplacer}(r, s, \pi)$	opération consistant à construire une rotation r' en remplaçant le service s de r par le chemin π .
r'	rotation candidate obtenue après modification d'une rotation r .
Γ	contexte de génération et de validation des rotations candidates.
$\text{Val}(r', \Gamma, r)$	fonction de validation des règles opérationnelles appliquée à la rotation candidate r' .
$\text{Add}(r', \Gamma)$	fonction d'insertion avec anti-duplication dans l'ensemble des candidats.
Paramètres pour la génération des chemins	
MAX_PATH_LENGTH	longueur maximale d'un chemin (nombre de vols dans une séquence).
MAX_DEADHEAD_LEGS	nombre maximal de vols de repositionnement (deadheads) dans un chemin.
MAX_DUTY_HOURS	durée maximale d'un service avant la fin de la journée de travail.
MCT	temps minimal de correspondance entre deux vols consécutifs.
MAX_ROTATIONS	nombre maximal de rotations autorisées dans un scénario donné.

Symbole	Définition
Paramètres de pilotage du processus de réparation	
K_{max}	nombre maximal d'itérations du processus de génération / sélection.
κ	nombre maximal de rotations candidates générées à une itération.
L	nombre maximal de chemins conservés par service lors de la génération.
B	budget de rotations saines ajoutées au périmètre de génération.
k	compteur d'itération.
σ	mode de génération : $\sigma = 0$ pour la génération restreinte, $\sigma = 1$ pour la génération étendue.
$n_{\text{ouv}}^{\text{prec}}$	nombre de vols ouverts observé à l'itération précédente.
$\mathcal{F}_{\text{pool}}$	sous-ensemble des vols ouverts encore opérants utilisé comme ensemble de travail dans la procédure de réacheminement.
$\mathcal{R}_{\text{pool}}$	ensemble des rotations considéré dans une étape donnée de la procédure de réacheminement.
$\text{Top}(\cdot)$	opérateur de sélection des meilleures rotations selon un critère donné.
$\text{score}(r, \mathcal{F}_{\text{ouverts}})$	score mesurant l'intérêt de la rotation r au regard des vols ouverts.