



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Management Industriel et Logistique

Présenté par :

Inssaf BETAOUAF

Thème :

Planification tactique de l'approvisionnement en hydrocarbure

dans un réseau de pipeline :

Etude mono objectif

Soutenu publiquement, le 20 / Juin / 2026, devant le jury composé de :

M	Fouad MALIKI	MCA	ESSA, Tlemcen	<i>Président</i>
M	Mohammed BENNEKROUF	MCA	ESSA, Tlemcen	<i>Directeur de mémoire</i>
M	Djamel BENNACER	Docteur	NAFTAL	<i>Co-Directeur de mémoire</i>
M	Mustapha Anwar BRAHAMI	MCA	ESSA, Tlemcen	<i>Examineur 1</i>
M	Mohamed Amine CHERIER	MCB	ESSA, Tlemcen	<i>Examineur 2</i>
M	Mohammed DAHANE	MC	ENIM, FRANCE	<i>Invité</i>
M	Mohammed Mortada BETAOUAF	Ingénieur	Groupe CHIALI	<i>Invité</i>

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à exprimer toutes mes gratitudes et mes vifs remerciements à mon Directeur de mémoire **Mr BENNEKROUF Mohammed**, Maître de Conférences A à l'ESSA de Tlemcen. Qu'il veuille croire à mes respectueuses estimations et mes sincères reconnaissances pour ses conseils qui m'ont été très précieux et indispensables tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je remercie profondément mon Co-Directeur de mémoire **Dr BENNACER Djamel**, Responsable du Terminal Arrivée de la Canalisatation ASR / NAFTAL, qui m'a accordé sa confiance en me proposant ce sujet de mémoire, pour les conseils qu'il m'a prodigués pour mener à bien ce travail, pour sa rigueur, son sérieux et sa disponibilité permanente.

Je tiens à remercier particulièrement **Mr MALIKI Fouad**, **Mr BRAHAMI Mustapha Anwar** et **Mr CHERIER Mohamed Amine**, d'avoir accepté d'être respectivement Président et membres du jury de ce mémoire.

J'adresse également mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants et du personnel administratif de l'École Supérieure des Sciences Appliquées de Tlemcen. Leur engagement, leur pédagogie et leur dévouement ont fortement contribué à ma formation, éveillant en moi curiosité intellectuelle et esprit critique.

La liste est très longue pour ceux et celles non cités, que je leur réserve les vifs remerciements.

Dédicaces

« Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans ceux qui ont cru en moi
avant même que je croie en moi-même. »

À mes très chers parents,

À vous qui avez tout donné sans jamais rien demander en retour. Votre amour, vos sacrifices et vos encouragements silencieux ont été ma force à chaque étape de ce parcours. Ce diplôme est avant tout le vôtre. Qu'Allah vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes frères Mortada et Alaa Eddine,

Mortada, tu as été bien plus qu'un frère : un guide et une source d'inspiration. C'est toi qui m'as orienté vers ce chemin et encouragé à choisir ce sujet quand j'hésitais encore. Ta confiance en moi m'a porté jusqu'au bout. Je dédie également ce travail à mon petit frère Alaa Eddine, avec tout mon amour et mes vœux les plus sincères pour son avenir. Cette réussite est aussi la vôtre.

À tous mes enseignants,

À ceux qui, tout au long de mon parcours, ont su transmettre bien plus que des savoirs : une façon de penser, de chercher, de persévérer. Votre dévouement et votre passion pour l'enseignement ont forgé l'ingénieure que je suis en train de devenir. Je vous en suis profondément reconnaissante.

À vous tous, je dédie ce travail avec tout mon amour et toute ma reconnaissance.

Betaouaf Inssaf

Résumé

Résumé

Ce mémoire porte sur la modélisation et l'optimisation de la distribution des hydrocarbures dans le pipeline multiproduit de NAFTAL, l'entreprise nationale algérienne de distribution des produits pétroliers. L'étude s'appuie sur le réseau existant **ASR** reliant Arzew, Sidi Bel Abbès et Remchi, ainsi que sur son extension prévue vers Naâma, constituant le réseau **ASRN**. Face à la complexité inhérente à la gestion simultanée de plusieurs carburants au sein d'un même conduit — séquençage des lots, maîtrise du contaminant aux interfaces, respect des capacités de stockage et satisfaction d'une demande variable — une approche de **programmation linéaire mixte en nombres entiers** (MILP) a été formulée et résolue à l'aide du solveur **IBM ILOG CPLEX**. Le modèle a été appliqué sous trois scénarios de demande — faible, moyenne et forte — pour chacun des centres de livraison. Les résultats, visualisés à travers des diagrammes de Gantt et des tableaux de bord **Power BI**, démontrent la capacité du modèle à générer des plannings optimaux garantissant la continuité de l'approvisionnement tout en minimisant les coûts opérationnels. Cette étude constitue un outil d'aide à la décision concret pour la planification opérationnelle du réseau de pipelines de NAFTAL.

Mots-clés : Pipeline multiproduit, Optimisation, Planification, Chaîne logistique pétrolière, NAFTAL, Programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP), CPLEX, Contaminant, Scénarios de demande.

Abstract

This thesis addresses the modelling and optimization of hydrocarbon distribution within NAFTAL's multiproduct pipeline network, Algeria's national petroleum products distribution company. The study focuses on the existing **ASR** pipeline connecting Arzew, Sidi Bel Abbès and Remchi, as well as its planned extension to Naâma, forming the **ASRN** network. Managing multiple fuel products within a single pipeline involves significant operational complexity, including product sequencing, contamination control at batch interfaces, storage capacity constraints, and variable demand satisfaction across delivery centres. To address these challenges, a **Mixed Integer Linear Programming** (MILP) formulation was developed and solved using the **IBM ILOG CPLEX** solver. The model was applied under three demand scenarios — low, medium and high — for each delivery centre in the network. Results,

visualised through Gantt charts and **Power BI** dashboards, demonstrate the model's ability to generate optimal operational schedules that ensure continuous supply while minimising operational costs. This work provides a practical decision-support tool for the operational planning of NAFTAL's pipeline network, and lays the groundwork for further extensions towards stochastic and hydraulic modelling.

Keywords : Multiproduct pipeline, Optimization, Planning, Petroleum supply chain, NAF-TAL, Mixed Integer Linear Programming (MILP), CPLEX, Contamination, Demand scenarios.

ملخص

تتناول هذه المذكرة نمذجة وتحسين توزيع المحروقات عبر خط الأنابيب متعدد المنتجات التابع لشركة نفطال، المؤسسة الوطنية الجزائرية لتوزيع المنتجات البترولية. تستند الدراسة إلى الشبكة القائمة (ASR) التي تربط أرزيو بسيدي بلعباس ورمشي، فضلاً عن امتدادها المخطط نحو النعامة لتشكيل شبكة (ASRN). نظراً للتعقيد الكبير الناجم عن إدارة عدة أنواع من الوقود داخل أنبوب واحد، يشمل تسلسل الدفعات والتحكم في التلوث عند الواجهات واحترام طاقة التخزين وتلبية طلب متغير في مراكز التسليم، تمت صياغة نموذج برمجة خطية مختلطة بأعداد صحيحة (MILP) وحله باستخدام المحلل (IBM ILOG CPLEX). طُبِّقَ النموذج في إطار ثلاثة سيناريوهات للطلب منخفض ومتوسط ومرتفع لكل مركز من مراكز التسليم في الشبكة. وقد كشفت النتائج، المصوّرة عبر مخططات غانت ولوحات متابعة (Power BI)، عن قدرة النموذج على توليد جداول زمنية مثلى تضمن استمرارية التموين مع تخفيض التكاليف التشغيلية إلى أدنى مستوى. ويُسكِّل هذا العمل أداة فعلية لدعم القرار في التخطيط التشغيلي لشبكة أنابيب نفطال، ويفتح آفاقاً واعدة لتطوير نماذج عشوائية وهيدروليكية أكثر واقعية.

الكلمات المفتاحية: خط أنابيب متعدد المنتجات، التحسين، التخطيط، سلسلة الإمداد البترولية، نفطال، البرمجة الخطية المختلطة بأعداد صحيحة (MILP)، CPLEX، التلوث، سيناريوهات الطلب.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Liste des Abréviations	xii
Introduction Générale	1
1 Généralités sur le Transport par Pipeline dans l'Industrie Pétrolière	3
1.1 Introduction	3
1.2 L'industrie pétrolière : aperçu général	3
1.2.1 Les étapes de l'industrie pétrolière (amont, midstream, aval)	3
1.2.2 Le rôle du transport dans la chaîne pétrolière	4
1.3 Le transport par pipeline : définition et historique	4
1.3.1 Définition et concept	4
1.3.2 Historique et évolution mondiale	5
1.3.3 Le pipeline en Algérie	6
1.4 Types de pipelines	6
1.5 Infrastructure et composants d'un réseau pipeline	7
1.5.1 Les conduites et matériaux	7
1.5.2 Stations de pompage et de compression	7
1.5.3 Vannes et équipements de contrôle	8
1.5.4 Systèmes de surveillance (SCADA)	8
1.5.5 Dépôts et terminaux de stockage	8
1.6 Le transport multi-produit par pipeline	9
1.6.1 Le batching	9
1.6.2 Le contaminât ou interface	9
1.6.3 Degré de compatibilité entre produits	10
1.6.4 Les racleurs (Pigs)	10
1.7 Avantages et inconvénients du transport par pipeline	11
1.7.1 Avantages du transport par pipeline	11
1.7.2 Inconvénients et limites du transport par pipeline	12
1.8 Conclusion	13
2 Présentation de l'Entreprise NAFTAL et sa Position dans la Chaîne Logistique	

Pétrolière	14
2.1 Introduction	14
2.2 Présentation Générale de NAFTAL	14
2.2.1 Historique et évolution de NAFTAL	14
2.2.2 Statut juridique et organisation interne	15
2.2.3 Les acteurs de la chaîne logistique pétrolière en Algérie	15
2.3 La Position de NAFTAL dans la Chaîne Logistique Pétrolière	16
2.3.1 Rôle de NAFTAL en tant que maillon aval	16
2.3.2 Relation de NAFTAL avec SONATRACH	17
2.3.3 Relation de NAFTAL avec les raffineries	17
2.3.4 Gestion des approvisionnements et des stocks	17
2.3.5 Le réseau de transport et de distribution de NAFTAL	18
2.4 Les Défis Logistiques de NAFTAL	18
2.4.1 Gestion de la demande et des fluctuations	18
2.4.2 Optimisation des coûts de distribution	18
2.4.3 Sécurité et conformité réglementaire	19
2.4.4 Modernisation et digitalisation de la chaîne logistique	19
2.5 Le Transport par Pipeline au sein de NAFTAL	19
2.5.1 Infrastructure actuelle du réseau de pipelines	19
2.5.2 Présentation de la canalisation Multi-produit ASR	19
2.5.3 Problème d'optimisation de transport des carburants par pipeline multi- produit	20
2.5.4 Projets d'extension et perspectives	21
2.5.5 Importance stratégique du pipeline dans la chaîne logistique	21
2.6 Conclusion du chapitre	22
3 État de l'Art et Approches de Résolution	23
3.1 Introduction	23
3.2 Approches de Programmation Mathématique Exacte (MILP / MINLP)	23
3.2.1 Formulations MILP à temps discret	24
3.2.2 Formulations MILP à temps continu	25
3.3 Approches Métaheuristiques et Hybrides	27
3.4 Approches basées sur l'Intelligence Artificielle et l'Apprentissage Automatique	28
3.5 Approches d'Optimisation du Tracé et de la Conception des Pipelines	28
3.6 Synthèse et Revues Bibliométriques	29
3.7 Tableau Comparatif des Travaux	29
3.8 Conclusion	33
4 Modélisation Mathématique et Cahier des Charges	34
4.1 Introduction	34

4.2	Rappel et Présentation des Réseaux	34
4.2.1	Réseau actuel ASR	34
4.2.2	Réseau futur ASRN	35
4.3	Hypothèses du Modèle	38
4.4	Modèle Mathématique :	39
4.4.1	Nomenclature	39
4.4.2	Fonction Objectif	41
4.4.3	Contraintes	41
4.5	Application du Modèle aux Deux Réseaux	43
4.6	Données physiques du pipeline	44
4.6.1	Données de stock	45
4.6.2	Données de demande par scénario	46
4.7	Outil de résolution	47
4.8	Conclusion	47
5	Analyse et Discussion des Résultats	48
5.1	Introduction	48
5.2	Planning Optimal : Diagrammes de Gantt du Réseau ASRN	48
5.2.1	Structure et lecture du diagramme de Gantt	48
5.2.2	Diagramme de Gantt : Scénario de Faible Demande	49
5.2.3	Diagramme de Gantt : Scénario de Moyenne Demande	51
5.2.4	Diagramme de Gantt : Scénario de Forte Demande	52
5.2.5	Synthèse comparative des trois diagrammes de Gantt	53
5.3	Résultats du Centre C1 / SBA (Sidi Bel Abbès)	54
5.3.1	Vue générale : Tableau de bord Power BI (C1/SBA)	54
5.3.2	Évolution du Stock de Produits Purs du centre SBA	55
5.3.3	Évolution du Stock de Contaminant C1/SBA	58
5.3.4	Quantités Estimées Servies C1/SBA	61
5.4	Résultats du Centre C2 / REM (Remchi)	64
5.4.1	Vue générale Tableau de bord Power BI (C2/REM)	64
5.4.2	Évolution du Stock de Produits Purs C2/REM	64
5.4.3	Évolution du Stock de Contaminant C2/REM	67
5.4.4	Quantités Estimées Servies C2/REM	69
5.5	Résultats du Centre C3 / NAA (Naâma)	71
5.5.1	Vue générale — Tableau de bord Power BI (C3/NAA)	71
5.5.2	Évolution du Stock de Produits Purs C3/NAA	71
5.5.3	Évolution du Stock de Contaminant C3/NAA	74
5.5.4	Quantités Estimées Servies C3/NAA	76
5.5.5	Impact de la demande estimée sur la contamination	78

5.5.6 Apport de l'extension vers le centre C3/Naâma	78
5.6 Conclusion	79
Conclusion Générale	80
Bibliographie	82

Table des figures

1.1	Représentation schématique de la zone de mélange à l'interface entre deux produits consécutifs dans un pipeline multiproduit	10
2.1	Profil altimétrique longitudinal du pipeline multiproduit ASR (longueur totale : 168 135 m, volume d'entrée : 10 086,32 m ³)	20
4.1	Reseau actuel ASR	35
4.2	Réseau futur ASRN	36
5.1	Diagramme de Gantt du Réseau ASRN : Scénario de Faible Demande . . .	49
5.2	Diagramme de Gantt du Réseau ASRN : Scénario de Moyenne Demande .	51
5.3	Diagramme de Gantt du Réseau ASRN : Scénario de Forte Demande . . .	52
5.4	Tableau de bord Power BI Centre C1/SBA Vue générale (trois scénarios) . .	54
5.5	Évolution du stock de produits purs du centre SBA Scénario de Faible Demande	56
5.6	Évolution du stock de produits purs du centre SBA Scénario de Moyenne Demande	57
5.7	Évolution du stock de produits purs du centre SBA Scénario de Forte Demande	58
5.8	Évolution du stock de contaminant C1/SBA Scénario de Faible Demande .	59
5.9	Évolution du stock de contaminant C1/SBA Scénario de Moyenne Demande	60
5.10	Évolution du stock de contaminant C1/SBA Scénario de Forte Demande . .	60
5.11	Quantités estimées servies journalières C1/SBA Scénario de Faible Demande	61
5.12	Quantités estimées servies journalières C1/SBA Scénario de Moyenne Demande	62
5.13	Quantités estimées servies journalières C1/SBA Scénario de Forte Demande	62
5.14	Tableau de bord Power BI Centre C2/REM Vue générale (trois scénarios) .	64
5.15	Évolution du stock de produits purs C2/REM Scénario de Moyenne Demande	65
5.16	Évolution du stock de produits purs C2/REM Scénario de Forte Demande .	66
5.17	Évolution du stock de contaminant C2/REM Scénario de Faible Demande .	67
5.18	Évolution du stock de contaminant C2/REM Scénario de Moyenne Demande	68
5.19	Évolution du stock de contaminant C2/REM Scénario de Forte Demande . .	68
5.20	Quantités estimées servies journalières C2/REM Scénario de Faible Demande	69
5.21	Quantités estimées servies journalières C2/REM Scénario de Moyenne Demande	70
5.22	Quantités estimées servies journalières C2/REM scénario de Forte Demande	70
5.23	Tableau de bord Power BI Centre C3/NAA Vue générale (trois scénarios) .	71

5.24 Évolution du stock de produits purs C3/NAA Scénario de Faible Demande .	72
5.25 Évolution du stock de produits purs C3/NAA Scénario de Moyenne Demande	73
5.26 Évolution du stock de produits purs C3/NAA Scénario de Forte Demande .	74
5.27 Évolution du stock de contaminant C3/NAA Scénario de Faible Demande .	75
5.28 Évolution du stock de contaminant C3/NAA Scénario de Moyenne Demande	75
5.29 Évolution du stock de contaminant C3/NAA Scénario de Forte Demande . .	76
5.30 Quantités estimées servies journalières C3/NAA Scénario de Faible Demande	77
5.31 Quantités estimées servies journalières C3/NAA Scénario de Moyenne De- mande	77
5.32 Quantités estimées servies journalières C3/NAA Scénario de Forte Demande	78

Liste des tableaux

3.1	Synthèse comparative des principaux travaux de la littérature.	30
4.1	Comparaison des paramètres entre les réseaux ASR et ASRN	44
4.2	Caractéristiques physiques des segments du pipeline	45
4.3	Capacités des réservoirs par centre et par produit	46
4.4	Stocks initiaux par centre et par produit (m^3)	46
4.5	Stocks initiaux de contamination par centre et par produit (m^3)	46
4.6	Demandes en produits par centre et par scénario (m^3 /periode)	46

Liste des Abréviations

AG	Algorithme Génétique
ARZ	Arzew
ASR	Arzew – Sidi Bel Abbès – Remchi
ASRN	Arzew – Sidi Bel Abbès – Remchi – Naâma
CO	Combinatorial Optimization / Optimisation Combinatoire
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GNV	Gaz Naturel pour Véhicules
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MINLP	Mixed Integer Non-Linear Programming
NAA	Naâma
NAFTAL	Entreprise Nationale des Hydrocarbures et des Carburants
NP	Non-Polynomial (complexité)
PL	Programmation Linéaire
PLMNE	Programmation Linéaire Mixte en Nombres Entiers
PLNE	Programmation Linéaire en Nombres Entiers
PSO	Particle Swarm Optimization
REM	Remchi
SBA	Sidi Bel Abbès
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition

Introduction Générale

L'industrie pétrolière constitue l'un des piliers fondamentaux de l'économie algérienne. Depuis plusieurs décennies, elle représente non seulement la principale source de revenus de l'État, mais aussi le moteur d'un réseau logistique dense et complexe dont dépend l'approvisionnement en produits énergétiques de l'ensemble du territoire national. Au cœur de cette chaîne logistique, le transport par pipeline s'est imposé comme le mode le plus économique, le plus continu et le plus sûr pour acheminer de grandes quantités d'hydrocarbures sur de longues distances. Contrairement au transport routier ou ferroviaire, il offre une capacité de débit élevée avec des coûts d'exploitation réduits, ce qui en fait un maillon incontournable de la distribution pétrolière à l'échelle nationale.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de **NAFTAL**, l'entreprise nationale chargée de la distribution des produits pétroliers en Algérie. Opérant en aval de la chaîne pétrolière, NAFTAL assure l'acheminement des carburants depuis les raffineries jusqu'aux centres de distribution régionaux, en s'appuyant notamment sur la canalisation multiproduit **ASR** reliant Arzew à Sidi Bel Abbès et Remchi. Ce réseau, d'une longueur totale de plus de 168 kilomètres, transporte simultanément plusieurs types de carburants au sein d'un même conduit, ce qui soulève des problèmes spécifiques liés à la gestion des séquences de pompage, au contrôle des stocks dans chaque centre de livraison, et à la maîtrise du volume de contaminant généré aux interfaces entre produits successifs.

La planification de ces opérations est d'une grande complexité combinatoire. Décider de l'ordre et de la durée d'injection de chaque lot de produit, tout en respectant les contraintes de capacité des réservoirs, en satisfaisant une demande variable selon les périodes et les centres, et en limitant les pertes engendrées par la contamination, constitue un problème d'optimisation qui dépasse largement les capacités d'une gestion empirique. Cette complexité est encore accentuée par le projet d'extension du réseau vers la ville de **Naâma**, formant ainsi le réseau **ASRN**, qui allonge le linéaire de pipeline, multiplie les nœuds de livraison et rend la coordination des flux encore plus délicate. Face à ces enjeux, il devient indispensable de recourir à des approches mathématiques formelles, capables de produire des plannings optimaux garantissant à la fois la continuité de l'approvisionnement et la minimisation des coûts opérationnels.

C'est précisément l'objet du présent mémoire. En s'appuyant sur les outils de la recherche opérationnelle, et plus particulièrement sur la **programmation linéaire mixte en nombres entiers** (MILP), ce travail vise à proposer un modèle mathématique adapté aux caractéristiques physiques et logistiques du réseau ASR/ASRN, à le résoudre sous trois scénarios de

demande faible, moyenne et forte à l'aide du solveur **IBM ILOG CPLEX**, et à analyser les résultats au travers de tableaux de bord **Power BI** permettant une lecture opérationnelle des plannings obtenus.

Pour mener à bien cette étude, le mémoire est organisé en cinq chapitres. Le premier pose les bases théoriques du transport par pipeline dans l'industrie pétrolière, en abordant notamment les spécificités du transport multiproduit et les mécanismes de contamination. Le deuxième présente l'entreprise NAFTAL, son organisation et son réseau de distribution, avec un focus particulier sur l'infrastructure ASR et les défis liés à son extension vers Naâma. Le troisième dresse un état de l'art des méthodes d'optimisation appliquées aux pipelines multiproduits, depuis les formulations MILP et MINLP jusqu'aux approches métaheuristiques et à l'intelligence artificielle. Le quatrième chapitre détaille la modélisation mathématique retenue, les données du problème et l'outil de résolution utilisé. Enfin, le cinquième chapitre présente et analyse les résultats obtenus pour chacun des trois centres du réseau ASRN sous les différents scénarios considérés, avant qu'une conclusion générale ne vienne synthétiser les apports de ce travail et en dégager les perspectives.

Chapitre 1

Généralités sur le Transport par Pipeline dans l'Industrie Pétrolière

1.1 Introduction

L'industrie pétrolière et gazière repose sur une logistique complexe où le transport par pipeline constitue la solution la plus efficace et économique pour acheminer de grandes quantités d'hydrocarbures sur de longues distances [1]. Ce chapitre présente les concepts essentiels : segmentation de l'industrie (amont, midstream, aval), définition et évolution du transport par pipeline, typologies de pipelines et composants clés d'un réseau, ainsi qu'une analyse des avantages, inconvénients et spécificités techniques du transport multi-produit [2].

1.2 L'industrie pétrolière : aperçu général

L'industrie pétrolière englobe l'ensemble des activités liées à la recherche, à l'extraction, au transport, au raffinage et à la distribution des hydrocarbures, depuis leur état brut dans le sous-sol jusqu'à leur livraison au consommateur final. Sur le plan technique, le pétrole et le gaz naturel résultent de la décomposition de matières organiques accumulées au fond des océans pendant des millions d'années. Sous l'effet de la pression et de la chaleur, ces matières se transforment en hydrocarbures qui migrent pour s'accumuler dans des roches réservoirs poreuses, formant ainsi des gisements exploitables [3]. Sa structure est organisée en trois grands segments complémentaires et interdépendants : l'amont, le midstream et l'aval [3].

1.2.1 Les étapes de l'industrie pétrolière (amont, midstream, aval)

Le segment amont (Upstream)

Le segment amont regroupe les activités d'exploration et de production des hydrocarbures. L'exploration mobilise des géologues et géophysiciens qui s'appuient sur des techniques telles que les levés sismiques pour identifier les gisements potentiels. Une fois le gisement confirmé par des puits d'évaluation, la production est lancée pour extraire les hydrocarbures depuis le réservoir jusqu'à la surface [3].

Le segment midstream

Le segment midstream assure la liaison entre la production et le raffinage. Il regroupe les activités de transport, de stockage et de traitement primaire des hydrocarbures bruts. Le transport par pipeline constitue le moyen le plus économique et le plus utilisé pour acheminer de grandes quantités de pétrole brut et de gaz naturel sur de longues distances. Le stockage joue un rôle stratégique en régulant les flux entre la production et la demande [4].

Le segment aval (Downstream)

Le segment aval englobe le raffinage, la pétrochimie et la distribution des produits finis. Le raffinage transforme le pétrole brut en produits commercialisables tels que l'essence, le gazole et le kérosène. Ces produits sont ensuite acheminés vers les consommateurs finals à travers un réseau de dépôts et de stations-service [4].

1.2.2 Le rôle du transport dans la chaîne pétrolière

Le transport constitue l'épine dorsale de la chaîne d'approvisionnement pétrolière. En effet, le lien entre les ressources pétrolières, les champs de production, les raffineries et les marchés de consommation nécessite un immense système d'infrastructures afin d'assurer la continuité de l'approvisionnement [5]. Le transport représente le maillon de liaison indispensable entre les trois segments de l'industrie, le secteur des transports dépendant à hauteur de **98 %** des produits pétroliers [5].

Les principaux modes de transport utilisés dans la chaîne pétrolière sont les pipelines, les navires, les camions citernes et les wagons-citernes, chacun jouant un rôle spécifique selon la nature du produit transporté, la distance à parcourir et les contraintes économiques et géographiques [4]. Cependant, la gestion du transport demeure un défi majeur en raison de la complexité de la chaîne, des longues distances entre zones de production et marchés de consommation, et des fluctuations imprévisibles liées aux changements politiques et économiques [5].

1.3 Le transport par pipeline : définition et historique

1.3.1 Définition et concept

Le transport par pipeline constitue l'un des modes de transport les plus spécifiques de l'industrie pétrolière et gazière. Il désigne un système de canalisations enterrées ou aériennes, conçues pour acheminer sous pression et sur de grandes distances des matières fluides, qu'elles soient liquides ou gazeuses. Ce système industriel est composé d'un ensemble de tubes, de pompes, de vannes et d'accessoires divers tels que des robinets et des compresseurs, organisés

en réseau [2].

Selon la nature du fluide transporté, le pipeline prend des dénominations plus précises : on parle d'**oléoduc** pour le transport du pétrole brut, de **gazoduc** pour le gaz naturel, et d'**aqueduc** pour l'eau. Dans le domaine des hydrocarbures, le terme pipeline s'applique spécifiquement aux systèmes de canalisations à haute pression, pouvant atteindre jusqu'à cent bars, utilisés pour le transport à moyenne et grande distance des produits pétroliers. Les pipelines sont généralement construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement et intérieurement pour assurer leur étanchéité, puis enfouis dans le sol [2].

On distingue trois grandes familles de pipelines selon leur usage [6] :

- Les **pipelines de collecte**, qui ramènent le gaz ou le pétrole issus des gisements vers des stations de traitement ;
- Les **pipelines de transport ou de transit**, qui acheminent à haute pression les produits traités vers les zones de consommation ou les sites industriels ;
- Les **pipelines de distribution**, qui répartissent à basse pression les produits au plus près des consommateurs domestiques ou des petites industries.

1.3.2 Historique et évolution mondiale

L'histoire du transport par pipeline est indissociable de celle de l'industrie pétrolière mondiale. C'est aux États-Unis, en **1865**, que fut utilisée pour la première fois une conduite pour évacuer la production d'un gisement pétrolier. Depuis lors, ce mode de transport s'est progressivement généralisé à l'ensemble du monde, porté par l'accroissement constant de la consommation des hydrocarbures et la nécessité d'acheminer ces ressources depuis des zones de production souvent très éloignées des centres de consommation [1].

Le développement des réseaux de pipelines à travers le monde s'explique par plusieurs facteurs déterminants. Ce mode de transport permet de raccourcir considérablement les distances à franchir par rapport aux voies maritimes ou terrestres classiques, et représente la seule alternative viable lorsque les lieux de production ne sont pas accessibles par voie maritime. En outre, le pipeline est pratiquement insensible au relief et aux conditions géographiques, permettant la traversée de montagnes, de fleuves, de déserts ou de bras de mer [1].

À l'heure actuelle, le réseau mondial de pipelines en service dépasse le **million de kilomètres** de conduites, dont près des trois quarts sont dédiés au transport du pétrole brut et le reste au transport des produits raffinés. Les pipelines les plus importants pour le transport du pétrole brut se trouvent dans l'ex-URSS, où le plus long avoisine **5 000 km** pour un diamètre de 48 pouces. Le plus long pipeline de produits finis est installé aux États-Unis, reliant Baton Rouge à Greensboro sur une distance de **6 350 km** [1].

Sur le plan des performances économiques, les études comparatives montrent que le rapport des coûts de transport entre le pipeline, le transport fluvial et le transport ferroviaire est de l'ordre de **1 : 1 : 1,7**, faisant du pipeline le mode de transport le plus économe en énergie et le moins coûteux à l'exploitation pour les grandes distances et les volumes importants [1].

1.3.3 Le pipeline en Algérie

L'Algérie dispose d'un réseau étendu de transport des hydrocarbures par canalisation, qui constitue le maillon intermédiaire essentiel entre l'amont pétrolier et gazier, les activités aval de raffinage et de pétrochimie, et la commercialisation des produits finis. Ce réseau, géré principalement par **SONATRACH** et sa filiale **NAFTAL**, a fait l'objet d'un programme intensif d'extension et de réhabilitation visant à sécuriser l'approvisionnement du pays en produits énergétiques [7].

Parmi les infrastructures les plus représentatives figure le pipeline multi-produit **ASR** (Arzew – Sidi Bel Abbès – Remchi), qui achemine le gasoil et les essences depuis la raffinerie d'Arzew vers les centres de stockage et de distribution de l'Ouest et du Sud-Ouest algérien. Ce type d'infrastructure illustre le rôle stratégique que joue le transport par canalisation dans la sécurité énergétique nationale [8, 9].

1.4 Types de pipelines

Du point de vue de la classification fonctionnelle, on distingue quatre grandes catégories de pipelines [6, 10] :

- **Les pipelines de collecte** : constituant le premier maillon de la chaîne de transport, ces conduites ont un diamètre compris entre 10 et 30 cm. Elles collectent le gaz naturel, le pétrole brut et les liquides de gaz naturel issus des puits de production pour les acheminer vers les premières installations de traitement et de séparation ;
- **Les pipelines d'alimentation** : ces conduites relient les réservoirs de stockage et les centres de traitement aux grands réseaux de transport, en assurant un flux continu et régulier entre les différentes étapes de la filière ;
- **Les pipelines de transport** : dont le diamètre peut largement dépasser un mètre, ils constituent l'épine dorsale du système de transport des hydrocarbures. Opérant sous haute pression grâce à des stations de pompage réparties le long du tracé, ils acheminent le pétrole brut, le gaz naturel et les produits raffinés sur de très longues distances, y compris au-delà des frontières internationales ;
- **Les pipelines de distribution** : dernier maillon de la chaîne, ces conduites de faible diamètre (1 à 15 cm) opèrent à basse pression et assurent la desserte finale en gaz natu-

rel directement auprès des consommateurs domestiques, des entreprises et des petites industries.

1.5 Infrastructure et composants d'un réseau pipeline

Un réseau pipeline est un système industriel complexe qui intègre un ensemble d'équipements et d'infrastructures complémentaires, dont la conception, l'exploitation et la maintenance doivent répondre à des exigences techniques et sécuritaires très strictes [7].

1.5.1 Les conduites et matériaux

Les conduites constituent l'élément central du réseau pipeline. Elles sont fabriquées en acier à haute résistance, dont les spécifications chimiques et mécaniques sont définies par des normes strictes telles que celles de l'**American Petroleum Institute (API)** ou de l'**Association Canadienne de Normalisation (CSA)** [7]. Leur diamètre nominal, exprimé en pouces, varie de 4 à 56 pouces selon la capacité de transport requise. Les tubes, dont la longueur varie généralement de 12 à 24 mètres, sont assemblés bout à bout par soudage et chaque soudure est systématiquement contrôlée par des méthodes non destructives telles que la radiographie aux rayons X et les ultrasons.

Afin de prévenir la corrosion interne et externe, les conduites sont revêtues de matériaux protecteurs, notamment l'époxyde lié par fusion (FBE), et sont soumises à une protection cathodique. Les conduites sont généralement enterrées à une profondeur minimale de **80 cm** et reposent sur un lit de sable ou de gravier pour assurer leur stabilité mécanique [7].

1.5.2 Stations de pompage et de compression

Les stations de pompage, pour les hydrocarbures liquides, et les stations de compression, pour le gaz naturel, constituent les organes moteurs du réseau. Elles sont réparties à intervalles réguliers le long du tracé, généralement tous les **60 à 100 km**, afin de compenser les pertes de charge dues au frottement du fluide sur les parois et à la différence d'altitude du terrain [7]. Ces stations maintiennent la pression interne du réseau à des niveaux pouvant atteindre **70 à 80 bars** pour les liquides. Chaque station est équipée d'instruments de mesure et de dispositifs de commande qui surveillent en permanence la pression d'aspiration et de refoulement, et peuvent déclencher automatiquement l'arrêt des pompes en cas d'anomalie. Ces stations jouent également un rôle essentiel dans la détection précoce des fuites : une chute anormale de pression entre deux stations consécutives constitue le signal d'alerte primaire d'une rupture de canalisation [7].

1.5.3 Vannes et équipements de contrôle

Les vannes sont des équipements indispensables à la sécurité et à la flexibilité d'exploitation d'un réseau pipeline. On distingue principalement [7] :

- Les **vannes de sectionnement** : permettant l'isolation rapide d'un tronçon pour les opérations de maintenance ou en cas d'urgence ;
- Les **clapets anti-retour** : empêchant le reflux du fluide et protégeant les pompes contre les coups de bélier ;
- Les **vannes de régulation** : permettant d'ajuster finement la pression et le débit à des points stratégiques du réseau.

Ces vannes peuvent être manuelles ou automatisées via des actionneurs électromécaniques ou pneumatiques commandés à distance depuis le centre de contrôle via le système SCADA [11].

1.5.4 Systèmes de surveillance (SCADA)

Le système **SCADA** (Supervisory Control and Data Acquisition), traduit en français par «Contrôle de Supervision et Acquisition de Données», constitue le système nerveux central d'un réseau pipeline moderne [11]. Il s'agit d'un système de télégestion à grande échelle qui permet de collecter en temps réel un grand nombre de mesures (pression, débit, température, état des vannes) provenant de capteurs et d'unités terminales distantes (RTU) répartis sur l'ensemble du tracé, et de les centraliser dans une salle de contrôle [12].

Le SCADA permet non seulement la surveillance permanente de l'état du réseau, mais aussi le contrôle à distance des équipements : ouverture et fermeture des vannes, démarrage et arrêt des pompes, ajustement des consignes de pression. En cas d'anomalie, le système génère automatiquement des alarmes et peut déclencher des mesures correctives sans intervention humaine immédiate [11]. Dans le secteur pétrolier et gazier, le SCADA est un outil indispensable pour détecter rapidement les fuites, prévenir les accidents et garantir la conformité réglementaire des opérations [12].

1.5.5 Dépôts et terminaux de stockage

Les dépôts et terminaux de stockage constituent les points d'entrée, de sortie et de régulation du réseau pipeline. Ils remplissent plusieurs fonctions essentielles : réception et stockage temporaire des produits transportés, introduction de nouveaux produits dans le système, et distribution vers les consommateurs finaux [7]. Ces installations comprennent des réservoirs de capacité variable, pouvant aller de quelques milliers à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes, ainsi que des installations de pompage, de comptage, de mesure de qualité et de chargement vers d'autres modes de transport (camions-citernes, wagons, navires). Les

terminaux abritent également les centres de contrôle principaux du réseau, depuis lesquels l'ensemble des opérations est supervisé à distance via le système SCADA [11].

1.6 Le transport multi-produit par pipeline

1.6.1 Le batching

Le **batching** est une technique courante dans le transport d'hydrocarbures par pipeline multi-produit. Elle consiste à transporter différents types de produits pétroliers dans un même pipeline, en les acheminant séquentiellement sous forme de **lots** (ou *batches*), sans séparation physique entre eux [9]. Cette méthode permet d'optimiser l'utilisation du pipeline en transportant plusieurs produits successivement, réduisant ainsi les coûts d'exploitation par rapport à la construction de canalisations dédiées à chaque produit.

Le batching est particulièrement adapté aux produits pétroliers présentant des caractéristiques différentes telles que la densité, la viscosité ou la température, comme c'est le cas pour le gasoil et les essences transportés dans le pipeline ASR [8]. Cependant, cette technique présente un inconvénient majeur : le contact direct entre deux produits différents génère inévitablement une **zone de mélange** à leur interface, connue sous le nom de *contaminât* [8, 9].

1.6.2 Le contaminât ou interface

Lors du transport séquentiel de plusieurs produits pétroliers dans un même pipeline, une **zone de mélange** appelée **contaminât** (ou *interface*) se forme inévitablement à chaque point de contact entre deux lots successifs [8, 9]. Ce mélange résulte de la diffusion turbulente entre les deux fluides en contact lors de leur progression dans la conduite.

Le contaminât ainsi formé ne peut pas être directement injecté dans le réseau de distribution. Selon sa composition, il doit être :

- Soit **retourné en raffinerie** pour être retraité ;
- Soit **stocké temporairement** dans des réservoirs dédiés au niveau du terminal arrivée ;
- Soit **réinjecté à des proportions variables** dans les produits purs, dans les limites des spécifications autorisées [8].

Le volume du contaminât dépend de plusieurs facteurs : le diamètre de la canalisation, la vitesse d'écoulement, la viscosité des produits et la longueur du tronçon parcouru. Dans le cas du pipeline ASR, un niveau trop élevé de contaminât peut entraîner l'**arrêt de l'exploitation** du pipeline, provoquant une baisse de stock au centre de distribution avec la continuité de la demande [8, 9].

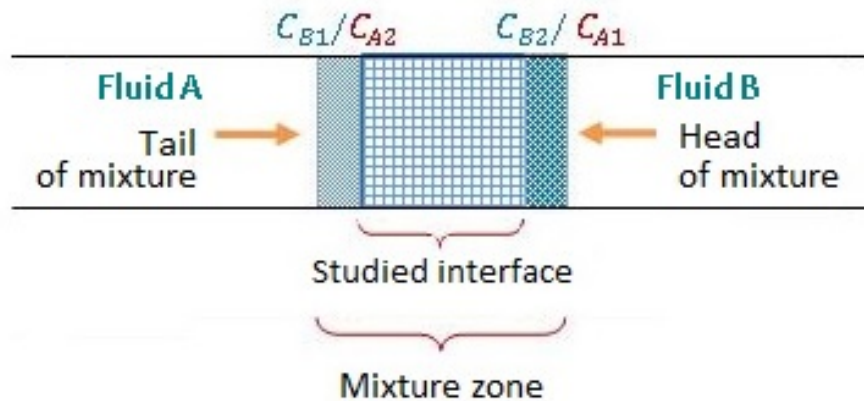


FIG. 1.1 : Représentation schématique de la zone de mélange à l'interface entre deux produits consécutifs dans un pipeline multiproduit

1.6.3 Degré de compatibilité entre produits

Dans un pipeline multi-produit, tous les produits ne peuvent pas être transportés dans n'importe quel ordre. Le **degré de compatibilité** entre deux produits détermine si leur transport séquentiel est possible sans risque de dégradation de la qualité [13]. Deux produits sont dits **compatibles** si le mélange formé à leur interface peut être toléré ou facilement traité. À l'inverse, deux produits **incompatibles** nécessitent une séparation physique ou une séquence de produits intermédiaires. Pour le pipeline ASR, le gasoil et les essences présentent un degré de compatibilité acceptable, permettant leur transport séquentiel avec gestion du contaminant à l'arrivée [9].

1.6.4 Les racleurs (Pigs)

Les **racleurs**, appelés également *pigs* dans la terminologie anglo-saxonne, sont des dispositifs introduits dans le pipeline pour assurer plusieurs fonctions essentielles à la maintenance et à l'exploitation [7] :

- **Nettoyage interne** de la conduite : élimination des dépôts de paraffine, de sédiments et d'eau accumulés ;
- **Séparation physique** entre deux lots de produits dans certains pipelines multi-produits ;
- **Inspection interne** de la conduite : les racleurs instrumentés (*smart pigs*) sont équipés de capteurs permettant de détecter les défauts de paroi, les zones de corrosion et les déformations sans interrompre l'exploitation [7].

1.7 Avantages et inconvénients du transport par pipeline

1.7.1 Avantages du transport par pipeline

Une capacité de transport élevée et un fonctionnement continu

L'un des premiers arguments en faveur du pipeline réside dans sa capacité à transporter de très grandes quantités d'hydrocarbures de manière ininterrompue. Contrairement au transport routier ou ferroviaire, qui fonctionnent par rotations, le pipeline assure un flux continu vingt-quatre heures sur vingt-quatre, sept jours sur sept [1].

Un avantage économique significatif

Sur le plan économique, le transport par pipeline est reconnu comme le mode de transport le plus compétitif pour les longues distances et les grands volumes. Les coûts moyens de transport par tonne pour une distance de 100 km sont les suivants [8] :

- **Pipeline** : 1,8 à 2,1 €/tonne/km ;
- **Transport ferroviaire** : 2,7 €/tonne/km ;
- **Transport fluvial (barge)** : 2,7 à 4,1 €/tonne/km ;
- **Transport routier (camion 38 T)** : 4,1 €/tonne/km.

Une fois l'infrastructure amortie, les coûts d'exploitation demeurent relativement faibles, car il n'y a pas de dépenses récurrentes liées aux conducteurs, au carburant des véhicules ou à l'entretien d'une flotte mobile [1].

Sécurité et fiabilité opérationnelle

Les pipelines, en étant majoritairement enterrés, sont naturellement protégés des conditions météorologiques extrêmes, des accidents de la route et des risques de sabotage. Leur fonctionnement repose sur des infrastructures permanentes équipées de systèmes de contrôle à distance permettant de détecter en temps réel toute anomalie de pression ou de débit [7].

Faible empreinte environnementale

Comparé aux autres modes de transport, le pipeline présente une empreinte environnementale réduite pendant sa phase d'exploitation. Il ne génère pas d'émissions directes de CO₂ liées à une flotte de véhicules, ne produit pas de nuisances sonores, et n'occupe que très peu d'espace au sol, les canalisations étant pour l'essentiel enfouies à environ un mètre de profondeur [4].

Adaptabilité géographique

Le pipeline peut traverser des terrains difficiles d'accès, là où les autres modes de transport ne peuvent pas opérer : montagnes, déserts, fleuves et zones maritimes. En Algérie, les grands pipelines reliant les gisements sahariens aux ports d'exportation du Nord en sont une parfaite illustration [7].

1.7.2 Inconvénients et limites du transport par pipeline

Un investissement initial très élevé

Le principal frein au développement du transport par pipeline reste le coût considérable de sa mise en place. La construction d'une canalisation nécessite des études géotechniques approfondies, des travaux de génie civil importants, l'acquisition de tubes d'acier à haute résistance et l'installation de stations de pompage tout au long du tracé. Ces investissements sont lourds et leur amortissement s'étale sur plusieurs décennies [1].

Une rigidité structurelle

Une fois construit, le tracé d'un pipeline est fixe et difficile à modifier. Contrairement à un camion qui peut changer d'itinéraire selon les besoins, le pipeline ne peut desservir que les points prévus lors de sa conception [1].

La problématique du contaminât dans les pipelines multi-produits

Dans le cas spécifique des pipelines multi-produits, la formation d'un contaminât à l'interface entre deux lots successifs constitue une contrainte technique majeure. Ce mélange doit être analysé en laboratoire et traité selon sa composition, engendrant des coûts supplémentaires et complexifiant la planification logistique [8, 9].

Risques environnementaux en cas de fuite

Malgré les avancées technologiques, le risque de fuite ou de rupture d'un pipeline ne peut jamais être totalement écarté. La corrosion interne et externe, les défauts de soudure, la fatigue des matériaux ou les dommages causés par des tiers figurent parmi les causes les plus fréquentes de défaillance. En cas de rupture, les conséquences environnementales peuvent être sévères : contamination des sols et des nappes phréatiques, pollution des cours d'eau et risques d'incendie ou d'explosion [14].

Dépendance à une demande régulière

La rentabilité d'un pipeline repose sur un volume de transport suffisant et régulier sur la durée. Lorsque la demande chute significativement, les coûts fixes de l'infrastructure restent

inchangés, ce qui dégrade rapidement la rentabilité de l'investissement [1].

1.8 Conclusion

Ce chapitre a posé les bases théoriques nécessaires à la compréhension du transport par pipeline dans l'industrie pétrolière. Les concepts clés du batching, du contaminât et de la compatibilité entre produits, propres aux pipelines multi-produits, ont été introduits. Ces notions constituent le fondement technique de la problématique traitée dans ce mémoire, à savoir l'optimisation du transport des carburants dans le pipeline multi-produit ASR de NAFTAL, qui sera présentée en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Présentation de l'Entreprise NAFTAL et sa Position dans la Chaîne Logistique Pétrolière

2.1 Introduction

La sécurité énergétique de l'Algérie repose sur la fiabilité de sa chaîne logistique pétrolière, au cœur de laquelle se trouve **NAFTAL**, l'entreprise nationale chargée de la distribution des produits pétroliers sur l'ensemble du territoire national. Ce chapitre présente l'entreprise, sa position dans la chaîne logistique, les défis auxquels elle fait face, ainsi que son réseau de transport par pipeline, notamment la canalisation multi-produit **ASR**, cas d'application de notre étude.

2.2 Présentation Générale de NAFTAL

2.2.1 Historique et évolution de NAFTAL

La Société Nationale de Commercialisation et de Distribution des Produits Pétroliers, connue sous le sigle **NAFTAL**, trouve son origine dans la restructuration du secteur pétrolier algérien initiée au début des années 1980. Issue de **SONATRACH**, l'entreprise **ERDP** (Entreprise Nationale de Raffinage et de Distribution des Produits Pétroliers) a été créée par le décret n° 80/101 du 06 avril 1980, marquant le transfert du monopole et des actifs précédemment détenus par SONATRACH [15]. Opérationnelle dès le 1^{er} janvier 1982, elle se voit confier à la fois le raffinage des hydrocarbures et la distribution des produits raffinés sur le marché algérien [8].

Le 5 février 1983, par le décret n° 83-112, l'ERDP change de dénomination pour devenir **NAFTAL**. Puis, le 25 août 1987, par le décret n° 87-190, l'activité raffinage est séparée de l'activité distribution et transférée à une nouvelle entité, **NAFTEC**. Depuis lors, **NAFTAL** est exclusivement chargée de la commercialisation et de la distribution des produits pétroliers et dérivés sur le marché national [15].

L'entreprise a ensuite connu plusieurs étapes importantes dans son évolution :

- **18 avril 1998** : transformation en Société par Actions (SPA) au capital social de 6,65 milliards de DA, filiale à 100 % du holding Sonatrach Valorisation des Hydrocarbures (SVH) ;
- **29 juillet 2002** : augmentation du capital social à 15,65 milliards de DA ;
- **25 novembre 2014** : inauguration de la première station de Gaz Naturel Comprimé (GNC) en Algérie, dans la commune de Rouiba ;
- **Capital actuel : 160 milliards de DA** [15, 16].

2.2.2 Statut juridique et organisation interne

Aujourd'hui, NAFTAL est une **Société par Actions (SPA)** au capital social de **160 milliards de DA**, filiale à 100 % du Groupe SONATRACH, rattachée à l'activité commercialisation [16]. Son organisation interne est structurée par **lignes de produits** :

- **Branche Carburants** : gestion des dépôts, centres de stockage et distribution des carburants terrestres ;
- **Branche GPL** : enfûtage et distribution du gaz de pétrole liquéfié à travers 19 districts nationaux ;
- **Branche Aviation et Marine** : ravitaillement des aéroports et ports ;
- **Branche Lubrifiants et Pneumatiques** : fabrication et commercialisation ;
- **Branche Bitumes** : formulation et distribution [16, 17].

Sur le plan opérationnel, NAFTAL dispose d'une infrastructure logistique nationale comprenant **49 centres et dépôts** de carburants, **41 centres d'emplissage GPL**, **26 centres aviation**, **6 centres marine**, **15 unités bitumes** et **22 centres lubrifiants**, couvrant **1 952 stations-service** et **7 925 points de vente GPL** à travers les 58 wilayas [18]. L'entreprise dispose également de deux **centres de formation** : le Centre de Formation de Khroub (CFK) et le Centre de Formation d'Oran (CFO) [16].

NAFTAL constitue le premier distributeur de produits pétroliers en Algérie, contribuant à hauteur de **51 %** de l'énergie finale consommée sur le marché national, avec un volume atteignant désormais **13,3 millions de tonnes** par an [16, 18].

2.2.3 Les acteurs de la chaîne logistique pétrolière en Algérie

La chaîne logistique pétrolière algérienne est structurée en trois segments complémentaires et interdépendants :

Amont — Extraction et production (SONATRACH)

Le segment amont est dominé par **SONATRACH** (Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures), entreprise publique fondée en 1963. SONATRACH est chargée de l'exploration, du forage et de la production des hydrocarbures bruts, notamment dans les bassins sahariens de Hassi Messaoud et Hassi R'Mel. Elle assure la production des matières premières qui alimentent les raffineries nationales [19, 20].

Midstream — Transport et stockage

Le segment intermédiaire regroupe les activités de transport par canalisation, de stockage primaire et de raffinage, assurées principalement par [8, 9] :

- **SONATRACH Transport** : opérateur du réseau national de gazoducs et d'oléoducs reliant les bassins de production aux raffineries ;
- **NAFTEC** : créée en 1987, assure le raffinage des hydrocarbures bruts dans les raffineries d'Alger, d'Arzew et de Skikda ;
- **NAFTAL Branche Canalisations** : opère un réseau de **730 km de canalisations** pour le transport des produits finis depuis les raffineries vers les centres de stockage et de distribution.

Aval — Raffinage, distribution et commercialisation (NAFTAL)

Le segment aval est assuré exclusivement par **NAFTAL**, qui réceptionne les produits finis issus des raffineries et les achemine vers les consommateurs finals à travers un réseau multimodal combinant pipelines, transport routier, ferroviaire et maritime. NAFTAL assure la distribution des carburants terrestres (essences, gasoil, GPL/C), des carburants aviation et marine, des lubrifiants et des bitumes sur l'ensemble du territoire national [16, 18].

2.3 La Position de NAFTAL dans la Chaîne Logistique Pétrolière

2.3.1 Rôle de NAFTAL en tant que maillon aval

Dans la structuration de la chaîne logistique pétrolière algérienne, NAFTAL se positionne comme l'acteur central du segment aval. Elle est exclusivement chargée de la commercialisation et de la distribution des produits pétroliers et dérivés sur le marché national. Sa mission principale couvre les domaines suivants :

- L'enfûtage des GPL ;

- La formulation des bitumes ;
- La distribution, le stockage et la commercialisation des **carburants, GPL, lubrifiants, bitumes, pneumatiques et produits spéciaux** ;
- Le transport des produits pétroliers [16].

À l'ère de la mondialisation, NAFTAL a mis en place une organisation par **ligne de produit** lui permettant d'optimiser chaque filière et d'assurer une couverture territoriale étendue à l'ensemble des wilayas [16].

2.3.2 Relation de NAFTAL avec SONATRACH

NAFTAL entretient avec SONATRACH une relation organique et structurelle fondamentale. Filiale à 100 % du Groupe SONATRACH, elle est rattachée au holding Sonatrach Valorisation des Hydrocarbures (SVH) depuis sa transformation en SPA le 18 avril 1998 [15]. D'un point de vue opérationnel, NAFTAL s'approvisionne en produits finis auprès des raffineries du groupe SONATRACH, tandis que SONATRACH assure la production, l'exploration et le raffinage. Cette complémentarité constitue le socle de la sécurité d'approvisionnement énergétique en Algérie [16].

2.3.3 Relation de NAFTAL avec les raffineries

Les raffineries constituent pour NAFTAL la principale source d'approvisionnement en produits pétroliers finis. Le raffinage est assuré par NAFTEC ainsi que par les complexes du groupe SONATRACH. Les principales sources d'approvisionnement sont :

- Raffinerie d'Alger ;
- Raffinerie d'Arzew ;
- Raffinerie de Skikda ;
- Raffineries de Tiaret, Hassi Messaoud et Biskra [19].

2.3.4 Gestion des approvisionnements et des stocks

La gestion des approvisionnements représente l'un des défis majeurs de NAFTAL, compte tenu de la superficie du territoire algérien et de la nécessité de garantir une disponibilité permanente des produits sur l'ensemble des 58 wilayas. L'entreprise s'appuie sur une infrastructure logistique étendue comprenant :

- **49 centres** de stockage de carburants ;
- **41 centres d'emplissage GPL** d'une capacité d'enfûtage de 1,2 million de tonnes par an ;

- **26 centres** aviation et **6 centres** marine ;
- **22 centres** lubrifiants et pneumatiques [18].

2.3.5 Le réseau de transport et de distribution de NAFTAL

NAFTAL utilise un réseau multimodal combinant pipelines, transport routier, ferroviaire et maritime [16].

Transport par pipeline

Le transport par canalisation est le mode le plus économique et le plus sûr pour l'acheminement massif des produits pétroliers. NAFTAL dispose d'un réseau de 700 km de canalisations [21].

Transport routier

NAFTAL dispose d'un parc propre de **3 000 véhicules de distribution** complété par des transporteurs privés sous contrat, qui assurent plus de **47 %** du transport des GPL et environ **30 %** pour les carburants [19, 18].

Transport ferroviaire

Le transport ferroviaire est assuré en partenariat avec la **SNTF** via la Société de Transport des Produits Énergétiques (**STPE**), créée le 21 décembre 1999 [15].

2.4 Les Défis Logistiques de NAFTAL

2.4.1 Gestion de la demande et des fluctuations

La consommation de produits pétroliers en Algérie connaît une croissance structurelle soutenue, particulièrement dans les régions du Sud et du Grand-Sud. Les wilayas de Bordj Badji Mokhtar, Tamanrasset, Illizi, Tindouf et In Guezzam ont enregistré une hausse record de **36 %** de leur consommation de carburant [22, 23]. Les fluctuations saisonnières et les perturbations météorologiques constituent également des sources de déséquilibre, comme en témoignent les perturbations du GPL/C enregistrées en février 2026 [24]. Pour y faire face, NAFTAL s'appuie sur **19 districts GPL** à l'échelle nationale pour une meilleure planification des stocks [17].

2.4.2 Optimisation des coûts de distribution

La dépendance aux transporteurs privés expose NAFTAL à des risques de rupture de service, comme en témoigne la grève des transporteurs de janvier 2026 [25]. Pour réduire cette

dépendance et optimiser les coûts, NAFTAL a engagé plusieurs actions :

- Le renforcement du réseau de **pipelines** avec des projets d'extension totalisant plusieurs centaines de kilomètres [26];
- L'acquisition de **400 tracteurs routiers** Mercedes-Benz apportant une capacité supplémentaire de **15 000 m³** [27];
- L'extension du dépôt du Caroubier de 86 000 à 200 000 m³ [28].

2.4.3 Sécurité et conformité réglementaire

Le cadre réglementaire algérien est défini par la **loi n° 05-07 du 28 avril 2005** relative aux hydrocarbures, modifiée par la **loi n° 19-13 du 11 décembre 2019** [20]. La surveillance est assurée par l'**ARH**, qui veille au respect des normes de sécurité industrielle et de qualité des produits [29]. Le gasoil commercialisé par NAFTAL doit notamment respecter une teneur en soufre ne dépassant pas **400 parties par million** [30].

2.4.4 Modernisation et digitalisation de la chaîne logistique

NAFTAL s'est engagée dans un processus de modernisation portant sur le renouvellement du parc roulant, l'extension des infrastructures de stockage, le développement du réseau de pipelines et la mise en conformité des installations avec les normes environnementales [27, 29, 31, 28].

2.5 Le Transport par Pipeline au sein de NAFTAL

2.5.1 Infrastructure actuelle du réseau de pipelines

Le réseau de canalisations de NAFTAL s'étend sur 700 km [21]. :

- La canalisation **ASR** (Arzew – Sidi Bel Abbès – Remchi) : pipeline multi-produit desservant les régions Ouest et Sud-Ouest de l'Algérie [8, 9];
- La canalisation **Skikda – El Eulma – Alger** : dont la première tranche est achevée [26];
- La canalisation **Arzew – Alger** pour le GPL, d'une longueur estimée à **450 km** [26].

La capacité de stockage totale de la branche carburants atteint **882 300 m³** [17].

2.5.2 Présentation de la canalisation Multi-produit ASR

La canalisation **ASR** (Arzew – Sidi Bel Abbès – Remchi) est un pipeline multi-produit reliant la **Raffinerie d'Arzew** aux centres de stockage de **Sidi Bel Abbès** et **Remchi**, transportant

séquentiellement le **Gasoil** et les **Essences** vers les régions Ouest et Sud-Ouest de l'Algérie [9, 8].

Elle est composée de **trois tronçons** aux caractéristiques distinctes [8] :

- **Tronçon 1** : Ø **12 pouces**, épaisseur **9,52 mm**, de la Raffinerie d'Arzew à Sidi Bel Abbès sur environ **85 km** ;
- **Tronçon 2** : Ø **10 pouces**, épaisseur **6,35 mm**, de Sidi Bel Abbès à Sidi Abdelli sur environ **56 km** ;
- **Tronçon 3** : Ø **8 pouces**, épaisseur **6,40 mm**, de Sidi Abdelli à Remchi sur environ **27 km**.

La longueur totale de la canalisation ASR est donc d'environ **168 km** [9]. Son fonctionnement repose sur la technique du **batching**, qui consiste à transporter séquentiellement plusieurs produits dans un même pipeline sans séparation physique, générant une **zone de mélange** ou *contaminât* à chaque interface entre deux produits [8]. Le contaminât est stocké dans des réservoirs dédiés au terminal arrivée de Remchi.

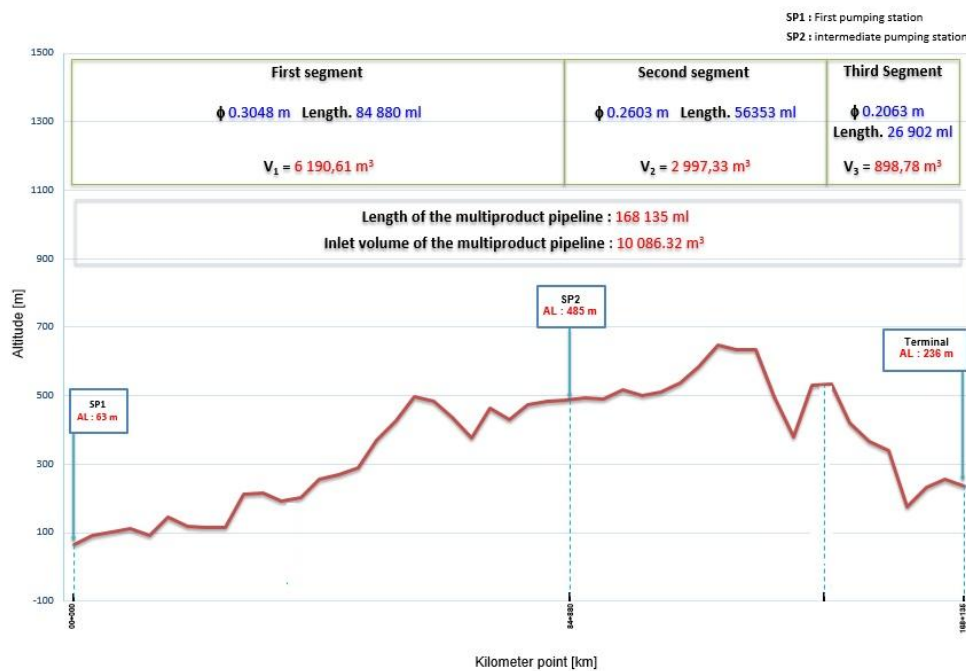


FIG. 2.1 : Profil altimétrique longitudinal du pipeline multiproduit ASR (longueur totale : 168 135 m, volume d'entrée : 10 086,32 m³)

2.5.3 Problème d'optimisation de transport des carburants par pipeline multi-produit

Le pipeline multi-produit présente plusieurs contraintes opérationnelles affectant son efficacité [8] :

- **La formation du contaminât** : un niveau trop élevé de contaminât entraîne l'arrêt de l'exploitation du pipeline, provoquant une baisse de stock au centre de distribution ;
- **La gestion de la demande** : la réception d'un carburant spécifique n'intervient qu'après l'éjection des quantités qui le précèdent dans la séquence, pouvant créer des pénuries temporaires ;
- **La planification des séquences de pompage** : déterminer les séquences optimales visant à minimiser le contaminât tout en garantissant une autonomie de stockage minimale dans les centres de distribution [9].

La méthode retenue pour résoudre ce problème est la **Programmation Linéaire en Nombres Entiers Mixtes (MILP)**, résolue à l'aide du solveur **CPLEX**. Les séquences optimisées obtenues ont réduit significativement le stock de contaminât et garanti un objectif de stock des carburants fixé à **20 %** du volume total [8, 9].

2.5.4 Projets d'extension et perspectives

NAFTAL a engagé deux projets d'extension majeurs :

- Le pipeline **Skikda – El Eulma – Alger** : première tranche achevée, alimentant en carburants et GPL plusieurs wilayas du tracé [26] ;
- Le pipeline **Arzew – Alger** pour le GPL, sur **450 km** passant par Blida, Aïn Defla et Chlef [26].

Ces projets visent à réduire les coûts de transport et sécuriser l'acheminement des produits vers toutes les régions [26].

2.5.5 Importance stratégique du pipeline dans la chaîne logistique

Le transport par pipeline présente des avantages stratégiques multiples [9, 18] :

- **Économique** : coût de transport nettement inférieur aux autres modes ;
- **Sécuritaire** : conçu pour résister aux hautes pressions, surveillé en permanence ;
- **Écologique** : empreinte carbone réduite par rapport au transport routier ou ferroviaire ;
- **Capacité** : transport continu de grands volumes sur de longues distances ;
- **Stratégique** : en son absence, des milliers de camions citernes supplémentaires seraient nécessaires, engendrant saturation des axes routiers et risques d'accidents [9].

2.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de situer NAFTAL dans son contexte institutionnel et opérationnel, et de comprendre l'importance stratégique du transport par pipeline dans son activité. La canalisation ASR, avec ses contraintes liées au contaminât et à la planification des séquences de pompage, constitue le cadre concret de notre problème d'optimisation, qui sera approfondi dans les chapitres suivants.

Chapitre 3

État de l'Art et Approches de Résolution

3.1 Introduction

La planification et l'optimisation du transport de carburant dans les pipelines multiproduits constituent un problème combinatoire complexe, classé NP-difficile, qui a suscité un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique depuis les années 1990. L'objectif fondamental est de déterminer la séquence optimale des injections de lots de produits pétroliers (essence, gazole, kérosène, GPL, etc.) à la raffinerie, ainsi que les calendriers de livraison aux dépôts, tout en minimisant les coûts opérationnels de pompage, retraitement des interfaces de contamination, gestion des stocks, et en satisfaisant les demandes des clients dans les délais impartis.

La littérature sur ce sujet peut être classée selon trois grands axes méthodologiques : **(i)** les approches de programmation mathématique exacte (MILP, MINLP), **(ii)** les approches méta-heuristiques et hybrides (matheuristique, algorithmes évolutionnaires), et **(iii)** les approches basées sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique. Ce chapitre présente une synthèse critique des principaux travaux de la littérature, classés selon ces trois catégories, en évaluant systématiquement leur pertinence par rapport au contexte ASR/NAFTAL.

3.2 Approches de Programmation Mathématique Exacte (MILP / MINLP)

Les méthodes de programmation linéaire et non-linéaire en nombres entiers mixtes (MILP/MINLP) constituent l'approche la plus largement utilisée dans la littérature pour modéliser et résoudre le problème d'ordonnancement des pipelines multiproduits. Elles garantissent l'optimalité ou une borne de qualité de solution, et peuvent être subdivisées en deux grandes familles selon la représentation temporelle adoptée : les formulations à **temps discret** et les formulations à **temps continu**.

3.2.1 Formulations MILP à temps discret

Approches pionnières. HANE et RATLIFF [32] ont introduit la première approche discrète MILP pour le séquençement dans les pipelines multiproduits, en divisant le problème en sous-problèmes gérables résolus par la méthode de *branch and bound*. Ce travail fondateur, bien que limité à des topologies simples, démontre la faisabilité des méthodes exactes et établit les bases théoriques sur lesquelles s'appuient tous les travaux ultérieurs. La preuve de la NP-complétude du problème général de séquençage, formalisée ultérieurement par MILIDIU [33] via son modèle S-PPI, confirme l'intérêt des approches par décomposition pour des instances de taille réaliste telles que le pipeline ASR.

Rejowski et Pinto (2003). REJOWSKI et PINTO [34] ont proposé les premiers modèles MILP à temps discret complets pour la planification d'un pipeline multiproduits unidirectionnel reliant une raffinerie à plusieurs dépôts de distribution. Le système étudié est le pipeline brésilien OSBRA (955 km, cinq dépôts, quatre produits : essence, diesel, GPL et kérosène). L'horizon de planification est divisé en intervalles de temps fixes, et le pipeline est discrétisé en segments subdivisés en *packs* de taille fixe ne contenant qu'un seul produit par intervalle. Deux variantes ont été formulées : le modèle M1 suppose des packs de capacité volumique égale, tandis que le modèle M2 autorise des tailles différentes, permettant de traiter des systèmes réels plus complexes. Résolu avec CPLEX sous GAMS, le modèle M2 produit une solution à moins de 6 % d'écart par rapport à l'optimum pour un horizon de 75 heures, avec un temps de calcul de 10 000 secondes. Cet article constitue **la référence fondatrice incontournable** de la littérature MILP pour les pipelines multiproduits, et sert de base de comparaison à tous les travaux subséquents, y compris notre étude sur le pipeline ASR.

MirHassani et Ghorbanalizadeh (2008). MIRHASSANI et GHORBANALIZADEH [35] ont étendu le formalisme MILP aux topologies ramifiées (pipeline en Y), en introduisant le concept de *chemin actif* (*active path*). Cette notion est directement applicable à la bifurcation du pipeline ASR vers les centres de Sidi Bel Abbès et Remchi. Pour un cas réel comportant plus de 10 500 variables et 16 000 contraintes, une décomposition temporelle en trois parties a été nécessaire pour obtenir une solution en environ 3 072 secondes, démontrant la faisabilité des méthodes exactes pour des réseaux ramifiés de taille comparable au pipeline ASR.

Baghban et Yousefikhoshbakht (2022). BAGHBAN et YOUSEFIKHOSHBAKHT [36] proposent un modèle MILP à temps discret pour l'ordonnancement à court terme de pipelines multiproduits comportant plusieurs raffineries et plusieurs centres de distribution. Contrairement à la majorité des travaux antérieurs, leur approche discrétise l'horizon de planification en intervalles fixes, permettant de résoudre chaque instance en une seule itération sans procédure itérative. La validation sur deux exemples *benchmarks* montre des réductions des coûts opérationnels de **0,8 %** et **1,5 %** par rapport aux modèles à temps continu de référence.

Wodecki et al. (2023). WODECKI et al. [37] ont proposé une formulation MILP discrétisée modélisant le transport comme un problème de *bin-packing* à une dimension, avec un pas temporel de 1 heure, développée en collaboration avec l'opérateur national tchèque CEPRO. La formulation intègre des contraintes réelles : gestion des séquences interdites via un produit de rinçage (*flushing*), exclusions mutuelles entre régimes de pompage, suivi des niveaux de stockage et gestion des pannes. Implémentée dans SCIP et Gurobi, elle résout des instances jusqu'à 12 nœuds sur un horizon de 31 jours en moins de 1 000 secondes.

3.2.2 Formulations MILP à temps continu

Cafaro et Cerdá (2004). CAFARO et CERDÁ [38] ont proposé la première formulation MILP à **temps continu** pour la planification optimale d'un pipeline multiproduits unidirectionnel. Le modèle raisonne en termes de *slugs* (bouchons de produit), des variables continues permettant un suivi précis de chaque lot dans le pipeline. Testée sur les mêmes cas que REJOWSKI et PINTO [34], cette approche produit de meilleures solutions avec un temps de calcul réduit de **trois ordres de grandeur** (moins de 35 secondes contre 10 000 secondes). **La représentation à temps continu adoptée dans notre modèle MILP pour le pipeline ASR s'inspire directement de cette approche**, justifiée par sa supériorité démontrée en termes de qualité de solution et d'efficacité computationnelle.

Relvas et al. (2006). RELVAS et al. [39] ont modélisé le système de la compagnie portugaise CLC (pipeline de 147 km, une raffinerie, six produits pétroliers, un dépôt terminal). L'innovation majeure est l'intégration d'une *période de décantation* obligatoire après l'arrivée de chaque lot, traduisant une contrainte physique réelle d'exploitation. Le modèle démontre une utilisation du pipeline supérieure à **96 %**, contre 91,4 % pour le plan manuel, soit un gain de 4,6 points. Ces contraintes opérationnelles de décantation et la structure pipeline unique–dépôt unique sont directement transposables au segment ARZ–SBA du pipeline ASR.

Relvas et al. (2007). RELVAS et al. [40] ont étendu leur travail en modélisant la *replanification dynamique* (*rescheduling*). Six types d'événements perturbateurs ont été identifiés et formalisés : ajustements de demande en cours d'exploitation, arrêts imprévus du pipeline, modifications de volumes programmés, pannes d'équipements, arrivées anticipées ou retardées de lots, et modifications des priorités de livraison. Appliqué à quatre révisions successives du planning mensuel réel de CLC, le modèle démontre sa robustesse pour la gestion en temps réel. Cette capacité de replanification est particulièrement pertinente pour le pipeline ASR, soumis à des contraintes opérationnelles variables liées à la demande saisonnière.

Cafaro et Cerdá (2008). CAFARO et CERDÁ [41] ont développé un modèle MILP de planification sur horizon mensuel, permettant de déterminer simultanément la séquence et les tailles optimales des lots en synchronisation avec les dépôts de distribution, pour répondre

aux demandes quotidiennes variables. L'horizon de planification couvre un mois complet avec des révisions hebdomadaires. Cette approche mensuelle est directement applicable à la planification opérationnelle du pipeline ASR sur une décade ou un mois calendaire.

MirHassani, Abbasi et Moradi (2013). MIRHASSANI, ABBASI et MORADI [42] proposent une formulation MILP en temps continu intégrant des **dépôts à double fonction** (*dual purpose depots*), c'est-à-dire des nœuds intermédiaires capables à la fois d'injecter des produits dans le pipeline et d'en recevoir. Cette approche réduit de **35 %** le nombre de variables binaires par rapport aux travaux de référence, tout en améliorant la précision du calcul des coûts d'interface.

Herrán et al. (2011). HERRÁN, DE LA CRUZ et DE ANDRÉS [43] proposent un modèle MINLP multi-périodes intégrant conjointement la planification de la production à la raffinerie et le transport dans le pipeline. Après linéarisation via des substitutions de variables et résolution par CPLEX, les résultats montrent une réduction significative du recours aux heures de pointe électriques, illustrant les bénéfices d'une coordination explicite entre l'unité de production et l'infrastructure de transport. Cette perspective d'intégration est pertinente pour la coordination entre la raffinerie d'Arzew et le pipeline ASR dans le contexte NAFTAL.

Ghaffari-Hadigheh et Mostafaei (2015). MOSTAFAEI et GHAFFARI-HADIGHEH [44] proposent une formulation MILP en temps continu à **niveau unique** permettant des **livraisons simultanées** à plusieurs terminaux. Contrairement aux approches antérieures à deux étapes hiérarchiques séquentielles, le modèle détermine conjointement et en une seule étape le plan optimal d'injection et de livraison. Les expérimentations démontrent une réduction de **15,83 %** du coût total et de **23,14 %** du temps d'exécution par rapport au mode de livraison non simultanée. **Il constitue la référence structurellement la plus proche du cas ASR** en termes de configuration réseau (une source principale vers plusieurs dépôts terminaux).

Abdellaoui et al. (2021). ABDELLAOUI et al. [45] ont proposé un modèle MILP en représentation continue appliqué à un cas réel algérien : un pipeline unidirectionnel de 166 km reliant la raffinerie d'Arzew à deux centres de distribution, transportant quatre produits pétroliers. Le modèle, comportant 11 250 contraintes et 518 variables binaires, génère une séquence optimale de 17 lots sur un horizon d'un mois (672 heures) en **3,76 minutes** de temps de calcul sous CPLEX. **Ce travail est directement lié à notre contexte d'étude NAFTAL/ASR** : même opérateur (NAFTAL), même raffinerie d'origine (Arzew), même structure réseau (1 raffinerie, 2 centres), et longueur comparable (166 km vs 168 km pour le pipeline ASR). Il valide la pertinence et la faisabilité de l'approche MILP continue pour les pipelines algériens de taille comparable au pipeline ASR.

3.3 Approches Métaheuristiques et Hybrides

Face à la complexité combinatoire élevée des modèles MILP/MINLP, plusieurs auteurs ont développé des approches alternatives combinant des heuristiques et des méthodes exactes pour obtenir des solutions de bonne qualité en des temps de calcul raisonnables. La présentation de ces travaux vise également à justifier le choix du MILP comme approche privilégiée pour le pipeline ASR.

Moura et al. (2010). MOURA, BECCENERI et YANASSE [46] proposent un modèle **hybride** combinant la programmation mathématique (MILP) et des techniques heuristiques pour surmonter les limites des modèles classiques face aux cas industriels à grande échelle. Le problème est décomposé en deux niveaux : une phase de planification globale (détermination des quantités à transporter et des affectations) suivie d'une phase d'ordonnancement détaillé (définition de la séquence des lots). Cette décomposition permet de trouver un bon compromis entre qualité de solution et efficacité computationnelle.

Meira et al. (2018). MEIRA et al. [47] proposent une **matheuristique de décomposition** pour l'ordonnancement à long terme d'un système de pipeline multiproduit. La méthode combine des procédures heuristiques et des modèles MILP selon une stratégie hiérarchique en deux niveaux : **(1)** un modèle d'affectation et de séquençement des batches (ASM), et **(2)** un modèle de segmentation (SM) planifiant en détail les opérations de livraison en tenant compte du contrôle rigoureux des stocks, des limites de débit et des périodes de maintenance. Validée sur un réseau réel portugais, la méthode fournit des solutions opérationnellement réalisables en un temps de calcul raisonnable.

Éles et Heckl (2025). ÉLES et HECKL [48] proposent une approche de **Simulation à Événements Discrets** (DES) couplée à un **recuit simulé** (*Simulated Annealing*) pour des topologies en réseau maillé avec flux bidirectionnels. Le simulateur DES atteint entre 3 000 et 105 000 simulations par seconde. Tous les cas tests (4 à 6 sites, 5 à 7 produits, horizons de 2 à 28 jours) ont été résolus à la faisabilité en moins de **100 secondes**.

La présentation de ces travaux illustre les approches alternatives au MILP disponibles dans la littérature. **Dans le cadre de notre étude sur le pipeline ASR, le recours au MILP est justifié par trois arguments complémentaires :**

1. La taille raisonnable du problème (2 produits, 2 centres de distribution, horizon de 10 jours subdivisé en 120 périodes de 2 h) reste dans le domaine de résolvabilité des solveurs MILP exacts comme CPLEX;
2. La nécessité de **garantir l'optimalité** des séquences de pompage est un impératif opérationnel dans le contexte NAFTAL, où les coûts de retraitement des interfaces de

contamination sont significatifs ;

3. La disponibilité du solveur CPLEX et sa validation sur des cas analogues (notamment ABDELLAOUI et al. [45]) offrent un cadre de résolution éprouvé et comparable.

3.4 Approches basées sur l'Intelligence Artificielle et l'Apprentissage Automatique

L'essor de l'intelligence artificielle et des méthodes d'apprentissage automatique a ouvert de nouvelles perspectives pour la résolution des problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits, notamment en ce qui concerne la réduction des temps de calcul et la capacité à apprendre à partir des données historiques.

Zhang et al. (2018). ZHANG et al. [49] proposent une approche originale d'**auto-apprentissage** (*self-learning*) pour l'ordonnancement détaillé des pipelines multiproduits. Les auteurs décomposent le problème en deux sous-problèmes : **(1)** un problème de séquençement des nœuds temporels, et **(2)** un modèle MILP à temps continu dont la séquence des nœuds est supposée connue. L'approche hybride combine l'**analyse par clustering flou** (*fuzzy clustering analysis*) pour identifier, à partir d'une base de données historique, la solution initiale la plus proche du cas à résoudre, et l'**algorithme de colonie de fourmis** (ACO — *Ant Colony Optimization*) pour optimiser la séquence des nœuds temporels. Le caractère auto-apprenant repose sur l'alimentation continue de la base de données par les nouveaux cas résolus, améliorant progressivement la qualité des solutions et réduisant les temps de calcul. Testée sur six cas réels d'un pipeline chinois de 375,5 km transportant du diesel et deux grades d'essence, la méthode surpasse les approches ACO classiques en vitesse de convergence vers l'optimum global.

3.5 Approches d'Optimisation du Tracé et de la Conception des Pipelines

Au-delà de l'ordonnancement opérationnel, certains travaux s'intéressent à la phase de conception et d'optimisation du tracé géographique des infrastructures de pipeline.

Dbouk, Hayek et Ghorayeb (2021). DBOUK, HAYEK et GHORAYEB [50] abordent le problème de l'optimisation du **tracé géographique** des réseaux de pipelines pétroliers lors de la phase de conception, en introduisant l'**algorithme de plus court chemin A*** dans ce domaine applicatif. La carte topographique est transformée en un graphe de coûts pondérés, où chaque nœud représente une cellule de la grille, intégrant la longueur du tracé, les variations

d'altitude et les coûts d'acquisition foncière. La comparaison avec l'algorithme de Dijkstra et l'algorithme glouton sur 100 scénarios générés aléatoirement confirme la supériorité de A^* en termes d'optimalité et d'efficacité computationnelle, avec une réduction moyenne de 12 % des coûts de tracé par rapport à Dijkstra. Cette approche fournit une perspective complémentaire à la planification opérationnelle du pipeline ASR, pertinente dans le cadre de l'extension proposée vers le hub de Naâma dans le mémoire de master associé.

3.6 Synthèse et Revues Bibliométriques

Acosta-Amado (2024). ACOSTA-AMADO [51] a publié une revue systématique et bibliométrique complète sur l'optimisation de la distribution des produits pétroliers raffinés via les pipelines multiproduits, couvrant 130 documents publiés entre 2015 et 2024. L'analyse révèle que plus de 90 % des travaux publiés dans ce domaine proviennent du Génie Chimique et de la Recherche Opérationnelle, avec une domination des approches MILP en temps discret et continu. Les trois fonctions objectif les plus fréquentes — minimisation des coûts énergétiques de pompage, des coûts de gestion des stocks et des coûts de retraitement des interfaces — couvrent à elles seules environ 80 % de la littérature. L'auteur identifie plusieurs axes de recherche futurs encore peu explorés : la modélisation stochastique de la demande, le développement de procédures de décomposition mathématique exacte (Benders, relaxation lagrangienne), et l'extension vers des topologies complexes à flux bidirectionnel.

Sidki et al. (2025). SIDKI et al. [52] ont conduit une analyse bibliométrique exhaustive et une revue systématique couvrant les travaux publiés entre 2000 et 2023, soit 99 références analysées à partir de trois bases de données bibliographiques (Scopus, Web of Science, Google Scholar). L'étude offre une cartographie complète de l'évolution du domaine : auteurs et pays les plus productifs, revues les plus citées, thèmes émergents. Un cadre de recherche détaillé classe la littérature selon huit critères : secteur industriel, topologie du réseau, précision de l'ordonnancement, certitude des paramètres, contraintes opérationnelles, représentations temporelle et volumique, stratégies de résolution et fonctions objectif. Les axes de recherche futurs identifiés incluent la robustesse face à l'incertitude de la demande, les topologies à flux bidirectionnel et les approches hybrides MILP + apprentissage automatique. **Ce travail constitue la revue bibliométrique la plus complète et la plus récente du domaine,** et positionne directement notre étude sur le pipeline ASR dans les tendances actuelles de la recherche.

3.7 Tableau Comparatif des Travaux

Le tableau 3.1 présente une synthèse comparative des principaux travaux recensés dans ce chapitre, avec indication de leur pertinence directe pour le cas ASR/NAFTAL.

TAB. 3.1 : Synthèse comparative des principaux travaux de la littérature.

Auteur(s) / Année	Approche	Topologie	Contribution principale	Pertinence pour ASR
Références fondatrices MILP				
HANE et RATLIFF [32]	MILP discret	1 source, multi-dépôts	Première approche discrète, <i>branch & bound</i> , décomposition en sous-problèmes gérables. Preuve de faisabilité des méthodes exactes.	Fondement des méthodes exactes appliquées à ASR.
MILIDIU [33]	Modèle théorique	1 source, 1 destination	Modèle S-PPI, pipeline rectiligne multi-produit, preuve de NP-complétude du problème de séquençage.	Justifie le recours aux méthodes exactes pour garantir l'optimalité sur ASR.
REJOWSKI et PINTO [34]	MILP discret	1 source, multi-dépôts	Premier MILP discret complet. Pipeline OSBRA (Brésil, 955 km). Modèles M1/M2. Résolu CPLEX/GAMS en 10 000 s, écart < 6 %.	Référence méthodologique MILP fondatrice pour le pipeline ASR.
CAFARO et CERDÁ [38]	MILP continu	1 source, multi-dépôts	Premier MILP continu. Formulation en slugs. Gain de 10^3 en temps de calcul vs. REJOWSKI et PINTO [34].	Justifie la représentation continue adoptée pour le modèle ASR.
MIRHASSANI et GHORBANALIZADEH [35]	MIP discret	Pipeline ramifié (Y)	Concept de chemin actif. Gestion des topologies en embranchement. Décomposition temporelle.	Gestion de la bifurcation ASR → SBA / Remchi.
MOSTAFAEI et GHAFFARI-HADIGHEH [44]	MILP continu	1 source, multi-dépôts	Livraisons simultanées, long terme. Réduction coût 15,83 %.	Structure réseau la plus proche du pipeline ASR (1 source → 5 dépôts).

(suite page suivante)

(suite du tableau 3.1)

Auteur(s) / Année	Approche	Topologie	Contribution principale	Pertinence pour ASR
ABDELLAOUI et al. [45]	MILP continu	Cas algérien (166 km)	Cas réel NAFTAL. 4 produits, 2 centres. 11 250 contraintes. Résolu en 3,76 min.	Cas directement analogue au pipeline ASR (même opérateur, même raffinerie).
MILP continu — aspects opérationnels				
RELVAS et al. [39]	MILP continu	1 source, 1 dépôt	Période de décantation obligatoire. Utilisation pipeline > 96 %. Cas réel CLC Portugal (147 km).	Contraintes opérationnelles de décantation applicables à ASR.
RELVAS et al. [40]	MILP continu	1 source, 1 dépôt	Replanification dynamique. 6 types d'événements perturbateurs. Robustesse en temps réel.	Gestion des interruptions et de la variabilité opérationnelle du pipeline ASR.
CAFARO et CERDÁ [41]	MILP continu	1 source, 1 dépôt	Horizon mensuel, séquence et taille optimales des lots. Synchronisation quotidienne avec les dépôts.	Planification mensuelle des batches dans le pipeline ASR.
HERRÁN, DE LA CRUZ et DE ANDRÉS [43]	MILP/MINLP	1 source, multi-dépôts	Planification intégrée production + transport. Multi-périodes. Réduction recours heures de pointe.	Coordination raffinerie d'Arzew et pipeline ASR.
MIRHASSANI, ABBASI et MORADI [42]	MILP continu	Nœuds à double fonction	Dépôts à double fonction. Réduction de 35 % des variables binaires.	Applicable aux nœuds intermédiaires du réseau ASR.
GHAFFARI et al. [53]	LP + simulation	1 source, multi-dépôts	LP + simulation, demande incertaine. Minimisation coûts transport + stockage.	Gestion de la demande variable aux centres SBA/Remchi.
Approches récentes à temps discret				

(suite page suivante)

(suite du tableau 3.1)

Auteur(s) / Année	Approche	Topologie	Contribution principale	Pertinence pour ASR
BAGHBAN et YOUSEFIKHOSHBAKHT [36]	MILP discret	Multi- raffineries, multi-dépôts	Injections simultanées, nœuds à double fonction. Résolution en une itération.	Alternative discrète pour topologies complexes.
WODECKI et al. [37]	MILP discret (bin-packing)	Réseau complexe, 12 nœuds	31 jours en moins de 1 000 s. Contraintes pannes et flushing intégrées.	Référence récente pour grandes instances.
Approches métaheuristiques et hybrides				
MOURA, BECCENERI et YANASSE [46]	Hybride MILP + heu- ristique	1 source, multi-dépôts	Décomposition en deux niveaux. Bon compromis qualité/temps de calcul.	Alternative pour grandes instances ; écartée pour ASR (taille raisonnable).
MEIRA et al. [47]	Matheuristique (ASM + SM)	1 source, multi-dépôts	Maintenance intégrée, livraisons simultanées. Solutions réalisables validées.	Approche hybride de référence ; justifie le choix MILP pour ASR.
ÉLES et HECKL [48]	DES + Recuit simulé	Réseau maillé, flux bidirect.	3 000–105 000 simul./s. Faisabilité en < 100 s sur tous les cas tests.	Perspective pour topologies à flux bidirectionnels (extension future ASR).
Intelligence artificielle				
ZHANG et al. [49]	Auto- apprentissage (ACO + clus- tering flou)	1 source, multi-dépôts	Base de données historique, réduction temps de calcul. Surpasse ACO classique.	Perspective d'intégration IA dans la planification future du pipeline ASR.
Optimisation du tracé				

(suite page suivante)

(suite du tableau 3.1)

Auteur(s) / Année	Approche	Topologie	Contribution principale	Pertinence pour ASR
DBOUK, HAYEK et GHORAYEB [50]	Algorithme A*	Conception du tracé	Supérieur à Dijkstra + glouton sur 100 scénarios. Réduction de 12 % des coûts.	Perspective d’optimisation du tracé pour l’extension vers Naâma.
Revue bibliométriques				
ACOSTA-AMADO [51]	Revue bibliométrique	Tous types	130 articles (2015–2024). Domination MILP. Axes futurs : stochastique, Benders.	Positionnement général du domaine.
SIDKI et al. [52]	Revue bibliométrique systématique	Tous types	99 articles (2000–2023). 8 critères de classification. Axes futurs : robustesse, flux bidirectionnel, ML hybride.	Positionne le pipeline ASR dans les tendances actuelles de la recherche.

3.8 Conclusion

Ce chapitre a dressé un panorama structuré des principales approches développées dans la littérature pour la planification et l’optimisation du transport de carburant dans les pipelines multiproduits. Il en ressort que les modèles MILP, qu’ils soient à temps discret ou continu, constituent l’approche dominante pour ce type de problème, offrant le meilleur équilibre entre qualité de solution et temps de calcul. Les approches hybrides et data-driven, bien que prometteuses pour les instances de grande taille, ne garantissent pas l’optimalité et restent moins adaptées au contexte du pipeline ASR. Les travaux portant sur des infrastructures similaires, notamment ceux relatifs aux réseaux NAFTAL, valident par ailleurs la faisabilité computationnelle de l’approche retenue. Notre travail s’inscrit dans la continuité de ces recherches en proposant un modèle MILP adapté au réseau ASR/NAFTAL, en tirant parti des avancées méthodologiques recensées dans cette revue de littérature.

Chapitre 4

Modélisation Mathématique et Cahier des Charges

4.1 Introduction

Ce chapitre présente la modélisation mathématique du problème de planification du transport par pipeline multi-produits. Nous formulons un modèle générique de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) applicable aux deux configurations de réseau étudiées : le réseau actuel ASR et le réseau étendu ASRN. Le cahier des charges numérique associé est également détaillé, fournissant l'ensemble des données nécessaires à la résolution des instances définies.

4.2 Rappel et Présentation des Réseaux

Le réseau de transport par pipeline étudié dans ce travail relie une raffinerie source (ARZ) à plusieurs centres de distribution en aval. Deux configurations sont considérées.

4.2.1 Réseau actuel ASR

Le réseau ASR constitue la configuration opérationnelle actuelle. Il est composé de trois nœuds principaux :

- **ARZ** : la raffinerie source, point d'injection des produits dans le pipeline ;
- **C1 (SBA)** : le centre de Sidi Bel Abbès, premier centre récepteur et nœud intermédiaire actif ;
- **C2 (REM)** : le centre de Remchi, centre terminal en aval de C1.

Le réseau comprend deux segments de pipeline orientés :

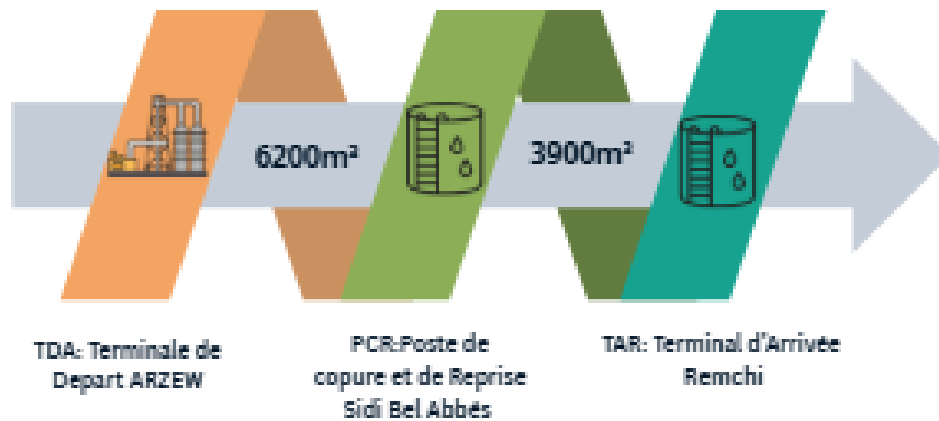


FIG. 4.1 : Réseau actuel ASR

4.2.2 Réseau futur ASRN

Dans une perspective d'amélioration de la performance logistique, une extension du réseau actuel ASR est proposée sous la forme d'une nouvelle configuration appelée ASRN. Cette évolution vise à réduire la dépendance au transport routier pour l'approvisionnement des régions du Sud-Ouest algérien, en améliorant la fiabilité et en diminuant les coûts logistiques.

Cette extension repose sur l'intégration d'un nouveau centre de stockage et de distribution situé à Naâma (C3), choisi pour sa position géographique stratégique entre le Nord et le Sud du pays. Un nouveau pipeline reliant le centre de Sidi Bel Abbès (C1) à celui de Naâma (C3) est ainsi introduit, avec une longueur de 270 km et un diamètre de 8 pouces (soit environ 203 mm). Ces caractéristiques physiques, retenues dans le cadre de cette étude, ont permis de calculer un temps de transit $AR(C3) = 20$ périodes, conformément à la formule présentée dans le cahier des charges. Cette canalisation permet de réorganiser les flux logistiques en faisant de C1 un nœud principal capable d'alimenter simultanément deux centres de distribution en aval : C2 (Remchi) et C3 (Naâma).

La topologie du réseau étendu est donnée par :

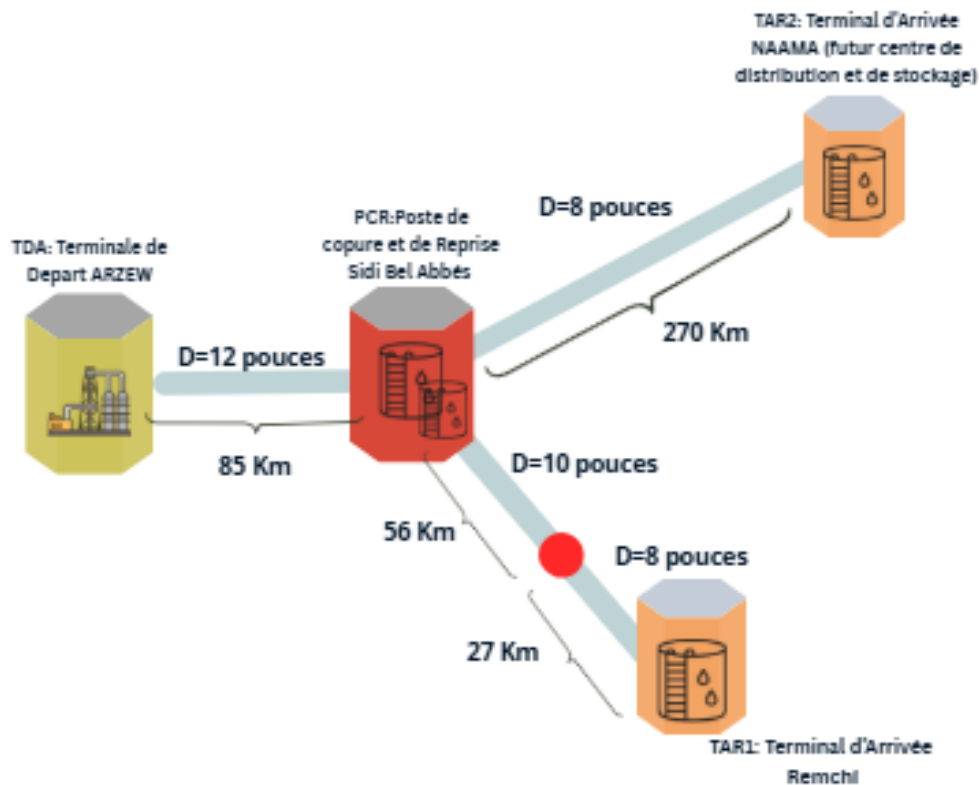


FIG. 4.2 : Réseau futur ASRN

Justification et avantages de l'extension vers Naâma

La création du centre C3 (Naâma) constitue une décision stratégique motivée par plusieurs considérations d'ordre logistique, économique et environnemental.

Absorption de la charge du centre de Remchi. Le centre de Remchi (C2) assure actuellement l'approvisionnement en carburants de plusieurs zones géographiques par voie routière. Parmi les zones desservies par ce centre, on trouve la région Nord-Ouest comprenant Tlemcen et Aïn Témouchent, ainsi que certaines wilayas du Sud-Ouest algérien telles que Béchar, Adrar, Tindouf et Bordj Badji Mokhtar. Cette double responsabilité engendre une surcharge opérationnelle importante sur le centre de Remchi. La création du centre de Naâma, alimenté directement par pipeline depuis Sidi Bel Abbès, permet de redistribuer ces flux en prenant en charge l'approvisionnement des wilayas du Sud-Ouest, délestant ainsi significativement C2 (Remchi).

Réduction des coûts de transport. L'approvisionnement actuel des wilayas du Sud-Ouest par transport routier depuis Remchi génère des coûts logistiques considérables. Un camion-citerne transportant 30 m³ de carburant représente une charge utile d'environ 25,5 tonnes (densité du gazole : 0,85 kg/litre), portant le poids total du véhicule à environ 38 à 40 tonnes,

avec une consommation estimée entre 34 et 38 litres de gazole aux 100 km [54, 55], auxquels s'ajoutent les frais de conduite, d'entretien et d'assurance. Le remplacement d'une partie de ces acheminements par un transport par pipeline permettrait de réduire significativement ces coûts variables, notamment les dépenses en carburant et les frais de personnel, estimés à environ deux jours de conduite par trajet aller-retour vers les wilayas du Sud-Ouest [54, 55]. Une étude de rentabilité complète, incluant les coûts d'investissement et d'amortissement des infrastructures, pourrait faire l'objet de travaux futurs.

Dimensionnement stratégique des capacités de stockage. Les capacités de stockage du centre C3 (Naâma) ont été définies en tenant compte des spécificités de consommation des régions du Sud. La capacité en essence est fixée à 14 000 m³, identique à celle du centre de Remchi, tandis que la capacité en gazole est portée à 32 000 m³, soit une valeur sensiblement supérieure à celle de Remchi (22 000 m³), justifiée par la forte consommation de gazole dans les wilayas du Sud, où ce produit est indispensable pour les transports, les groupes électrogènes et les engins agricoles et miniers. La capacité du pipeline entre C1 (SBA) et C3 (NAA) est estimée à :

$$Q_{pipe} = 220 \times 40 = 8\,800 \text{ m}^3$$

ce qui correspond à un débit de lancement de 220 m³/h depuis Sidi Bel Abbès sur une durée d'injection de 40 heures, retenue dans le cadre de cette étude.

Réduction de la pollution et impact environnemental. Le transport par pipeline est reconnu comme étant significativement moins polluant que le transport routier par camion-citerne [1]. En substituant une partie des rotations de camions par un acheminement via pipeline, le réseau ASRN contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à la diminution de l'usure des infrastructures routières ainsi qu'à la réduction des risques d'accidents liés au transport de matières dangereuses.

Simplification de la distribution et amélioration de la résilience. La création d'un point de distribution intermédiaire à Naâma rapproche géographiquement le réseau de pipeline des wilayas du Sud-Ouest. Les distances de livraison finale par camion depuis C3 (Naâma) vers Béchar, Adrar, Tindouf et Bordj Badji Mokhtar sont nettement inférieures à celles depuis Remchi, ce qui se traduit par des délais de livraison réduits et une meilleure réactivité face aux pics de demande. Par ailleurs, en cas de perturbation sur l'axe Remchi Sud-Ouest, le centre de Naâma peut assurer en partie la continuité de l'approvisionnement, renforçant ainsi la résilience globale du réseau [45].

4.3 Hypothèses du Modèle

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour la formulation du modèle mathématique de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) :

- Dans la configuration actuelle (ASR), le système de transport est modélisé comme un **pipeline multiproduit unidirectionnel unique**, reliant la raffinerie source aux centres aval selon une structure linéaire.

Dans la configuration étendue (ASRN), le réseau est modélisé comme un **système composé de plusieurs segments de pipelines unidirectionnels interconnectés**, permettant la distribution des flux vers plusieurs centres à partir d'un nœud intermédiaire. Cette représentation permet de prendre en compte la nouvelle topologie du réseau ainsi que la diversification des flux logistiques.

- Le réseau de transport assure l'acheminement de plusieurs produits pétroliers le gazole (GO) et l'essence sans plomb (SP) depuis une raffinerie source vers les centres de distribution en aval.
- Le centre C1 (SBA) joue un **double rôle** au sein du réseau : en plus de sa fonction principale de réception et de stockage, il est capable d'agir en tant que **nœud intermédiaire actif**, en réinjectant des produits dans le pipeline à destination des centres aval, dans le respect des contraintes techniques et des délais de transit.
- Le pipeline est supposé **opérationnel en continu** sur l'ensemble de l'horizon de planification, sans interruption ni arrêt programmé ou fortuit.
- Le pipeline est supposé **constamment en charge** (toujours rempli). En vertu de l'incompressibilité des fluides transportés, tout volume injecté à l'origine du pipeline entraîne simultanément la livraison d'un volume équivalent à l'ensemble des centres récepteurs en aval.
- Le **débit de pompage est constant et fixé** pour chaque scénario d'étude, excluant toute variation de débit au cours de la simulation.
- Les produits pétroliers circulent en séquence continue dans le pipeline **sans séparation physique**, générant à chaque transition entre deux produits distincts une interface de contamination dont le volume est pris en compte dans le modèle.
- Le volume de contaminant généré à l'interface entre deux produits consécutifs distincts est considéré **constant et connu a priori**.
- Le volume total de contaminant généré est supposé **fixe et réparti équitablement** entre les centres, indépendamment du nombre d'interfaces réalisées au cours de la planification.

- Les volumes de contaminant sont collectés dans des **réservoirs tampons dédiés**, puis réintroduits progressivement dans les réservoirs de produits finis, dans la limite d'un seuil admissible défini par un facteur de correction réglementaire.
- Chaque produit est soumis à une **capacité de stockage maximale prédéfinie** dans chaque centre, constituant une contrainte physique stricte à ne pas dépasser à aucune période de planification.
- L'horizon de planification est **fixe et discrétisé en périodes**, couvrant une durée totale d'une **décade** (dix jours).
- Les demandes journalières en produits pétroliers de chaque centre de distribution doivent être **intégralement satisfaites** avant l'échéance de chaque période de planification.

4.4 Modèle Mathématique :

La formulation mathématique présentée dans ce chapitre s'inscrit dans la continuité des travaux antérieurs réalisés sur le pipeline multiproduit ASR/NAFTAL [56, 9, 13]. Le modèle proposé en reprend la structure de base tout en y apportant des extensions et des adaptations originales, notamment l'intégration du réseau étendu ASRN incluant le centre C3 (Naâma), la reformulation générique des indices par centre, l'ajout explicite des conditions initiales et finales (C18, C19, C20), ainsi que la correction des incohérences de notation relevées dans les travaux précédents. L'ensemble de ces contributions constitue l'apport propre de ce travail par rapport aux références citées.

4.4.1 Nomenclature

a) Les ensembles

- c : Ensemble des centres de distribution, tel que $c \in \{1, \dots, NC\}$
- ta : Ensemble des instants d'arrivée au centre c , tel que $ta \in \{0, \dots, NTA(c)\}$
- tl : Ensemble des instants de lancement, tel que $tl \in \{1, \dots, TL\}$
- p : Ensemble des produits considérés, tel que $p \in \{1, \dots, NP\}$

b) Les paramètres

- $dem(p, ta, c)$: Demande du centre c pour le produit p à l'instant ta
- $Capqtmp(p, c)$: Capacité de contamination acceptée pour le produit p au centre c
- $Capc(p, c)$: Capacité de stockage du produit p au centre c
- $Prc(p)$: Pourcentage de correction de contamination du produit p

- $AR(c)$: Nombre de périodes nécessaires pour que le produit injecté atteigne le centre c
- $fraction(p)$: Fraction de contamination associée au produit p

c) Les constantes

- $qtm(c)$: Volume fixe moyen de contamination générée dans le pipeline du centre c
- VL : Volume injecté à chaque opération d'injection
- T_{inj} : Durée d'injection de chaque produit
- db_1, db_2 : Débits moyens pompés sur les segments 1 et 2

d) Les variables de décision binaires

- $YL_1(tl, p) \in \{0, 1\}$: Vaut 1 si le produit p est lancé au temps tl depuis la raffinerie ARZ, 0 sinon
- $YL_2(tl, p) \in \{0, 1\}$: Vaut 1 si le produit p est lancé au temps tl depuis le centre C1 (SBA), 0 sinon
- $yc(t_1, p_1, t_2, p_2, c) \in \{0, 1\}$: Vaut 1 s'il y a contamination entre le produit p_1 lancé à t_1 et le produit p_2 lancé à t_2 dans le pipeline du centre c , 0 sinon
- $ya(ta, c, p) \in \{0, 1\}$: Vaut 1 si le produit p arrive au centre c à l'instant ta , 0 sinon

e) Les variables de décision continues

- $frqtm_1(t_1, t_2, p, c)$: Fraction de contamination générée côté p_1 lors d'un changement de t_1 à t_2 dans le pipeline du centre c
- $frqtm_2(t_1, t_2, p, c)$: Fraction de contamination générée côté p_2 lors d'un changement de t_1 à t_2 dans le pipeline du centre c
- $frqma_1(ta, p, c)$: Fraction de contamination côté p_1 arrivée au centre c à l'instant ta
- $frqma_2(ta, p, c)$: Fraction de contamination côté p_2 arrivée au centre c à l'instant ta
- $Qcor(ta, p, c)$: Quantité de correction à appliquer au produit p au centre c à l'instant ta
- $qstock(ta, p, c)$: Quantité du produit p stockée au centre c à l'instant ta
- $qstockqtm(ta, p, c)$: Quantité de contamination stockée au centre c à l'instant ta pour le produit p
- $QSERV(p, ta, c)$: Quantité du produit p servie au centre c à l'instant ta

4.4.2 Fonction Objectif

La fonction objectif vise à maximiser le stock total de produits dans l'ensemble des centres tout en minimisant les pertes dues aux contaminations générées dans le pipeline :

$$\max \left[\sum_{p=1}^{NP} \sum_{t_a=AR+1}^{t_a < TL} \sum_{c=1}^{NC} qstock(t_a, p, c) - \sum_{p_1}^{TL-1} \sum_{t_1=1}^{TL} \sum_{t_2=t_1+1}^{TL} \sum_{p_2 \neq p_1} \sum_{c=1}^{NC} qtm(c) \cdot yc(t_1, t_2, p_1, p_2, c) \right] \quad (4.1)$$

4.4.3 Contraintes

(1) Un seul produit lancé par instant de lancement :

$$\sum_p YL_1(t, p) \leq 1, \quad \forall t \in TL \quad (4.2)$$

$$\sum_p YL_2(t, p) \leq 1, \quad \forall t \in TL \quad (4.3)$$

(2) Continuité du lancement :

$$\sum_p YL_1(t+1, p) \leq \sum_p YL_1(t, p), \quad \forall t \in TL, t < TL \quad (4.4)$$

$$\sum_p YL_2(t+1, p) \leq \sum_p YL_2(t, p), \quad \forall t \in TL, t < TL \quad (4.5)$$

(3) Arrivée conditionnée à l'injection :

$$ya(ta, c, p) = YL_1(t, p), \quad \forall t \in TL, ta = t + AR(c), ta \leq TL, p \in NP, c \in NC \quad (4.6)$$

(4) Satisfaction de la demande :

$$QSERV(p, ta, c) = dem(p, ta, c), \quad \forall p \in NP, ta > 0, ta \leq TL, c \in NC \quad (4.7)$$

(5) Capacité de stockage :

$$qstock(ta, p, c) \leq Capc(p, c), \quad \forall p \in NP, ta > 0, ta \leq TL, c \in NC \quad (4.8)$$

(6) Capacité de contamination :

$$qstockqtm(ta, p, c) \leq Capqtmp(p, c), \quad \forall p \in NP, ta > 0, ta \leq TL, c \in NC \quad (4.9)$$

(7) Contaminant côté produit p_1 :

$$frqtm_1(t_1, t_2, p_1, c) = fraction(p_1) \cdot yc(t_1, p_1, t_2, p_2, c) \cdot qtm(c), \quad \forall p_2 \neq p_1, t_1 < TL, t_2 = t_1 + 1, c \in NP \quad (4.10)$$

(8) Contaminant côté produit p_2 :

$$frqtm_2(t_1, t_2, p_2, c) = fraction(p_2) \cdot yc(t_1, p_1, t_2, p_2, c) \cdot qtm(c), \quad \forall p_2 \neq p_1, t_1 < TL, t_2 = t_1 + 1, c \in NP \quad (4.11)$$

(9) Transfert de la contamination p_1 vers le centre :

$$frqtm_1(t_1, t_2, p, c) = frqtm_{a_1}(ta, p, c), \quad \forall p, t_2 = t_1 + 1, ta = t_1 + AR(c), ta \leq TL, c \in NC \quad (4.12)$$

(10) Transfert de la contamination p_2 vers le centre :

$$frqtm_2(t_1, t_2, p, c) = frqtm_{a_2}(ta, p, c), \quad \forall p, t_2 = t_1 + 1, ta = t_2 + AR(c), ta \leq TL, c \in NC \quad (4.13)$$

(11) Correction de la contamination :

$$Qcor(ta, p, c) = \min(Prc(p) \cdot VL \cdot ya(ta, c, p), qstockqtm(ta, p, c)), \quad \forall p \in NP, ta \leq TL, c \in NC \quad (4.14)$$

(12) Existence d'un contaminant entre deux segments consécutifs différents :

$$yc(t_1, p_1, t_2, p_2, c) = \min(YL_1(t_1, p_1), YL_1(t_2, p_2)), \quad \forall t_2 = t_1 + 1, p_2 \neq p_1, c \in NC \quad (4.15)$$

(13) Absence de contamination entre deux segments identiques successifs :

$$yc(t_1, p_1, t_2, p_2, c) = 0, \quad t_2 = t_1 + 1, p_2 = p_1, c \in NC \quad (4.16)$$

(14) Absence de contamination entre segments non successifs :

$$yc(t_1, p_1, t_2, p_2, c) = 0, \quad t_2 > t_1 + 1, p_1, p_2 \in NP, c \in NC \quad (4.17)$$

(15) Évolution dynamique du stock au centre C1 :

$$\begin{aligned}
& ya(ta, 1, p) \cdot VL + qstock(ta-1, p, 1) + Qcor(ta, p, 1) - frqtma_1(ta, p, 1) - frqtma_2(ta, p, 1) \\
& = qstock(ta, p, 1) + QSERV(p, ta, 1) + VL \cdot \sum_{c \neq 1} ya(ta, c, p), \quad \forall ta > 0, ta \leq TL, p \in NP
\end{aligned} \tag{4.18}$$

(16) Évolution dynamique du stock aux centres $c \neq 1$:

$$\begin{aligned}
& ya(ta, c, p) \cdot VL + qstock(ta-1, p, c) + Qcor(ta, p, c) - frqtma_1(ta, p, c) - frqtma_2(ta, p, c) \\
& = qstock(ta, p, c) + QSERV(p, ta, c), \quad \forall ta > 0, ta \leq TL, p \in NP, c \neq 1
\end{aligned} \tag{4.19}$$

(17) Évolution dynamique du stock de contamination :

$$\begin{aligned}
qstockqtm(ta, p, c) &= frqtma_2(ta, p, c) + frqtma_1(ta, p, c) + qstockqtm(ta-1, p, c) - Qcor(ta, p, c), \\
& \forall p \in NP, ta > 0, ta \leq TL, c \in NC
\end{aligned} \tag{4.20}$$

(C18) Conditions initiales – stocks de produit :

$$\begin{aligned}
qstock(0, 1, 1) &= 15000, & qstock(0, 2, 1) &= 130000 \\
qstock(0, 1, 2) &= 7000, & qstock(0, 2, 2) &= 11000 \\
qstock(0, 1, 3) &= 7000, & qstock(0, 2, 3) &= 16000
\end{aligned} \tag{4.21}$$

(C19) Conditions initiales stocks de contamination :

$$qstockqtm(0, 1, c) = 190, \quad qstockqtm(0, 2, c) = 170, \quad \forall c \in NC \tag{4.22}$$

(C20) Conditions finales stocks de produit à $ta = TL$:

$$\begin{aligned}
qstock(TL, 1, 1) &\geq 7000, & 45000 &\leq qstock(TL, 2, 1) \leq 140000 \\
qstock(TL, 1, 2) &\geq 8400, & 11000 &\leq qstock(TL, 2, 2) \leq 18000 \\
qstock(TL, 1, 3) &\geq 8400, & 16000 &\leq qstock(TL, 2, 3) \leq 23200
\end{aligned} \tag{4.23}$$

4.5 Application du Modèle aux Deux Réseaux

Le modèle générique formulé à la section précédente s'applique aux deux configurations de réseau moyennant les adaptations paramétriques suivantes :

TAB. 4.1 : Comparaison des paramètres entre les réseaux ASR et ASRN

Paramètre	ASR	ASRN
Centres	$\{C1, C2\}$	$\{C1, C2, C3\}$
Segments	$ARZ \rightarrow C1 \rightarrow C2$	$ARZ \rightarrow C1 \rightarrow C2, C1 \rightarrow C3$
Nombre de scénarios	3	3

4.6 Données physiques du pipeline

Calcul des $AR(c)$

$AR(c)$ d'un centre c représente le nombre de périodes nécessaires pour que le produit injecté atteigne ce centre. Ce paramètre est calculé à partir des caractéristiques physiques du pipeline et des conditions opérationnelles de pompage, selon la procédure détaillée dans le lemme suivant.

Lemme 4.1 (Calcul de $AR(c)$). Soient D le diamètre intérieur du pipeline (en mètres), Q le débit volumique de pompage (en m^3/h), L la distance séparant le point d'injection du centre c (en km), et T_{inj} la durée d'une période (en heures). $AR(c)$ est défini par :

$$AR(c) = \left\lceil \frac{T(c)}{T_{inj}} \right\rceil \quad (4.24)$$

où $T(c)$ est le temps de transit du produit entre le point d'injection et le centre c , obtenu par :

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.25)$$

$$v = \frac{Q}{S} \quad (4.26)$$

$$T(c) = \frac{L(c)}{v} \quad (4.27)$$

où :

- S est la section transversale intérieure du pipeline (m^2);
- v est la vitesse moyenne d'écoulement dans le pipeline (km/h);
- $T(c)$ est le temps de transit entre le point d'injection et le centre c (h).

Application numérique : segment $Arzew \rightarrow C1$ (SBA)

Les données physiques et opérationnelles du segment sont :

- $Q = 220 m^3/h$

- $D = 12 \text{ pouces} = 0,3048 \text{ m}$
- $L = 85 \text{ km}$
- $T_{\text{inj}} = 2 \text{ h}$

Étape 1 : Section transversale.

$$S = \frac{\pi \times (0,3048)^2}{4} \approx 0,07297 \text{ m}^2 \quad (4.28)$$

Étape 2 : Vitesse d'écoulement.

$$v = \frac{220}{0,07297} \approx 3,014 \text{ km/h} \quad (4.29)$$

Étape 3 : Temps de transit.

$$T(C1) = \frac{85}{3,014} \approx 28,20 \text{ h} \quad (4.30)$$

Étape 4 : Calcul de AR(C1).

$$\text{AR}(C1) = \left\lfloor \frac{28,20}{2} \right\rfloor = \lfloor 14,1 \rfloor = 14 \quad (4.31)$$

La même procédure est appliquée pour les segments $C1 \rightarrow C2$ (Remchi) et $C1 \rightarrow C3$ (Naâma). Les résultats sont regroupés dans le tableau du cahier des charges .

TAB. 4.2 : Caractéristiques physiques des segments du pipeline

Segment	Distance (km)	AR (période)
ARZ $\rightarrow$ C1 (SBA)	85	14
C1 $\rightarrow$ C2 (REM)	83	9
C1 $\rightarrow$ C3 (NAA)	270	20

4.6.1 Données de stock

Les capacités maximales de stockage par centre et par produit, ainsi que les stocks initiaux et finaux imposés, sont présentés dans les tableaux suivants.

TAB. 4.3 : Capacités des réservoirs par centre et par produit

Centre	Produit	Capacité (m ³)
C1 / SBA	Essence	30000
C1 / SBA	Gazole	150000
C2 / REM	Essence	14000
C2 / REM	Gazole	22000
C3 / NAA	Essence	14000
C3 / NAA	Gazole	32000

TAB. 4.4 : Stocks initiaux par centre et par produit (m³)

Centre	Produit	Stock initial (m ³)
C1 / SBA	Essence	15000
C1 / SBA	Gazole	130000
C2 / REM	Essence	7000
C2 / REM	Gazole	11000
C3 / NAA	Essence	7000
C3 / NAA	Gazole	16000

TAB. 4.5 : Stocks initiaux de contamination par centre et par produit (m³)

Centre	Produit	Stock initial de contamination (m ³)
C1 / SBA	Essence	190
C1 / SBA	Gazole	170
C2 / REM	Essence	190
C2 / REM	Gazole	170
C3 / NAA	Essence	190
C3 / NAA	Gazole	170

4.6.2 Données de demande par scénario

Trois scénarios de demande ont été définis afin de tester la robustesse du modèle face à différents niveaux de consommation. Les demandes sont exprimées en m³ par horizon de planification.

TAB. 4.6 : Demandes en produits par centre et par scénario (m³/periode)

Centre	Produit	Scénario Faible	Scénario Moyen	Scénario Fort
C1 / SBA	Essence	29	41	53
C1 / SBA	Gazole	151	211	272
C2 / REM	Essence	7	10	13
C2 / REM	Gazole	12	17	22
C3 / NAA	Essence	8	11	13
C3 / NAA	Gazole	13	18	23

4.7 Outil de résolution

Le modèle mathématique a été implémenté et résolu à l'aide du logiciel **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio version 12.8.0**, un solveur commercial reconnu pour la résolution de problèmes de programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP), garantissant l'optimalité de la solution dans les limites de temps et de mémoire fixées.

4.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté la formulation complète du modèle mathématique MILP développé pour la planification tactique de l'approvisionnement en hydrocarbures dans un réseau pipeline multiproduits. La modélisation proposée repose sur un modèle générique unifié, paramétré par les données du réseau et applicable à différentes topologies. Un lemme dédié permet de calculer les temps de transit $AR(c)$ à partir des caractéristiques physiques du réseau, tandis que l'intégration des conditions initiales et finales assure la cohérence temporelle de la planification sur l'horizon considéré. Plusieurs instances de test ont été définies afin de couvrir différentes configurations de réseau et scénarios de demande. Le chapitre suivant présente l'analyse et la discussion des résultats obtenus par le solveur CPLEX pour chacune de ces instances.

Chapitre 5

Analyse et Discussion des Résultats

5.1 Introduction

Ce chapitre présente l'analyse et la discussion des résultats optimaux obtenus par le solveur **IBM ILOG CPLEX 12.8.0** pour le réseau étendu ASRN selon les trois niveaux de demande estimée définis dans le chapitre précédent : le scénario de **faible demande**, le scénario de **moyenne demande** et le scénario de **forte demande**.

L'analyse est organisée en deux parties complémentaires. La première partie présente les **diagrammes de Gantt** du réseau ASRN pour les trois scénarios, permettant de visualiser les séquences optimales de lancement (YL) et d'arrivée (YA) des produits sur l'ensemble des segments du réseau. La deuxième partie détaille les résultats centre par centre (1/SBA, C2/REM puis C3/NAA) à travers les tableaux de bord Power BI, les évolutions de stock de produits purs et de contaminant, les quantités estimées servies, et les indicateurs clés de performance (KPI).

5.2 Planning Optimal : Diagrammes de Gantt du Réseau ASRN

5.2.1 Structure et lecture du diagramme de Gantt

Le diagramme de Gantt constitue l'outil de visualisation principal du planning optimal issu de CPLEX. Il représente sur l'axe horizontal le temps discrétisé en périodes (1 période = 2h, 1 jour = 12 périodes, horizon = 120 périodes correspondant à 10 jours), et sur l'axe vertical les six lignes de décision correspondant aux variables de lancement et d'arrivée pour les trois segments du réseau ASRN :

- **YL1 : Arzew → SBA** : séquence des lancements depuis la raffinerie ARZ vers C1/SBA (barres pleines);
- **YA1 : Arrivée SBA** : arrivées au centre C1/SBA après le délai de transit $AR(C1) = 14$ périodes = 28h (barres transparentes);
- **YL2 : SBA → Remchi** : séquence des lancements depuis C1 vers C2/REM (barres

pleines);

- **YA2 : Arrivée Remchi** : arrivées au centre C2/REM après le délai de transit $AR(C2) = 9$ périodes = 18h (barres transparentes);
- **YL3 : SBA → Naâma** : séquence des lancements depuis C1 vers C3/NAA (barres pleines);
- **YA3 : Arrivée Naâma** : arrivées au centre C3/NAA après le délai de transit $AR(C3) = 20$ périodes = 40h (barres transparentes).

Les **barres pleines** représentent les variables de lancement (YL) et les **barres transparentes** représentent les variables d'arrivée (YA). La couleur **bleue** désigne le **gazole (GO)** et la couleur **orange** désigne l'**essence sans plomb (SP)**. Les flèches obliques matérialisent le délai de transit $AR(c)$ entre chaque lancement et son arrivée correspondante.

5.2.2 Diagramme de Gantt : Scénario de Faible Demande

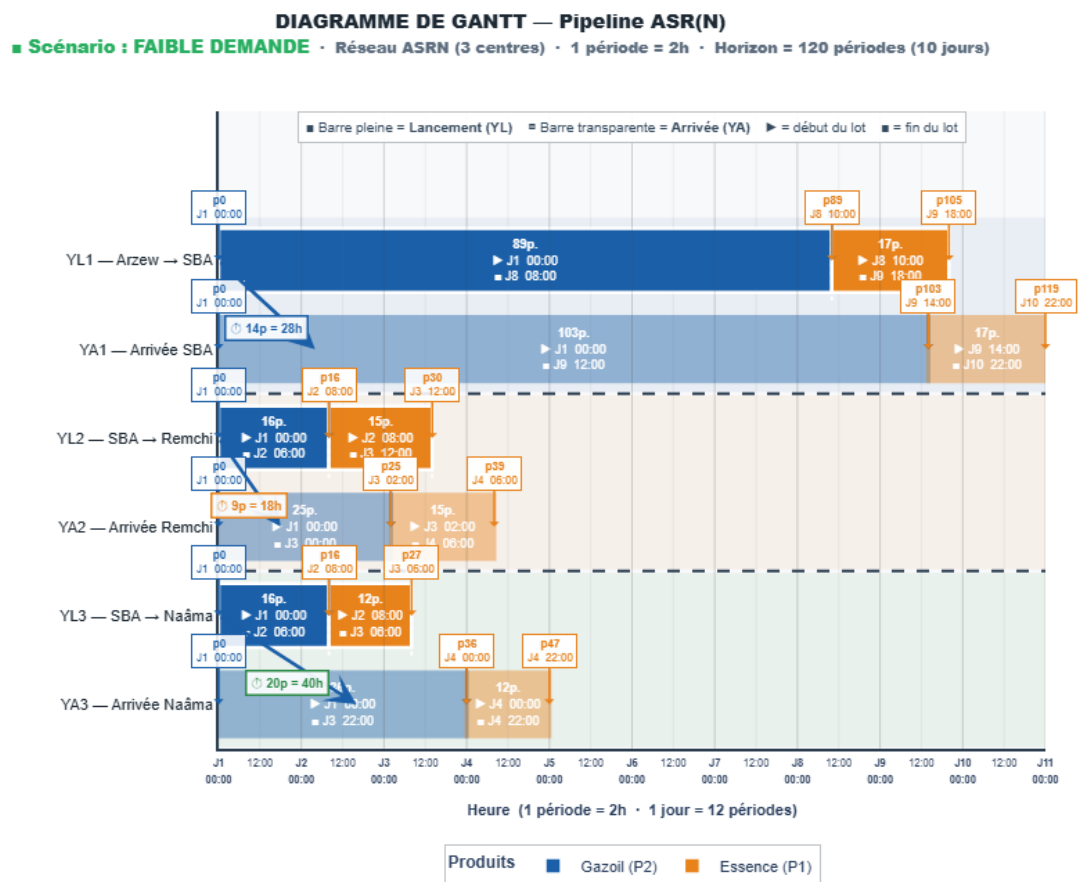


FIG. 5.1 : Diagramme de Gantt du Réseau ASRN : Scénario de Faible Demande

Interprétation : Sur le segment **YL1 : Arzew → SBA**, un seul lot de gazole de 89 périodes est lancé dès J1 00:00, suivi d'un unique lot d'essence de 17 périodes à J9 08:00. Cette organisation reflète la faible demande en essence ($29 \text{ m}^3/\text{p}$) : le pipeline est quasi intégralement occupé par le gazole ($151 \text{ m}^3/\text{p}$), qui représente environ 88 % de l'horizon de transport sur YL1. L'arrivée à SBA (YA1) est décalée de 14 périodes (28h) : le gazole atteint C1/SBA à J2 04:00.

Sur le segment **YL2 : SBA → Remchi**, la séquence est très compacte : un lot de gazole de 16 périodes (J1 00:00) suivi d'un lot d'essence de 15 périodes (J2 06:00). Les faibles volumes requis ($12 \text{ m}^3/\text{p}$ en gazole et $7 \text{ m}^3/\text{p}$ en essence) se traduisent par des séquences de courte durée. Les arrivées à Remchi (YA2) sont décalées de 9 périodes (18h) : gazole à J1 18:00, essence à J3 02:00.

Sur le segment **YL3 : SBA → Naâma**, un lot de gazole de 16 périodes (J1 00:00) précède un lot d'essence de 12 périodes (J1 16:00). Le délai de transit le plus long du réseau (20 périodes = 40h) impose une anticipation dès le premier jour : les arrivées à Naâma (YA3) n'interviennent qu'à J2 16:00 pour le gazole et J4 00:00 pour l'essence. La demande très faible de ce centre ($13 \text{ m}^3/\text{p}$ et $8 \text{ m}^3/\text{p}$) laisse le pipeline inactif sur ce segment pour la majeure partie de l'horizon.

En faible demande, les séquences de lancement sont concentrées en début d'horizon (J1–J4), laissant l'essentiel des 10 jours sans activité de transport. Le réseau fonctionne en mode *batch unique par produit* : un seul lot de grande taille par produit suffit à couvrir l'intégralité des besoins des trois centres de distribution. Cette flexibilité opérationnelle constitue une réserve disponible pour d'éventuelles opérations de maintenance ou des livraisons non planifiées, sans risque de rupture d'approvisionnement.

5.2.3 Diagramme de Gantt : Scénario de Moyenne Demande

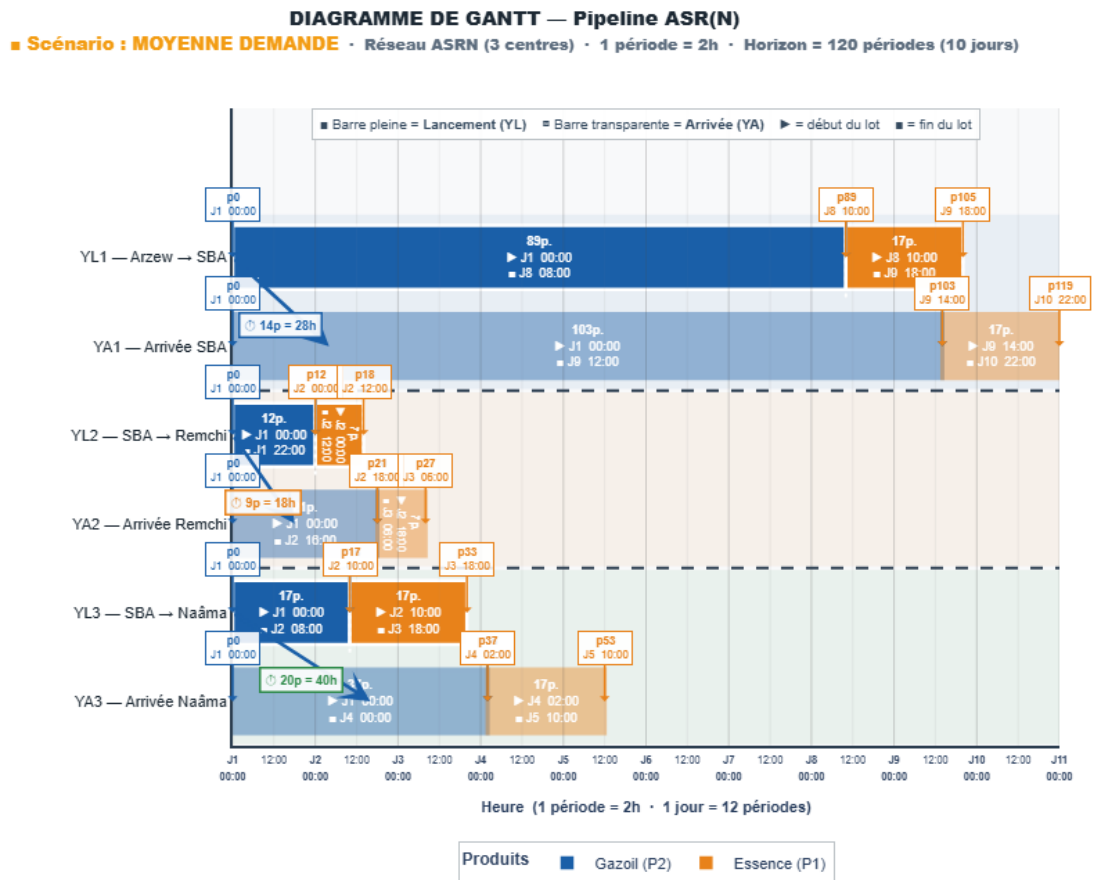


FIG. 5.2 : Diagramme de Gantt du Réseau ASRN : Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : Sur le segment **YL1 : Arzew → SBA**, le lot de gazole est de 89 périodes (J1 00:00), suivi d'un lot d'essence de 17 périodes à J8 10:00. La demande intermédiaire ($211 \text{ m}^3/\text{p}$ en gazole et $41 \text{ m}^3/\text{p}$ en essence) produit une séquence plus longue qu'en scénario faible, sans atteindre celle du scénario fort. Les arrivées à SBA (YA1) sont planifiées à J2 04:00 pour le gazole et à J9 14:00 pour l'essence.

Sur le segment **YL2 : SBA → Remchi**, le solveur programme un lot de gazole de 12 périodes (J1 00:00) suivi d'un lot d'essence d'environ 7 périodes quelques heures plus tard. Les volumes modérés ($17 \text{ m}^3/\text{p}$ et $10 \text{ m}^3/\text{p}$) se traduisent par deux micro-lots en début d'horizon. Le gazole arrive à Remchi à J1 18:00 et l'essence en fin de journée J1.

Sur le segment **YL3 : SBA → Naâma**, un lot de gazole de 17 périodes (J1 00:00) précède un lot d'essence de 17 périodes (J2 10:00). La répartition entre les deux produits est plus équilibrée qu'en scénario faible, reflétant une demande intermédiaire plus homogène ($18 \text{ m}^3/\text{p}$ et $11 \text{ m}^3/\text{p}$). Les arrivées à Naâma interviennent à J2 16:00 pour le gazole et à J4 02:00 pour

l'essence, conformément au transit de 40h.

En moyenne demande, le pipeline est mieux utilisé sur les premiers jours, avec une répartition plus équilibrée entre gazole et essence. Les séquences couvrent un horizon légèrement plus étendu (jusqu'à J9–J10 pour YL1), signe que la demande croissante en essence impose une activation plus tardive du segment principal.

5.2.4 Diagramme de Gantt : Scénario de Forte Demande

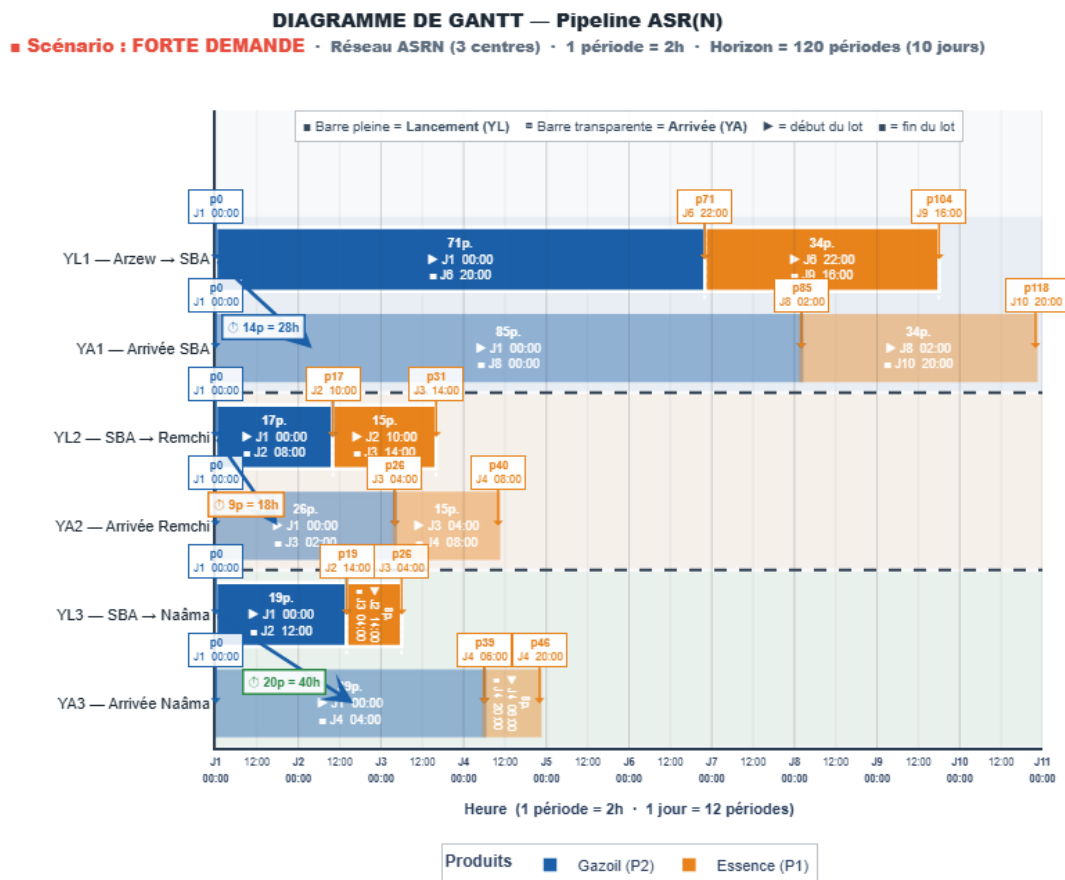


FIG. 5.3 : Diagramme de Gantt du Réseau ASRN : Scénario de Forte Demande

Interprétation : Sur le segment **YL1 : Arzew → SBA**, le solveur programme un lot de gazole de 71 périodes (J1 00:00) suivi d'un lot d'essence de 34 périodes à J6 20:00. La demande maximale (272 m³/p en gazole et 53 m³/p en essence) génère les séquences les plus longues de l'étude : le gazole n'occupe plus qu'environ 67 % de YL1, contre 88 % en scénario faible. Les arrivées à SBA sont prévues à J2 04:00 pour le gazole et à J8 00:00 pour l'essence, le pipeline est sollicité en quasi-permanence sur l'ensemble de l'horizon.

Sur le segment **YL2 : SBA → Remchi**, un lot de gazole de 17 périodes (J1 00:00) est suivi

d'un lot d'essence de 15 périodes (J2 08:00). Les volumes importants ($22 \text{ m}^3/\text{p}$ et $13 \text{ m}^3/\text{p}$) font de ce segment le plus chargé de toute l'étude. Les arrivées à Remchi sont planifiées à J1 18:00 pour le gazole et à J3 02:00 pour l'essence.

Sur le segment **YL3 : SBA → Naâma**, un lot de gazole de 19 périodes (J1 00:00) est immédiatement suivi d'un lot d'essence de 8 périodes (J2 12:00). La forte demande ($23 \text{ m}^3/\text{p}$ et $13 \text{ m}^3/\text{p}$) impose la présence des deux produits dès les premières périodes. Les arrivées à Naâma surviennent à J2 16:00 pour le gazole et à J4 04:00 pour l'essence.

En forte demande, le pipeline est sollicité dès J1 sur tous les segments simultanément. Les lots sont plus grands, les séquences couvrent l'essentiel de l'horizon de 10 jours, et la transition GO→SP intervient plus tôt dans l'horizon que dans les deux autres scénarios.

5.2.5 Synthèse comparative des trois diagrammes de Gantt

L'analyse comparative des trois diagrammes de Gantt permet de dégager les constats suivants :

- **Évolution de la part de l'essence dans YL1.** Plus la demande augmente, plus l'essence prend de place dans le pipeline : en faible demande, le gazole occupe environ **84 %** de YL1 (89 périodes sur 120) ; en forte demande, cette proportion descend à environ **68 %** (71 périodes sur 105 périodes effectivement utilisées), traduisant une montée en puissance des besoins en essence sans plomb.
- **Le segment ARZ→SBA, goulot d'étranglement du réseau.** Ce segment détermine l'ensemble de la cadence du réseau. Avec un transit de 14 périodes (28h) vers le nœud central C1/SBA, toute contrainte sur ce segment se répercute directement sur les approvisionnements des deux centres aval.
- **La contrainte de transit vers Naâma.** Le délai de 20 périodes (40h) sur le segment SBA–Naâma impose les contraintes d'anticipation les plus fortes du réseau : toute décision de lancement sur YL3 ne produit ses effets qu'après près de deux jours. Cette contrainte est respectée dans les trois scénarios, validant la cohérence de la formulation MILP retenue.
- **Minimisation des transitions par CPLEX.** Dans les trois scénarios, le solveur converge vers une solution présentant **au maximum une transition GO→SP par segment**, ce qui minimise les volumes de contaminant d'interface et les pertes de produit, conformément à l'objectif de minimisation des séquences de transition.
- **Flexibilité opérationnelle en faible demande.** En scénario de faible demande, le planning optimal libère l'essentiel de l'horizon après J4, offrant une réserve disponible pour des opérations de maintenance ou des livraisons non planifiées sans risque de rupture d'approvisionnement.

5.3 Résultats du Centre C1 / SBA (Sidi Bel Abbès)

Le centre C1/SBA est le nœud central du réseau ASRN. Il joue un double rôle : premier centre récepteur des produits injectés depuis la raffinerie d'Arzew, et nœud intermédiaire actif alimentant simultanément les centres C2/REM et C3/NAA.

5.3.1 Vue générale : Tableau de bord Power BI (C1/SBA)



FIG. 5.4 : Tableau de bord Power BI Centre C1/SBA Vue générale (trois scénarios)

Interprétation : Le tableau de bord Power BI du centre C1/SBA affiche, pour le scénario de forte demande sélectionné par défaut, une essence distribuée de **53,00 m³/période** et un gazole distribué de **272,00 m³/période**, pour un **taux de service de 100 %** dans les trois scénarios. La capacité totale du centre est de 30 000 m³ pour l'essence et 150 000 m³ pour le gazole, justifiant son rôle de nœud tampon central du réseau.

Taux de remplissage des cuves. Le taux de remplissage d'une cuve à la période p est défini par :

$$\tau_{c,k}(p) = \frac{qstock_{c,k}(p)}{Capc_{c,k}} \times 100 \quad (\%) \quad (5.1)$$

où $Capc_{c,k}$ désigne la capacité nominale de stockage du centre c pour le produit k . Le **taux moyen** de remplissage sur l'horizon de planification (121 périodes, $p = 0$ à 120) est :

$$\bar{\tau}_{c,k} = \frac{1}{121} \sum_{p=0}^{120} \frac{qstock_{c,k}(p)}{Capc_{c,k}} \times 100 \quad (5.2)$$

Cet indicateur est affiché sous forme de jauge dans le tableau de bord Power BI et se met à jour dynamiquement selon le scénario sélectionné. Pour le scénario de forte demande à C1/SBA, les jauges indiquent **23,15 %** pour l'essence et **75,73 %** pour le gazole : la première valeur reflète l'ample marge opérationnelle offerte par la grande capacité de la cuve d'essence (30 000 m³), tandis que la seconde traduit une utilisation nettement plus soutenue, cohérente avec la prédominance structurelle du gazole dans la demande du réseau ASRN.

5.3.2 Évolution du Stock de Produits Purs du centre SBA

Analyse commune aux trois scénarios : Le centre C1/SBA occupe une position stratégique unique dans le réseau ASR(N) : il est simultanément centre récepteur des produits injectés depuis la raffinerie d'Arzew, et nœud redistributeur actif alimentant en parallèle les centres C2/REM et C3/NAA, tout en assurant la desserte directe de ses propres stations-service. Cette triple fonction explique la dynamique particulière observée sur les courbes d'évolution de stock pour les trois scénarios.

De manière générale, on observe une **phase de décroissance initiale** commune aux trois scénarios, traduit la consommation continue du stock initial par les stations-service locales dont la demande est structurellement plus élevée que celle des centres aval ainsi que par les expéditions simultanées vers C2/REM et C3/NAA via les segments YL2 et YL3. Cette décroissance se poursuit jusqu'à l'arrivée des premiers lots en provenance d'Arzew, dont le délai de transit $AR(C1) = 14$ périodes (28h) explique le décalage temporel entre le lancement YL1 et la remontée effective des stocks.

La **phase de remontée** qui succède à cette décroissance est le reflet direct des arrivées YA1, clairement visibles sur les diagrammes de Gantt. À cette remontée s'ajoute la **correction par les cuves de contaminant** : les volumes d'interface accumulés lors des transitions de produit sont progressivement réintégrés dans les stocks de produits purs correspondants, contribuant à une légère élévation supplémentaire des niveaux de stock.

Scénario de Faible Demande

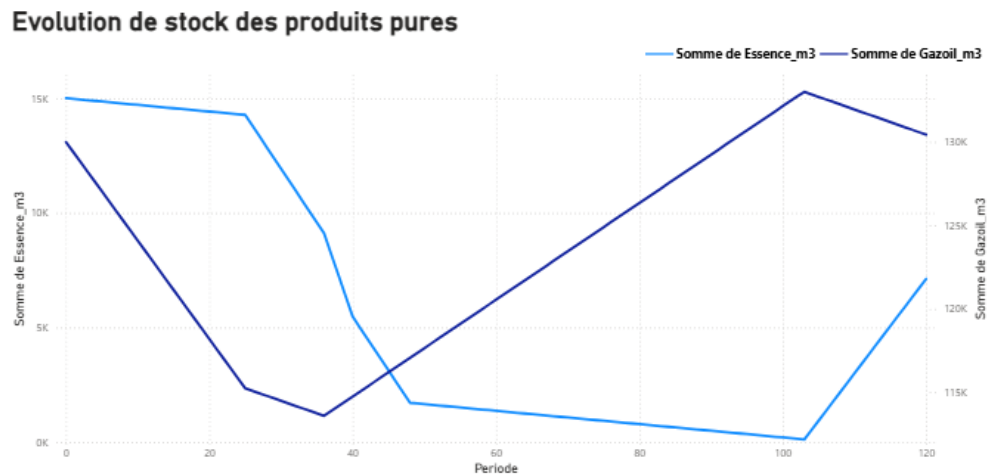


FIG. 5.5 : Évolution du stock de produits purs du centre SBA Scénario de Faible Demande

Interprétation : La courbe d'**essence** (axe gauche) part d'un niveau initial de $\sim 15\,000\text{ m}^3$ et décroît continûment jusqu'à atteindre une valeur proche de $2\,000\text{ m}^3$ vers la période 50, sous l'effet combiné de la distribution locale et de la redistribution vers les centres aval. Le stock se maintient à ce niveau très bas entre les périodes 50 et 100, avant de remonter vers $\sim 7\,000\text{ m}^3$ à partir de la période 100 : cette remontée correspond à l'arrivée du lot d'essence lancé à J9 08:00 sur YL1, qui atteint C1/SBA à J10 après 14 périodes de transit.

La courbe de **gazole** (axe droit) part de $\sim 130\,000\text{ m}^3$, descend modérément jusqu'à $\sim 115\,000\text{ m}^3$ vers la période 25, puis continue de décroître jusqu'à la période 36 avec une valeur proche de $113\,000\text{ m}^3$, avant de remonter fortement jusqu'à $\sim 133\,000\text{ m}^3$ vers les périodes 80–100, grâce à l'arrivée du grand lot de gazole de 100 périodes lancé à J1 00:00 (YA1 à J2 04:00). Une légère redescente est visible en fin d'horizon, jusqu'à $\sim 130\,000\text{ m}^3$.

En faible demande, C1/SBA bénéficie d'une **large marge opérationnelle** : les stocks restent dans des plages confortables tout au long des 10 jours, sans jamais approcher les seuils critiques. Les contraintes de stock final imposées par CPLEX sont respectées, confirmant la robustesse de la solution optimale pour ce niveau de demande.

Scénario de Moyenne Demande

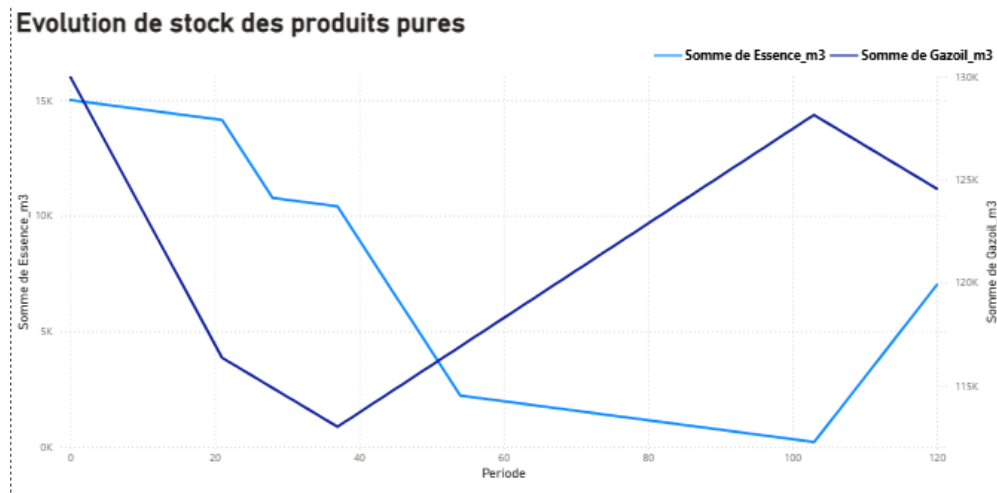


FIG. 5.6 : Évolution du stock de produits purs du centre SBA Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : La courbe d'**essence** (axe gauche) part de $\sim 15\,000\text{ m}^3$ et décroît continûment jusqu'à atteindre un minimum de $2\,226\text{ m}^3$ vers la période 54. Elle se maintient à ce niveau très bas jusqu'à la période 100, avant de remonter à partir de la période 100 correspondant à l'arrivée du lot SP lancé à J8 10:00 (YA1 à J9 14:00) pour atteindre $\sim 7\,010\text{ m}^3$ en fin d'horizon (période 120).

La courbe de **gazole** (axe droit) part de $\sim 130\,000\text{ m}^3$, descend jusqu'à $\sim 112\,986\text{ m}^3$ vers la période 37, puis remonte fortement jusqu'à $\sim 130\,000\text{ m}^3$ vers les périodes 100–105, grâce à l'arrivée du lot GO de 89 périodes (YA1 à J2 04:00). Une légère redescente est ensuite visible en fin d'horizon jusqu'à $\sim 124\,561\text{ m}^3$ à la période 120.

La dynamique de stock s'intensifie par rapport au scénario de faible demande. La décroissance initiale est plus prononcée, les expéditions vers C2/REM et C3/NAA venant amplifier la pression sur les stocks. Cependant, CPLEX synchronise les arrivées YA1 avec les minima de stock pour éviter tout risque de rupture, et les stocks finaux restent à des niveaux acceptables, sans rupture ni dépassement de capacité sur l'horizon.

Scénario de Forte Demande

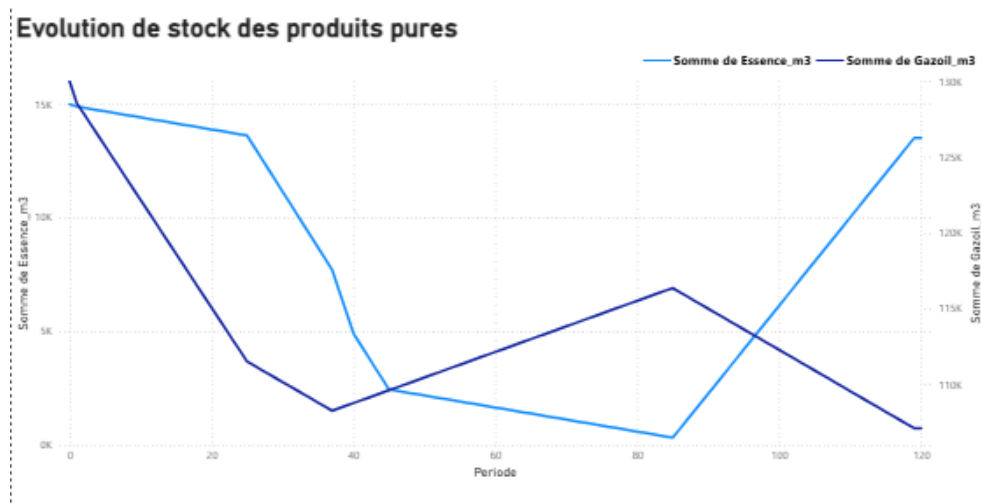


FIG. 5.7 : Évolution du stock de produits purs du centre SBA Scénario de Forte Demande

Interprétation : La courbe d'**essence** (axe gauche) part de $\sim 15\,000\text{ m}^3$ et décroît continûment jusqu'à atteindre un minimum critique de 322 m^3 vers la période 85, avant de remonter immédiatement grâce à l'arrivée du lot SP, pour atteindre $\sim 13\,505\text{ m}^3$ en fin d'horizon (période 120).

La courbe de **gazole** (axe droit) présente un profil en **trois phases distinctes** : elle part de $\sim 130\,000\text{ m}^3$, descend rapidement jusqu'à un minimum proche de $109\,000\text{ m}^3$ vers la période 40, remonte légèrement jusqu'à $\sim 116\,354\text{ m}^3$ vers la période 85 grâce à l'arrivée du lot GO (YA1 à J2 04:00), puis redescend continûment jusqu'à $\sim 107\,106\text{ m}^3$ en fin d'horizon (période 120), sous l'effet de la forte demande qui épuise progressivement les stocks.

Ce comportement en « double creux » est caractéristique d'un réseau opérant proche de sa capacité maximale, où la demande cumulée finit par dépasser le débit d'approvisionnement disponible en fin d'horizon. Malgré cette tension, la solution optimale respecte scrupuleusement les contraintes de stock final imposées par CPLEX : $qstock(TL, 1, 1) \geq 7\,000\text{ m}^3$ pour l'essence et $45\,000 \leq qstock(TL, 2, 1) \leq 140\,000\text{ m}^3$ pour le gazole, attestant de la qualité et de la fiabilité de l'optimisation même sous forte pression de demande.

5.3.3 Évolution du Stock de Contaminant C1/SBA

Analyse commune aux trois scénarios. Les courbes d'évolution du stock de contaminant à C1/SBA présentent une morphologie **caractéristique et identique** dans les trois scénarios, ce qui témoigne de la cohérence du modèle d'optimisation indépendamment du niveau de demande.

On observe systématiquement une **décroissance régulière** du stock de contaminant entre la

période initiale et la fin de l’horizon, traduisant le mécanisme de **correction progressive** : les volumes d’interface accumulés en cuve sont réinjectés périodiquement dans les bacs de produits purs correspondants, réduisant ainsi le stock de contaminant au fil du temps.

La caractéristique la plus saillante de ces courbes est le **pic de contaminant** observable en cours d’horizon, présent dans les trois scénarios et pour les deux produits. Ce pic correspond précisément au moment de la **transition de produit** dans le pipeline — passage du gazole à l’essence sur YL1 clairement identifiable sur les diagrammes de Gantt respectifs. Lors de cette transition, une interface de mélange se forme dans le pipeline et génère un volume de contaminant qui arrive au centre avec le délai de transit de 14 périodes, créant ce pic transitoire avant que la correction ne reprenne. La décroissance finale en deçà du niveau initial confirme que le modèle atteint son objectif de **minimisation du volume total de contaminant**.

Scénario de Faible Demande

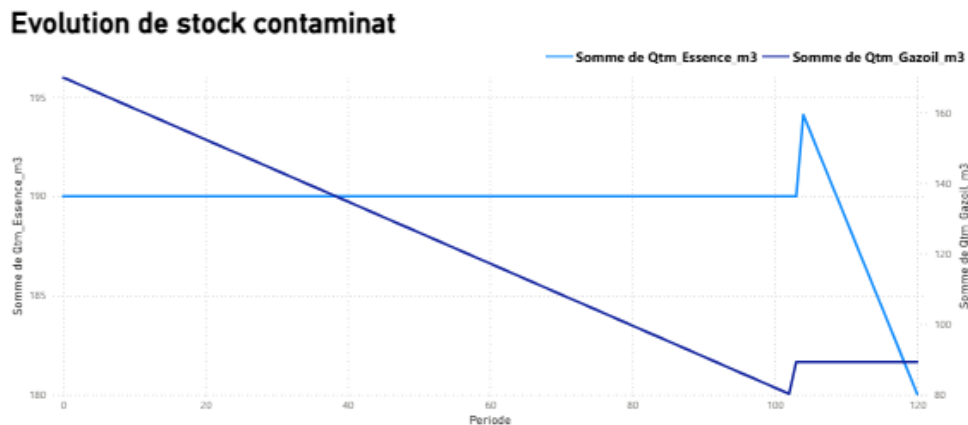


FIG. 5.8 : Évolution du stock de contaminant C1/SBA Scénario de Faible Demande

Interprétation : Le stock de contaminant essence part d’un niveau initial d’environ 190 m³ et décroît progressivement sur l’ensemble de l’horizon, traduisant la correction continue du contaminant résiduel. Un pic unique est visible côté gazole vers la période 100–110, correspondant à l’arrivée du lot d’essence lancé à J9 08:00 sur YL1 (YA1 à J10 après 14 périodes de transit) : c’est l’unique transition GO→SP générée sur ce segment dans ce scénario. Après le pic, les deux courbes décroissent, le contaminant étant progressivement consommé et mélangé aux produits distribués. L’unicité du pic confirme que CPLEX n’a généré qu’une seule transition produit sur le segment ARZ→SBA en faible demande, minimisant ainsi les pertes d’interface.

Scénario de Moyenne Demande

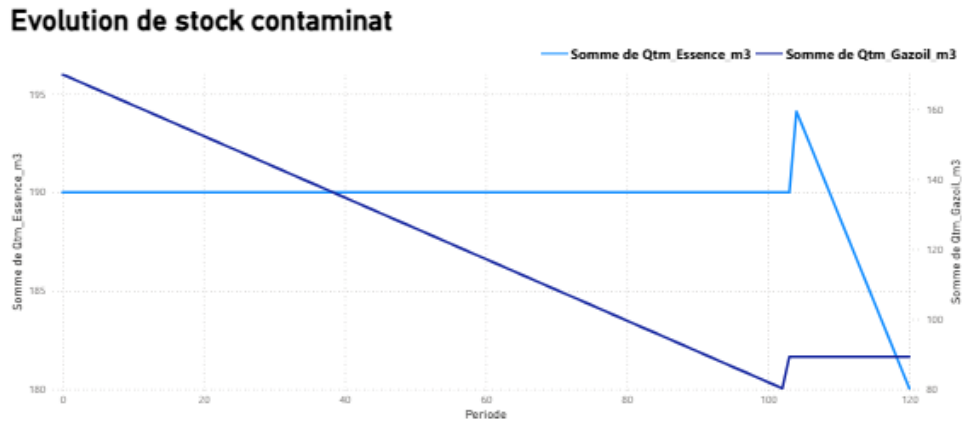


FIG. 5.9 : Évolution du stock de contaminant C1/SBA Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : Le profil est quasi identique au scénario de faible demande : décroissance progressive du contaminant essence depuis le niveau initial, puis pic côté gazole vers la période 100, correspondant à l'arrivée du lot SP lancé à J8 10:00 (YA1 à J9 14:00). L'amplitude du pic est comparable d'un scénario à l'autre, car le volume d'interface q_{tm} est une constante physique du pipeline, indépendante du niveau de demande. Les deux courbes décroissent après le pic, confirmant la consommation progressive du contaminant résiduel en fin d'horizon.

Scénario de Forte Demande

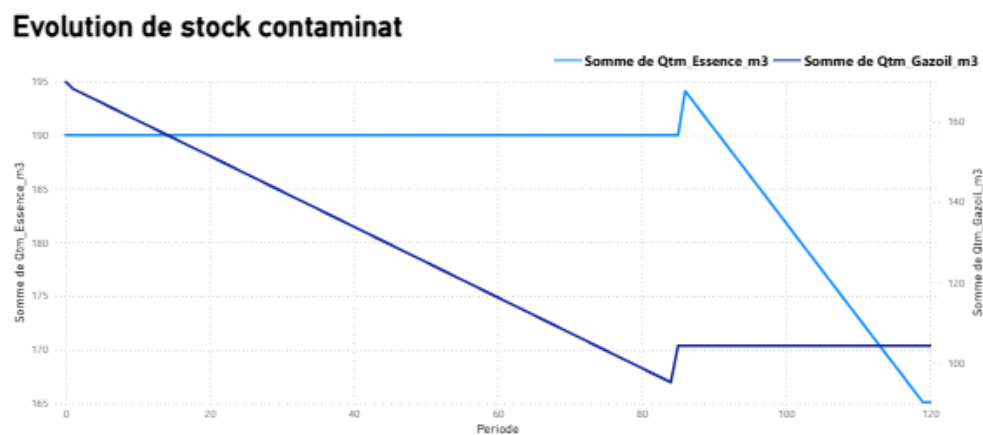


FIG. 5.10 : Évolution du stock de contaminant C1/SBA Scénario de Forte Demande

Interprétation : La structure est identique aux deux scénarios précédents, mais le pic de contaminant gazole apparaît plus tôt, vers la période 80–90, cohérent avec la transition

GO→SP intervenant à J6 20:00 dans le diagramme de Gantt (YA1 à J8 00:00, soit période 84). Après le pic, les deux courbes décroissent jusqu'en fin d'horizon.

Dans les trois scénarios, **un seul pic de contaminant est observable** sur l'ensemble de l'horizon, confirmant que CPLEX a minimisé les transitions produit à une unique transition GO→SP par segment. Ce résultat valide l'efficacité du modèle MILP à réduire au minimum les volumes de contaminant d'interface générés et les pertes de produit associées, quel que soit le niveau de demande considéré.

5.3.4 Quantités Estimées Servies C1/SBA

Analyse commune aux trois scénarios : Les graphiques de quantités journalières servies à C1/SBA révèlent une **régularité remarquable** sur l'ensemble de l'horizon de 10 jours pour les trois scénarios. À partir du Jour 2, les quantités servies sont quasi constantes et égales aux demandes nominales définies dans le Tableau 4.6.

La **valeur légèrement inférieure observée au Jour 1** pour les deux produits s'explique par le fait que la **période 0** ($ta = 0$) **enregistre une quantité servie nulle** : à l'instant initial de l'horizon de planification, le système vient d'être mis en route et le mécanisme de distribution n'est pas encore activé. Ainsi, la quantité journalière servie au Jour 1 correspond à la somme des quantités servies sur les **périodes 1 à 11 uniquement** (soit 11 périodes sur 12), la période 0 contribuant pour une valeur nulle. En revanche, à partir du Jour 2, chaque journée agrège les quantités servies sur 12 périodes complètes, atteignant et maintenant la valeur nominale de la demande. Il s'agit donc d'un **artefact de la discrétisation temporelle** à la frontière initiale de l'horizon, et non d'une rupture ou d'une défaillance du modèle.

Scénario de Faible Demande

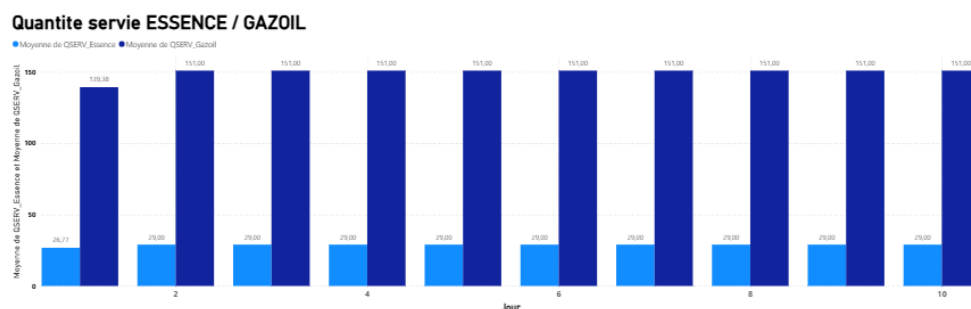


FIG. 5.11 : Quantités estimées servies journalières C1/SBA Scénario de Faible Demande

Interprétation : Les barres de gazole sont constantes à $151 \text{ m}^3/\text{jour}$ et les barres d'essence à $29 \text{ m}^3/\text{jour}$ sur les 10 jours, à l'exception du Jour 1 où la barre d'essence est légèrement inférieure ($\approx 26,71 \text{ m}^3$), pour les raisons expliquées ci-dessus. La demande du Jour 1 est

néanmoins satisfaite depuis les cuves, sans attendre l'arrivée du pipeline. À partir de J2, la contrainte $QSERV(p, ta, 1) = dem(p, ta, 1)$ est rigoureusement respectée sur l'ensemble de l'horizon, validant la satisfaction complète de la demande avec un **taux de service de 100 %**.

Scénario de Moyenne Demande

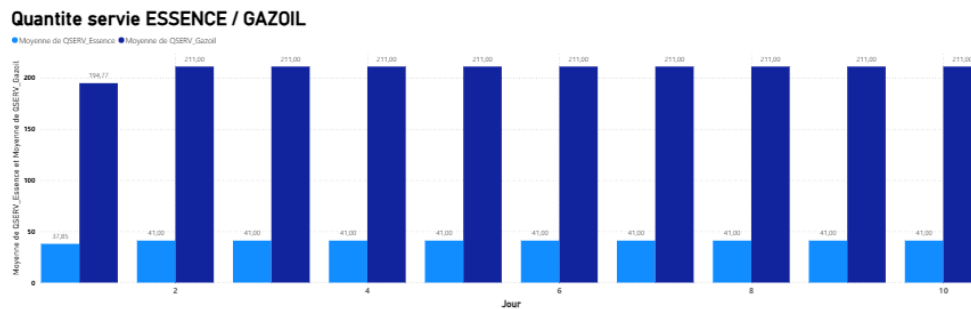


FIG. 5.12 : Quantités estimées servies journalières C1/SBA Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : Les barres de gazole sont constantes à $211 \text{ m}^3/\text{jour}$ et les barres d'essence à $41 \text{ m}^3/\text{jour}$ à partir de J2, avec une légère variation au Jour 1 ($\approx 37,81 \text{ m}^3$ en essence et $\approx 204,17 \text{ m}^3$ en gazole), due à la quantité nulle à la période 0. Le lissage parfait à partir de J2 confirme que le modèle distribue la demande de façon uniforme sur l'horizon, le pipeline alimentant en continu les cuves de C1/SBA selon le planning optimal issu de CPLEX.

Scénario de Forte Demande

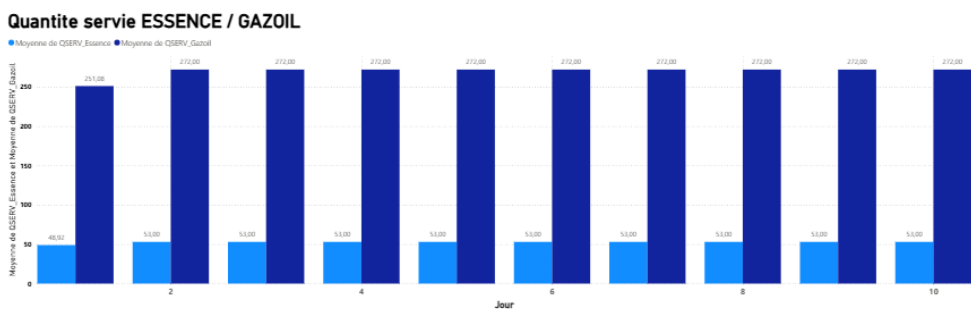


FIG. 5.13 : Quantités estimées servies journalières C1/SBA Scénario de Forte Demande

Interprétation : Les barres de gazole atteignent $272 \text{ m}^3/\text{jour}$ et les barres d'essence $53 \text{ m}^3/\text{jour}$ à partir de J2, avec une barre J1 légèrement inférieure ($\approx 48,52 \text{ m}^3$ en essence), satisfaite depuis les stocks initiaux en cuve. C'est le scénario où C1/SBA est le plus sollicité : les quantités servies sont les plus élevées de l'étude. Le lissage parfait à partir de J2 confirme que CPLEX a planifié les approvisionnements de manière à garantir un service continu et uniforme sur

l'ensemble de l'horizon, avec un **taux de service de 100 %** pour les deux produits dans les trois scénarios.

5.4 Résultats du Centre C2 / REM (Remchi)

Le centre C2/REM est le premier centre terminal du réseau ASRN, alimenté depuis C1/SBA via un segment de 83 km avec un délai de transit de 9 périodes (18h). Sa capacité de stockage est de 14 000 m³ pour l'essence et 22 000 m³ pour le gazole.

5.4.1 Vue générale Tableau de bord Power BI (C2/REM)



FIG. 5.14 : Tableau de bord Power BI Centre C2/REM Vue générale (trois scénarios)

Interprétation. Le tableau de bord Power BI du centre C2/REM affiche, pour le scénario de forte demande sélectionné par défaut, une essence distribuée de **13 m³/période** et un gazole distribué de **22 m³/période**, pour un **taux de service de 100 %** dans les trois scénarios. Les taux de remplissage des cuves sont de **78,70 %** pour l'essence et **90,62 %** pour le gazole. Ces taux nettement plus élevés qu'à C1/SBA s'expliquent par la capacité de stockage plus limitée de C2/REM (14 000 m³ en essence et 22 000 m³ en gazole), qui opère donc à un taux d'utilisation plus élevé pour assurer la continuité du service.

5.4.2 Évolution du Stock de Produits Purs C2/REM

Analyse commune aux trois scénarios. C2/REM est un **centre terminal simple** : il reçoit uniquement depuis C1/SBA et distribue à ses propres stations-service. Sa dynamique de stock est donc plus directe que celle de C1/SBA, mais elle est entièrement pilotée par les décisions de lancement sur YL2, avec un délai de transit de 9 périodes (18h). Grâce à ce délai plus court, les arrivées à C2/REM sont plus rapides qu'à C3/NAA, ce qui confère à ce centre une **réactivité opérationnelle plus grande**.

Interprétation : La courbe d'**essence** (axe gauche) part d'un niveau initial de $\sim 7\,000\text{ m}^3$ et *décroît progressivement* durant les premières 25 périodes environ, sous l'effet des livraisons locales continues ($7\text{ m}^3/\text{p}$) en l'absence de toute réception : le lot SP n'est lancé depuis C1/SBA qu'à **J2 08:00**, auxquelles s'ajoutent **9 périodes de transit** ($9 \times 2\text{h} = 18\text{h}$), reportant l'arrivée effective en C2/REM à **J3 02:00**. À partir de la période 25, la réception du lot SP provoque une remontée forte et rapide du stock jusqu'à un maximum de $\sim 13\,500\text{ m}^3$ atteint vers la période 40. Le stock décroît ensuite très légèrement et se stabilise autour de $\sim 13\,000\text{ m}^3$ jusqu'en fin d'horizon, la faible consommation locale ($7\text{ m}^3/\text{p}$) n'induisant qu'un déstockage marginal.

La courbe de **gazole** (axe droit) part d'un niveau initial de $\sim 12\,000\text{ m}^3$ et remonte rapidement dès les premières périodes jusqu'à un maximum de $\sim 22\,000\text{ m}^3$ atteint vers la période 25, le lot GO ayant été lancé depuis C1/SBA dès **J1 00:00** (arrivée C2/REM à **J1 18:00** après 9 périodes $\times 2\text{h} = 18\text{h}$ de transit). Le stock se stabilise ensuite autour de $\sim 21\,000\text{ m}^3$ jusqu'en fin d'horizon.

Les deux courbes se maintiennent à des niveaux très confortables sur l'ensemble de l'horizon de 10 jours (120 périodes), sans rupture de stock ni dépassement de capacité, ce qui est pleinement cohérent avec le scénario de faible demande : un seul lot par produit suffit à approvisionner le dépôt de Remchi et à y maintenir des niveaux élevés tout au long de la simulation.

Scénario de Moyenne Demande

Evolution de stock des produits purs

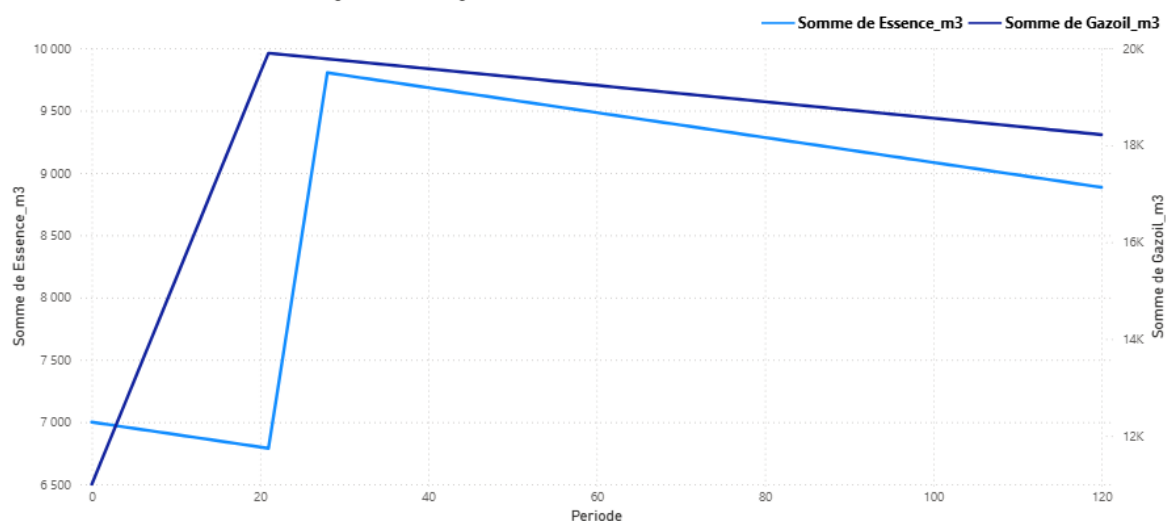


FIG. 5.15 : Évolution du stock de produits purs C2/REM Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : La courbe d'**essence** (axe gauche) part d'un niveau initial de $\sim 7\,000\text{ m}^3$ et *décroît progressivement* jusqu'à $\sim 6\,700\text{ m}^3$ durant les premières 27 périodes environ, sous

l'effet de la consommation locale continue en l'absence de toute réception : le lot SP est lancé depuis C1/SBA à **J2 00:00**, et après 9 périodes de transit ($9 \times 2h = 18h$), n'arrive en C2/REM qu'à **J2 18:00** (période 27). À partir de la période 27, la réception du lot SP provoque une remontée forte et rapide jusqu'à un maximum de $\sim 9\,700\text{ m}^3$ atteint vers la période 28–30. Le stock décroît ensuite *progressivement* et de manière continue jusqu'à $\sim 8\,900\text{ m}^3$ en fin d'horizon (période 120), sous l'effet d'une consommation locale plus soutenue qu'en scénario de faible demande.

La courbe de **gazole** (axe droit) part d'un niveau initial de $\sim 11\,000\text{ m}^3$ et remonte rapidement jusqu'à un maximum de $\sim 20\,000\text{ m}^3$ atteint vers la période 22, le lot GO ayant été lancé depuis C1/SBA dès **J1 00:00** (arrivée C2/REM à **J1 18:00** après 9 périodes $\times 2h = 18h$ de transit). Le stock décroît ensuite de façon continue et régulière jusqu'à $\sim 18\,000\text{ m}^3$ en fin d'horizon.

Contrairement au scénario de faible demande où les stocks se stabilisaient à des niveaux très élevés, les deux courbes présentent ici une *décroissance régulière* après le pic de réception, traduisant l'effet d'une demande intermédiaire plus consommatrice. Les niveaux restent néanmoins suffisants sur l'ensemble de l'horizon de 10 jours (120 périodes), sans rupture de stock ni dépassement de capacité.

Scénario de Forte Demande

Evolution de stock des produits purs

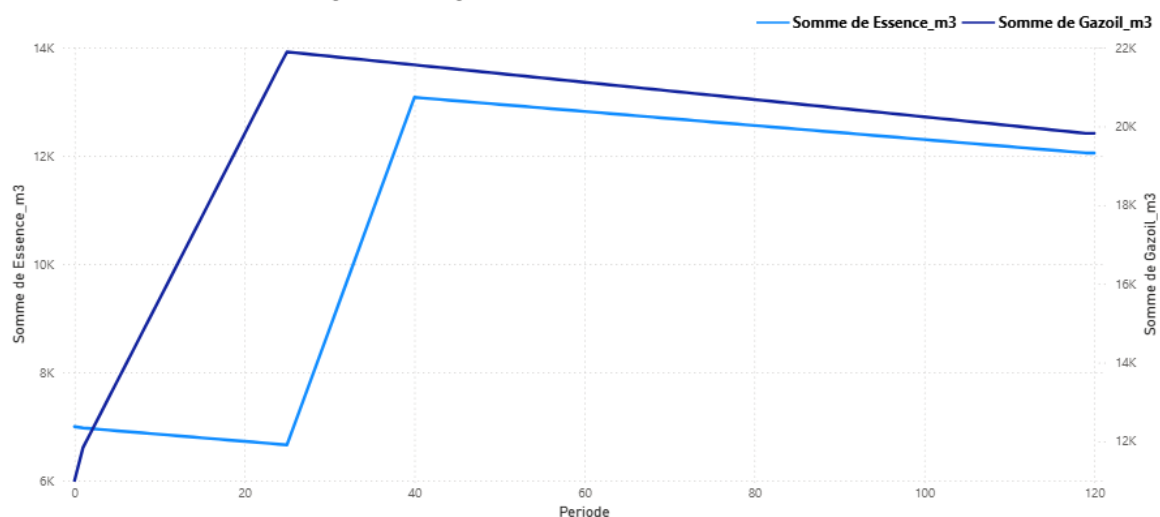


FIG. 5.16 : Évolution du stock de produits purs C2/REM Scénario de Forte Demande

Interprétation : La courbe d'**essence** (axe gauche) part d'un niveau initial de $7\,000\text{ m}^3$, descend jusqu'à un minimum de $\sim 6\,000\text{ m}^3$ avant de remonter vers $\sim 14\,000\text{ m}^3$ grâce à l'arrivée du lot SP (arrivée REM à J3 02:00), puis décroît progressivement sous l'effet de la consommation locale ($13\text{ m}^3/p$).

La courbe de **gazole** (axe droit) présente les fluctuations les plus importantes de ce centre : elle oscille entre $\sim 11\,000$ et $\sim 22\,000\text{ m}^3$, révélant une tension plus forte entre consommation et approvisionnement. Malgré cette pression maximale, le stock ne descend jamais en dessous du seuil critique, attestant de la qualité du planning optimal. La capacité de stockage plus limitée de C2/REM ($22\,000\text{ m}^3$ en gazole) impose une gestion plus serrée des arrivées, ce qui se traduit par des oscillations plus marquées que dans les deux autres scénarios.

5.4.3 Évolution du Stock de Contaminant C2/REM

Analyse commune aux trois scénarios. Les courbes de contaminant à C2/REM présentent une morphologie similaire à C1/SBA, avec une **décroissance globale** et un **pic transitoire** correspondant à la transition de produit sur YL2. Ce pic est toutefois **plus étroit et plus précoce** qu'à C1/SBA, en raison du délai de transit plus court (9 périodes) : la transition de produit sur YL2 se répercute plus rapidement en arrivée YA2. Dans les trois scénarios, les volumes de contaminant à C2/REM sont inférieurs à ceux de C1/SBA, ce qui est cohérent avec les volumes de lots plus petits transitant sur ce segment.

Scénario de Faible Demande

Evolution de stock contaminat

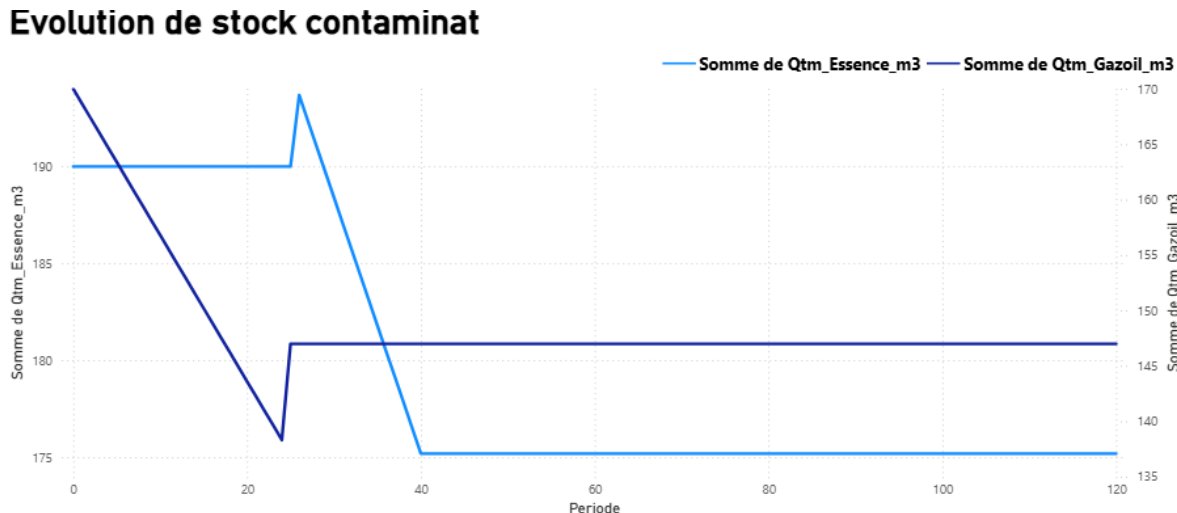


FIG. 5.17 : Évolution du stock de contaminant C2/REM Scénario de Faible Demande

Interprétation : Le stock de contaminant essence part d'un niveau initial de $\sim 190\text{ m}^3$ et décroît progressivement sur l'ensemble de l'horizon. Un pic est visible vers la période 20, correspondant à l'arrivée de l'interface GO→SP générée lors de la transition de produit sur YL2 (arrivée à REM après 9 périodes de transit). Ce pic est suivi d'une décroissance rapide jusqu'à la fin de l'horizon, traduisant la correction efficace du contaminant. Le contaminant gazole suit un profil décroissant stable, sans pic notable, car la transition sur YL2 n'implique qu'un seul changement de produit dans ce scénario.

Scénario de Moyenne Demande

Evolution de stock contaminat

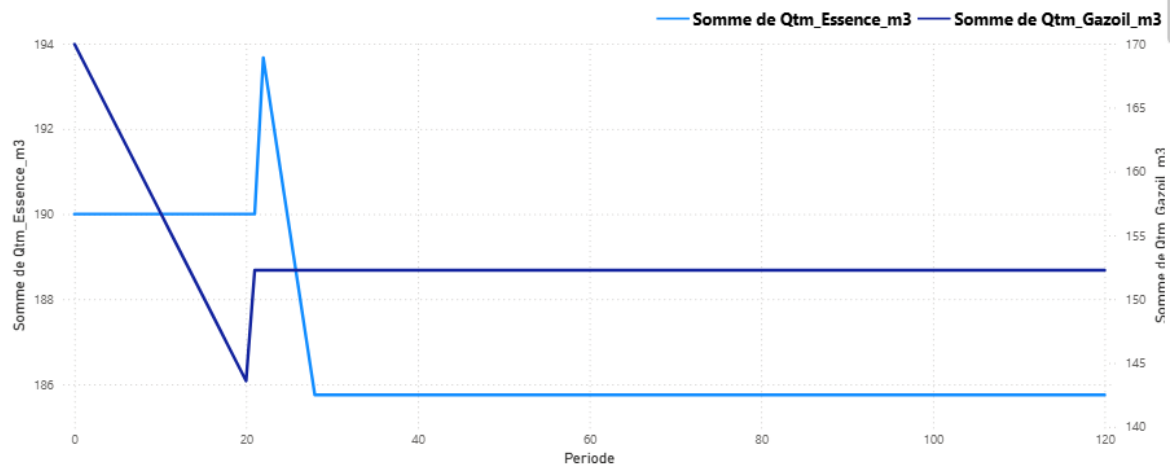


FIG. 5.18 : Évolution du stock de contaminant C2/REM Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : Le profil est structurellement identique au scénario de faible demande, avec un pic de contaminant essence vers la période 20 correspondant à la même transition GO→SP sur YL2. L'amplitude du pic est comparable entre les deux scénarios, confirmant que le volume d'interface q_{tm} est une constante physique indépendante du niveau de demande. La décroissance après le pic est légèrement plus lente qu'en faible demande, reflétant un volume de distribution légèrement plus important ($10 \text{ m}^3/\text{p}$ vs $7 \text{ m}^3/\text{p}$ en essence).

Scénario de Forte Demande

Evolution de stock contaminat

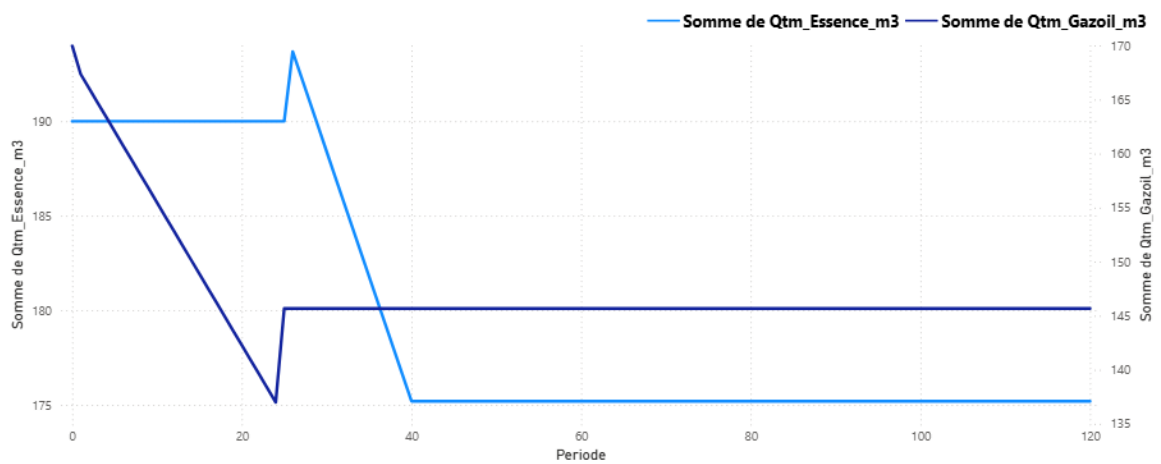


FIG. 5.19 : Évolution du stock de contaminant C2/REM Scénario de Forte Demande

Interprétation : Le pic de contaminant essence apparaît également vers la période 20, cohérent avec la transition GO→SP sur YL2 planifiée à J1 00:00 dans le diagramme de Gantt (arrivée à REM à J1 18:00, soit période 9). L’amplitude du pic est légèrement plus prononcée qu’en moyenne demande, reflétant les volumes plus importants transitant sur ce segment. Dans les trois scénarios, **un seul pic de contaminant** est observable à C2/REM, confirmant la minimisation des transitions produit par CPLEX sur l’ensemble du réseau.

5.4.4 Quantités Estimées Servies C2/REM

Analyse commune aux trois scénarios. Les graphiques de quantités journalières servies à C2/REM montrent également une **régularité de service dès le Jour 2**, avec une valeur légèrement inférieure au Jour 1 pour les mêmes raisons que celles expliquées pour C1/SBA : la quantité nulle à la période 0 réduit la somme journalière du Jour 1 à 11 périodes au lieu de 12. À partir du Jour 2, les quantités nominales sont atteintes et maintenues sur l’ensemble de l’horizon.

Scénario de Faible Demande

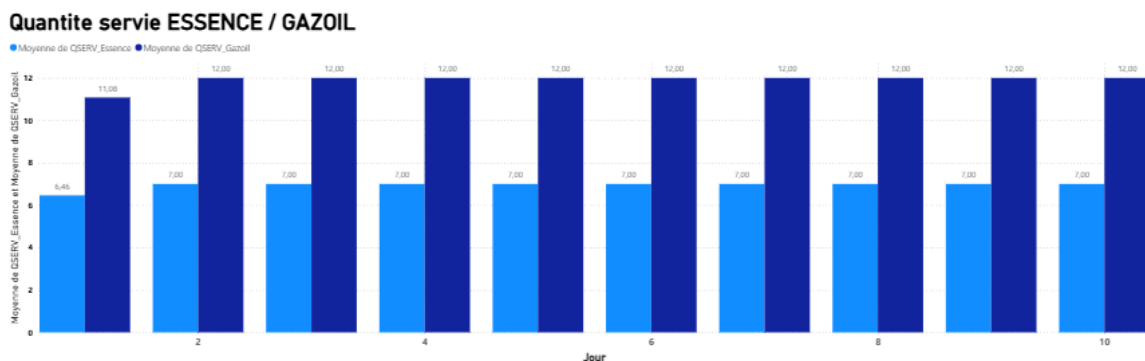


FIG. 5.20 : Quantités estimées servies journalières C2/REM Scénario de Faible Demande

Interprétation : Les barres de gazole sont constantes à 12 m³/jour et les barres d’essence à 7 m³/jour sur les 10 jours, à l’exception du Jour 1 où les valeurs sont légèrement inférieures en raison de la quantité nulle à la période 0. Le profil est très régulier, cohérent avec la faible demande et le stock confortable maintenu sur l’ensemble de l’horizon.

Scénario de Moyenne Demande

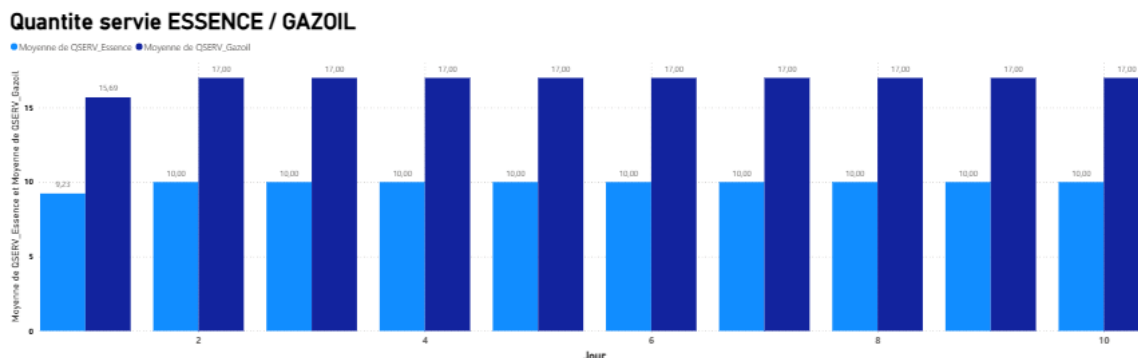


FIG. 5.21 : Quantités estimées servies journalières C2/REM Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : Les barres de gazole sont constantes à $17 \text{ m}^3/\text{jour}$ et les barres d'essence à $10 \text{ m}^3/\text{jour}$ à partir de J2, avec une légère variation au Jour 1. Le service est assuré de manière uniforme sur l'ensemble de l'horizon, confirmant le taux de service de 100 % pour ce scénario.

Scénario de Forte Demande

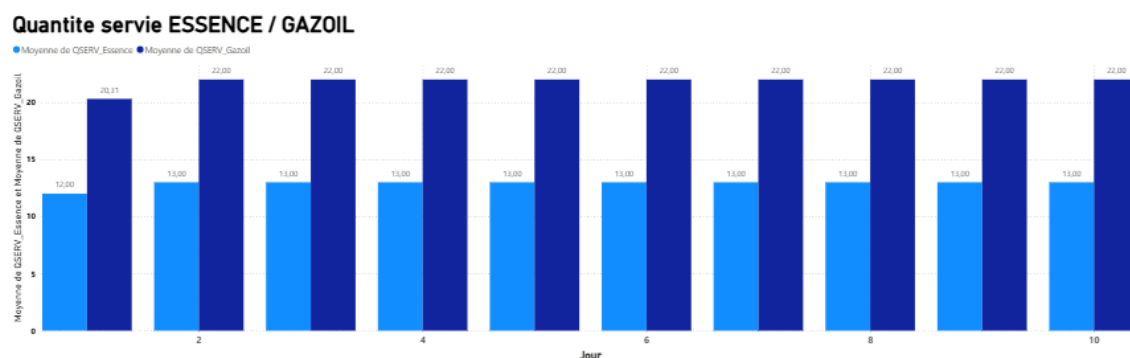


FIG. 5.22 : Quantités estimées servies journalières C2/REM scénario de Forte Demande

Interprétation. Les barres de gazole atteignent $22 \text{ m}^3/\text{jour}$ et les barres d'essence $13 \text{ m}^3/\text{jour}$ à partir de J2, avec une valeur légèrement inférieure au Jour 1. C'est le scénario où C2/REM est le plus sollicité. Malgré la capacité de stockage plus limitée de ce centre, CPLEX parvient à garantir un service continu et uniforme sur l'ensemble des 10 jours, avec un **taux de service de 100 %** pour les deux produits.

5.5 Résultats du Centre C3 / NAA (Naâma)

Le centre C3/NAA est le nouveau centre de stockage et de distribution introduit dans le réseau étendu ASRN. Situé à 270 km de C1/SBA, il est caractérisé par le délai de transit le plus long du réseau ($AR(C3) = 20$ périodes = 40h), ce qui impose une anticipation plus importante dans la planification des lancements depuis C1/SBA. L'intégration de ce centre constitue l'apport principal de ce travail, visant à réduire la dépendance au transport routier pour l'approvisionnement du Sud-Ouest algérien.

5.5.1 Vue générale — Tableau de bord Power BI (C3/NAA)



FIG. 5.23 : Tableau de bord Power BI Centre C3/NAA Vue générale (trois scénarios)

Interprétation : Le tableau de bord Power BI du centre C3/NAA affiche, pour le scénario de forte demande sélectionné par défaut, une essence distribuée de **13 m³/période** et un gazole distribué de **23 m³/période**, pour un **taux de service de 100 %** dans les trois scénarios. Les taux de remplissage des cuves sont de **60,87 %** pour l'essence et **89,97 %** pour le gazole. La capacité totale du centre est de 14 000 m³ pour l'essence et 32 000 m³ pour le gazole. Le taux d'utilisation élevé du gazole (89,97 %) reflète l'importance du stock tampon nécessaire pour compenser le délai de transit de 40h, le plus long du réseau.

5.5.2 Évolution du Stock de Produits Purs C3/NAA

Analyse commune aux trois scénarios. C3/NAA est le centre le plus éloigné du réseau (270 km, transit 20 périodes = 40h). Sa dynamique de stock est fondamentalement différente des deux autres centres : le **stock initial constitue le seul tampon disponible pendant les deux premiers jours**, avant l'arrivée du premier lot YA3. Cette contrainte d'anticipation,

explicitement gérée par CPLEX, explique le profil caractéristique des courbes de stock à C3/NAA.

Scénario de Faible Demande

Evolution de stock des produits purs

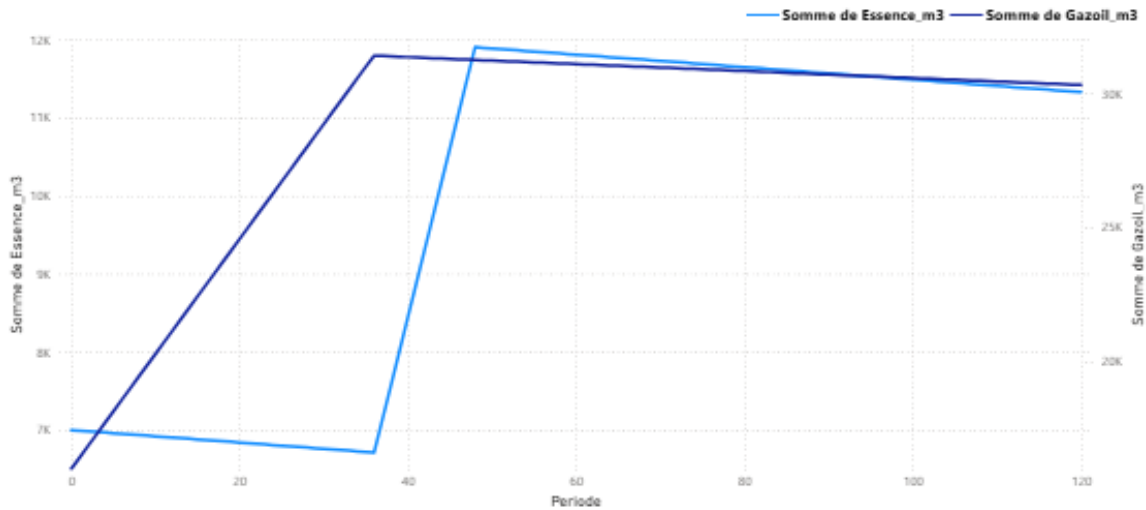


FIG. 5.24 : Évolution du stock de produits purs C3/NAA Scénario de Faible Demande

Interprétation : La courbe d'essence (axe gauche) part d'un niveau initial de $\sim 7\,000\text{ m}^3$ et décroît légèrement pendant les premières périodes, sous l'effet de la faible consommation locale ($8\text{ m}^3/\text{p}$). Elle remonte progressivement après la période 40 grâce aux arrivées YA3, et se stabilise à un niveau confortable en fin d'horizon. La faible demande limite considérablement le risque de tension sur ce centre.

La courbe de **gazole** (axe droit) part d'un niveau de départ élevé et atteint un maximum vers la période 40, correspondant à l'arrivée du lot GO lancé à J1 00:00 (YA3 à J2 16:00, soit 20 périodes de transit), puis se stabilise à un niveau élevé ($\sim 30\,000\text{ m}^3$) grâce au faible débit de consommation ($13\text{ m}^3/\text{p}$). Le stock reste dans une plage très confortable sur l'ensemble des 10 jours.

Scénario de Moyenne Demande

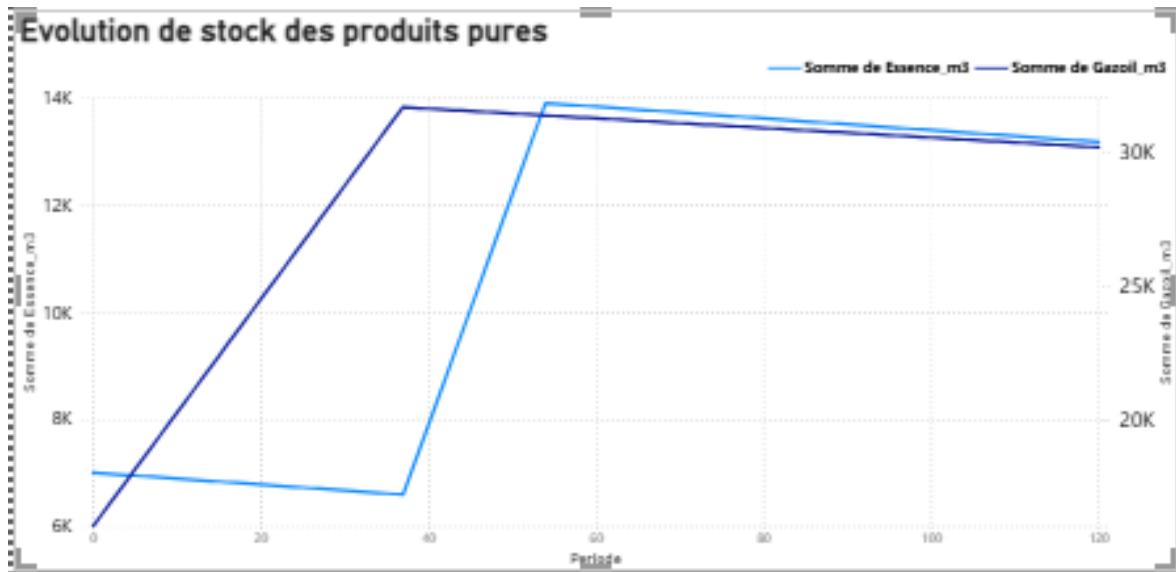


FIG. 5.25 : Évolution du stock de produits purs C3/NAA Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : Le centre de Naâma (C3/NAA) est desservi *directement* depuis C1/SBA avec un délai de transit de **20 périodes** ($20 \times 2h = 40h$), ce qui constitue le délai le plus long du réseau ASRN.

La courbe d'**essence** (axe gauche) part d'un niveau initial de $\sim 7\,000\text{ m}^3$ et *décroît progressivement* jusqu'à $\sim 6\,593\text{ m}^3$ à la période 37, sous l'effet de la consommation locale continue en l'absence de toute réception : le lot SP est lancé depuis C1/SBA à **J2 10:00** et, après 20 périodes de transit ($20 \times 2h = 40h$), n'arrive en C3/NAA qu'à **J4 02:00**. À partir de la période 37, la réception du lot SP provoque une remontée forte et rapide jusqu'à un maximum de $\sim 13\,500\text{ m}^3$. Le stock décroît ensuite progressivement jusqu'à $\sim 12\,000\text{ m}^3$ en fin d'horizon (période 120), sous l'effet de la consommation locale soutenue.

La courbe de **gazole** (axe droit) part d'un niveau initial de $\sim 16\,000\text{ m}^3$ et remonte rapidement jusqu'à un maximum de $\sim 31\,000\text{ m}^3$ atteint vers la période 20, le lot GO ayant été lancé depuis C1/SBA dès **J1 00:00** (arrivée C3/NAA à **J2 16:00** après $20 \text{ périodes} \times 2h = 40h$ de transit). Le stock décroît ensuite très légèrement et de façon régulière jusqu'à $\sim 30\,000\text{ m}^3$ en fin d'horizon, traduisant une consommation locale modérée de gazole.

Le délai de transit élevé (20 périodes) propre à la liaison SBA→Naâma explique la *longue phase de déstockage initial* observée sur la courbe d'essence avant toute réception. Les niveaux restent néanmoins suffisants sur l'ensemble de l'horizon de 10 jours (120 périodes), sans rupture de stock ni dépassement de capacité.

Scénario de Forte Demande

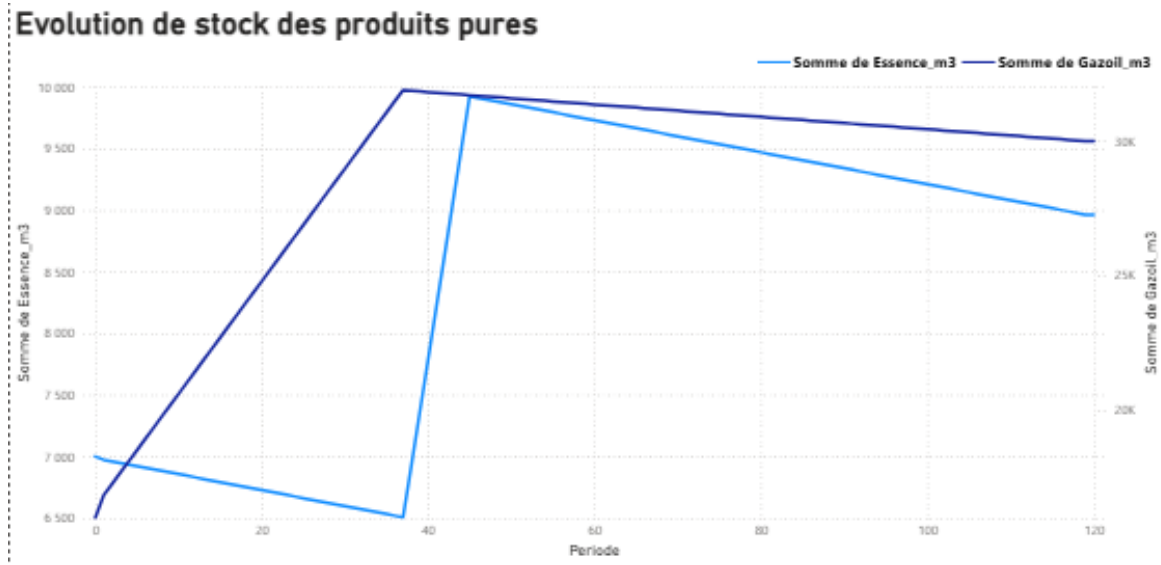


FIG. 5.26 : Évolution du stock de produits purs C3/NAA Scénario de Forte Demande

Interprétation : C'est dans ce scénario que les contraintes d'anticipation liées au délai de transit de 40h sont les plus visibles. La courbe d'**essence** (axe gauche) présente une décroissance initiale prononcée, descendant jusqu'à ~6 500 m³ avant la période 40, puis remonte grâce aux arrivées YA3 pour atteindre un niveau final acceptable.

La courbe de **gazole** (axe droit) oscille entre 20 000 et 30 000 m³, révélant une tension plus marquée entre consommation (23 m³/p) et approvisionnement. Malgré cette pression maximale, **aucune rupture n'est enregistrée** sur l'ensemble de l'horizon, validant la pertinence du délai d'anticipation de 20 périodes intégré dans le modèle et l'efficacité de la planification optimale issue de CPLEX pour ce centre isolé à forte contrainte de transit.

5.5.3 Évolution du Stock de Contaminant C3/NAA

Analyse commune aux trois scénarios. Les courbes de contaminant à C3/NAA présentent le **pic le plus tardif** des trois centres, ce qui est parfaitement cohérent avec le délai de transit le plus long du réseau (20 périodes). La transition de produit sur YL3, visible sur les diagrammes de Gantt respectifs, ne se traduit en arrivée contaminante à C3/NAA qu'après 40h, créant ce pic décalé vers les périodes 35–45. Ce décalage temporel, bien capturé par le modèle, illustre l'importance du paramètre $AR(C3)$ dans la planification des transitions.

Scénario de Faible Demande

Evolution de stock contaminat

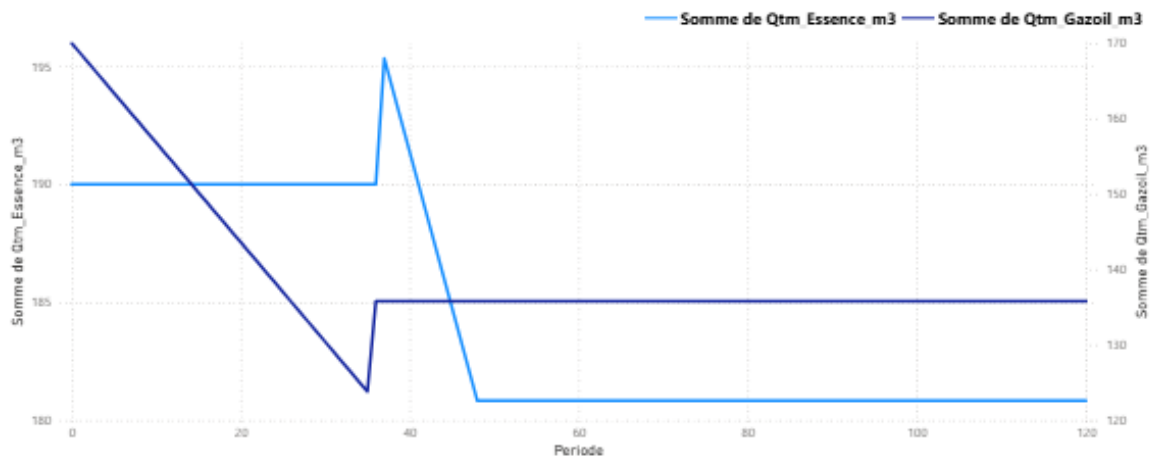


FIG. 5.27 : Évolution du stock de contaminant C3/NAA Scénario de Faible Demande

Interprétation : Le stock de contaminant essence part d'un niveau initial de $\sim 190 \text{ m}^3$ et décroît progressivement. Un pic est visible vers la période 35–40, correspondant à l'arrivée de l'interface GO→SP générée lors de la transition de produit sur YL3 (arrivée à NAA après 20 périodes de transit). Ce pic est suivi d'une décroissance rapide, le contaminant étant progressivement corrigé et distribué. La décroissance finale confirme l'efficacité du mécanisme de correction du contaminant dans ce scénario.

Scénario de Moyenne Demande

Evolution de stock contaminat

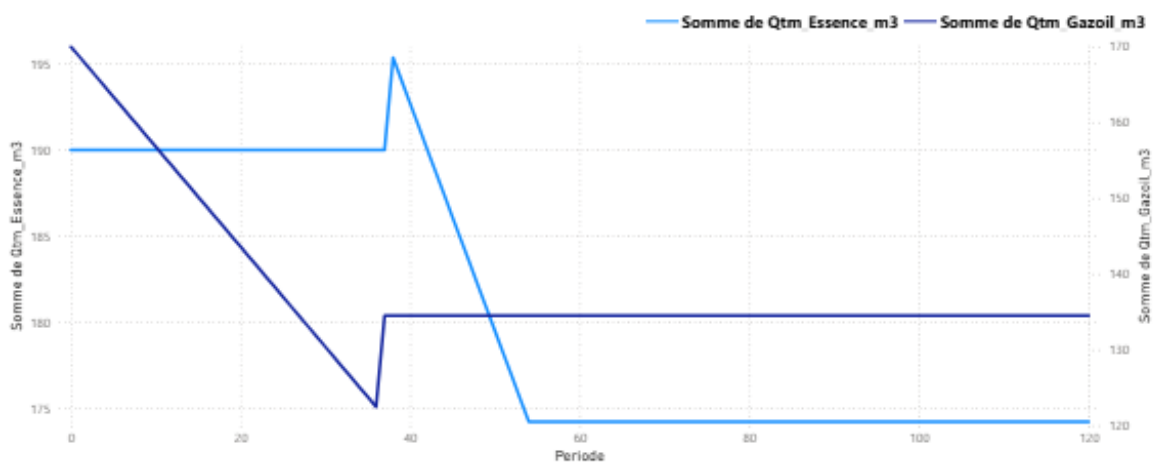


FIG. 5.28 : Évolution du stock de contaminant C3/NAA Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : Le profil est structurellement similaire au scénario de faible demande, avec un pic de contaminant vers les mêmes périodes. L’amplitude du pic reste comparable, car le volume d’interface q_{tm} est une constante physique du pipeline. La décroissance après le pic est légèrement plus rapide qu’en faible demande, reflétant une distribution plus active des produits ($11 \text{ m}^3/\text{p}$ vs $8 \text{ m}^3/\text{p}$ en essence).

Scénario de Forte Demande

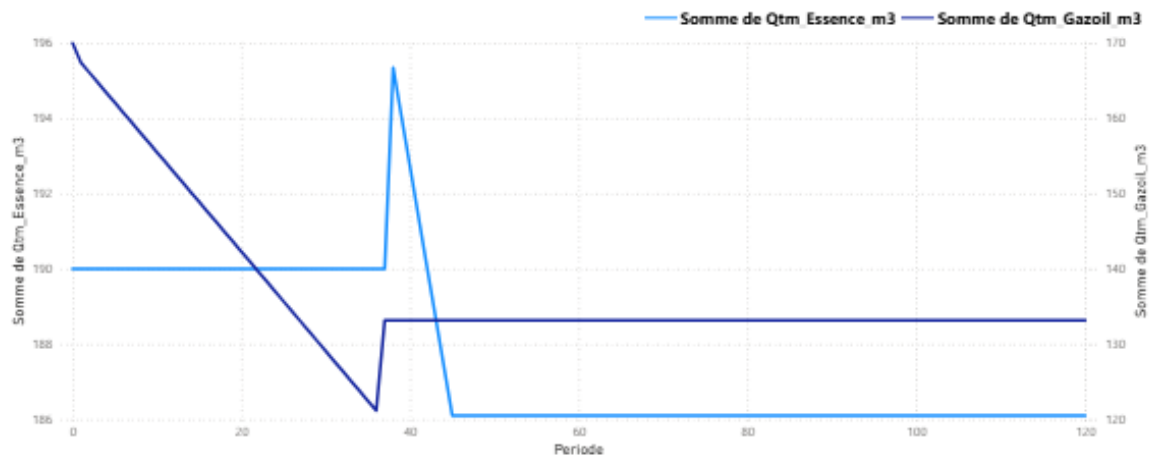


FIG. 5.29 : Évolution du stock de contaminant C3/NAA Scénario de Forte Demande

Interprétation : Le pic de contaminant essence apparaît vers la période 40–45, cohérent avec la transition GO→SP sur YL3 planifiée à J2 12:00 dans le diagramme de Gantt (YA3 à J4 04:00, soit période 40). L’amplitude du pic est légèrement plus prononcée qu’en moyenne demande, reflétant les volumes plus importants transitant sur ce segment. Dans les trois scénarios, un seul pic de contaminant est observable à C3/NAA, confirmant que CPLEX minimise les transitions produit à une unique transition GO→SP par segment sur l’ensemble du réseau.

5.5.4 Quantités Estimées Servies C3/NAA

Analyse commune aux trois scénarios. Les graphiques de quantités journalières servies à C3/NAA montrent une **régularité de service dès le Jour 2**, avec une valeur légèrement inférieure au Jour 1 pour les mêmes raisons que celles expliquées pour C1/SBA et C2/REM. Ce résultat est particulièrement significatif pour C3/NAA, dont l’intégration dans le réseau étendu ASR(N) constitue le principal apport de ce travail.

Scénario de Faible Demande

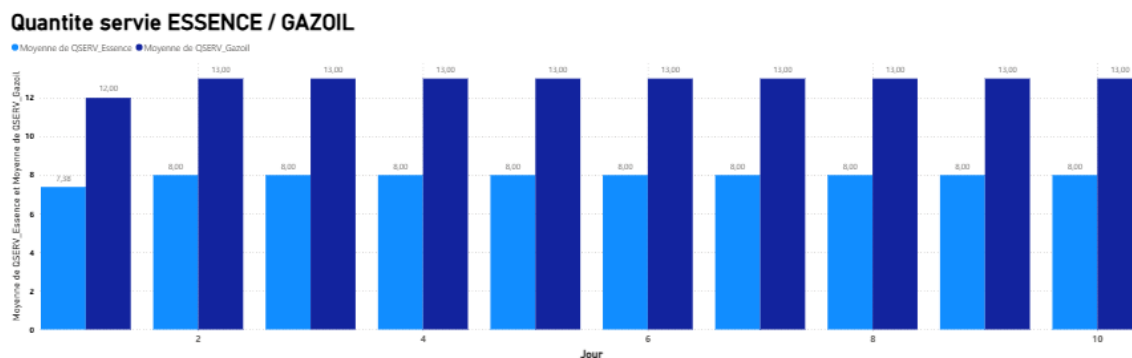


FIG. 5.30 : Quantités estimées servies journalières C3/NAA Scénario de Faible Demande

Interprétation : Les barres de gazole sont constantes à 13 m³/jour et les barres d'essence à 8 m³/jour sur les 10 jours, à l'exception du Jour 1 où les valeurs sont légèrement inférieures. Malgré le délai de transit de 40h, le service est assuré de manière continue depuis les stocks initiaux, sans rupture sur l'ensemble de l'horizon.

Scénario de Moyenne Demande

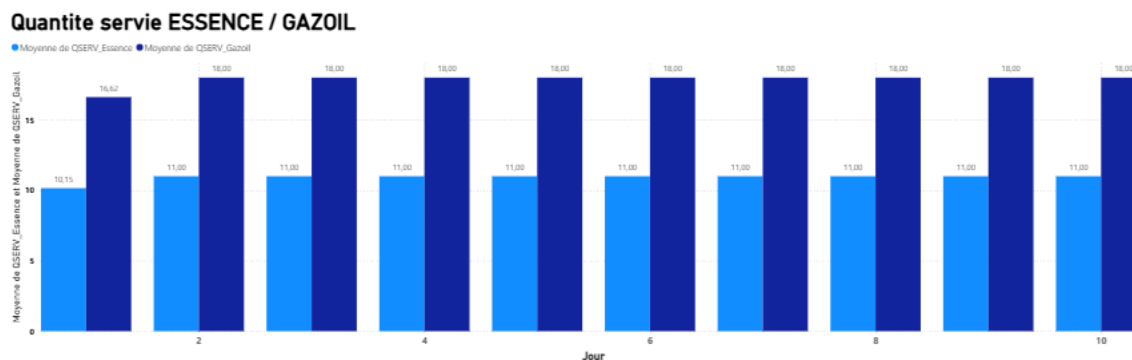


FIG. 5.31 : Quantités estimées servies journalières C3/NAA Scénario de Moyenne Demande

Interprétation : Les barres de gazole sont constantes à 18 m³/jour et les barres d'essence à 11 m³/jour à partir de J2. Le service est régulier et uniforme sur l'ensemble de l'horizon, confirmant le taux de service de 100 % pour ce scénario malgré la contrainte de transit de 40h.

Scénario de Forte Demande

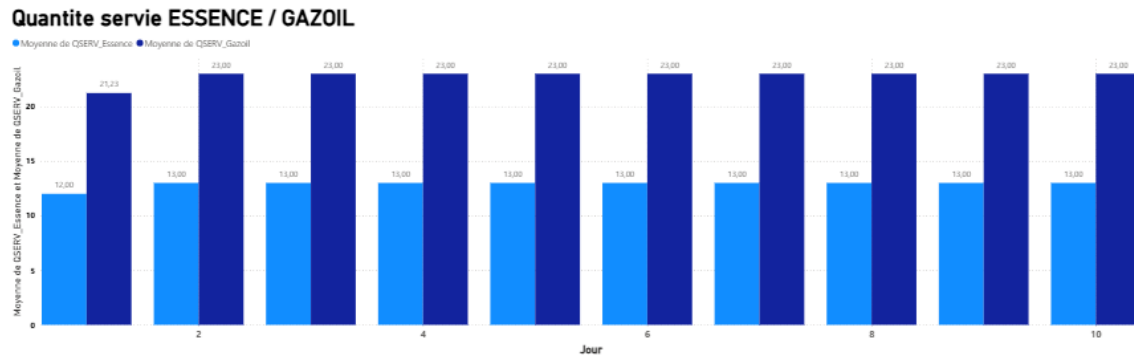


FIG. 5.32 : Quantités estimées services journalières C3/NAA Scénario de Forte Demande

Interprétation : Les barres de gazole atteignent $23 \text{ m}^3/\text{jour}$ et les barres d'essence $13 \text{ m}^3/\text{jour}$ à partir de J2. C'est le scénario où la contrainte de transit de 40h est la plus critique : le stock initial doit couvrir seul les besoins pendant les deux premiers jours. Malgré cette difficulté, CPLEX garantit un service continu et uniforme sur l'ensemble des 10 jours, avec un **taux de service de 100 %** pour les deux produits. Ce résultat démontre la faisabilité de l'approvisionnement de Naâma par pipeline dans tous les scénarios de demande, validant ainsi l'intérêt de l'extension du réseau ASRN vers ce centre.

5.5.5 Impact de la demande estimée sur la contamination

L'analyse comparative des résultats des trois scénarios met en évidence une relation directe entre le niveau de demande estimée et les indicateurs de contamination du réseau. Plus la demande augmente, plus le solveur est contraint de planifier des lots d'essence plus importants, ce qui allonge la durée de la transition GO→SP dans le pipeline et augmente mécaniquement le volume de contaminant d'interface généré. Cependant, dans les trois scénarios, CPLEX converge vers une solution présentant une unique transition par segment, minimisant ainsi les pertes de produit tout en satisfaisant intégralement la demande.

5.5.6 Apport de l'extension vers le centre C3/Naâma

L'intégration du centre C3/NAA dans le réseau étendu ASRN constitue l'apport principal de ce travail. Les résultats obtenus démontrent que ce centre peut être approvisionné de manière fiable et optimale par pipeline dans les trois scénarios de demande, avec un taux de service de 100 % dans tous les cas. Malgré le délai de transit de 20 périodes (40h) (le plus long du réseau) et la distance de 270 km depuis C1/SBA, le modèle MILP parvient à planifier lesancements avec suffisamment d'anticipation pour éviter toute rupture d'approvisionnement. Ce résultat valide la faisabilité technique et opérationnelle de la substitution du transport routier par le pipeline pour l'approvisionnement du Sud-Ouest algérien.

5.6 Conclusion

Au terme de ce chapitre, l'analyse des résultats issus de l'optimisation par CPLEX pour les trois scénarios de demande du réseau étendu ASRN a démontré la robustesse du modèle MILP proposé. Celui-ci garantit un **taux de service de 100 %** pour l'ensemble des centres de distribution C1/Sidi Bel Abbès, C2/Remchi et C3/Naâma, confirmant sa capacité à satisfaire intégralement la demande à chaque période de planification. Par ailleurs, le tableau de bord **Power BI** développé représente un outil d'aide à la décision performant, dont l'intégration dans un système opérationnel de planification s'avère tout à fait envisageable.

Conclusion Générale

Ce mémoire avait pour ambition de traiter, de manière rigoureuse et outillée, la problématique de la planification et de l'optimisation du transport des hydrocarbures dans le pipeline multiproduit de NAFTAL. Partant d'un constat opérationnel concret la nécessité de piloter efficacement les flux sur l'axe Arzew , Sidi Bel Abbès , Remchi , Naâma sous des conditions de demande variables ce travail a progressivement construit une réponse structurée, allant de l'analyse bibliographique jusqu'à la validation numérique des résultats.

Une revue critique de la littérature a d'abord permis de situer la problématique dans le paysage académique et d'identifier les approches les plus pertinentes. Les formulations de type **MILP à temps discret** ont été retenues comme cadre de modélisation, en raison de leur capacité à représenter fidèlement les contraintes opérationnelles du pipeline tout en restant traitables par des solveurs commerciaux de référence. Le modèle développé intègre ainsi les principales contraintes physiques et logistiques du réseau : capacité des réservoirs, niveaux de stock initiaux, demandes journalières par centre et par produit, gestion des volumes de contaminant générés à l'interface entre lots successifs, et continuité des flux sur l'ensemble de l'horizon de planification. Instancié sur les deux configurations du réseau **ASR** et **ASRN** et résolu à l'aide du solveur **IBM ILOG CPLEX**, ce modèle a démontré sa capacité à produire des plannings cohérents et directement exploitables.

Les résultats obtenus, visualisés sous forme de diagrammes de Gantt et de tableaux de bord **Power BI** pour chacun des trois centres Sidi Bel Abbès, Remchi et Naâma ont confirmé la robustesse de l'approche retenue face aux trois scénarios de demande testés. Ils ont également permis de quantifier l'impact de l'extension du réseau vers Naâma, en mettant en lumière les ajustements nécessaires sur les séquences de pompage et les niveaux de stock aux différents nœuds, et en soulignant l'apport stratégique de cette extension pour l'amélioration de la couverture régionale en produits carburants.

Sur le plan des contributions, ce travail offre à NAFTAL un modèle formel et paramétrable pour la planification opérationnelle de son réseau de pipelines, une méthodologie d'analyse par scénarios permettant d'anticiper les effets des fluctuations de la demande, ainsi qu'un outil de visualisation facilitant l'interprétation et la communication des résultats d'optimisation auprès des équipes opérationnelles. Sur le plan académique, il enrichit la littérature existante par une application réelle et documentée des méthodes MILP à un réseau multiproduit algérien, jusqu'ici peu traité dans ce cadre formel.

Ce travail ouvre naturellement plusieurs perspectives. L'intégration de l'incertitude sur la demande, à travers une approche stochastique ou robuste, constituerait une extension directe

permettant de renforcer la fiabilité des plannings générés. La prise en compte de contraintes hydrauliques plus fines, comme les profils de pression le long du pipeline ou les régimes transitoires lors des changements de produits, renforcerait encore le réalisme du modèle. Par ailleurs, la démarche méthodologique développée étant générique, elle pourrait être transposée à d'autres réseaux de distribution de NAFTAL ou de SONATRACH, élargissant ainsi son impact à l'échelle du système logistique national. Enfin, le couplage de ce modèle avec un système d'information opérationnel de type SCADA ou ERP représenterait une avancée concrète vers une gestion intelligente et en temps réel des flux d'hydrocarbures.

Au terme de ce travail, il apparaît que les outils de la recherche opérationnelle, loin d'être réservés à un cadre purement théorique, constituent des leviers concrets et mesurables pour répondre aux défis industriels de la distribution pétrolière. À l'heure où NAFTAL engage une réflexion approfondie sur la modernisation et l'extension de ses infrastructures, cette étude espère avoir apporté une contribution utile, aussi bien à la réflexion stratégique de l'entreprise qu'à la communauté scientifique travaillant sur l'optimisation des réseaux de pipelines.

Bibliographie

- [1] Pierre HOUSSIN et Georges WESSELS. *Pétrole — Le transport par pipeline*. Encyclopædia Universalis [en ligne]. 2020. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/petrole-le-transport/> (visité le 10/04/2026).
- [2] Raymond CABET. *Pipeline*. Encyclopædia Universalis [en ligne]. 2020. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/pipeline/> (visité le 10/04/2026).
- [3] ALSF ACADEMIE. *Introduction et contexte de l'industrie pétrolière et gazière*. ALSF Académie [en ligne]. 2020. URL : <https://alsf.academy> (visité le 10/04/2026).
- [4] CONNAISSANCE DES ÉNERGIES. *Transport du pétrole*. Connaissance des Énergies. 2024. URL : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/transport-du-petrole> (visité le 11/04/2026).
- [5] Rashid HUSSAIN, Tiravat ASSAVAPOKEE et Basheer M. KHUMAWALA. « Supply chain management in the petroleum industry : Challenges and opportunities ». In : *International Journal of Global Logistics & Supply Chain Management* (2006). URL : <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/17410390610717786/full/html> (visité le 04/05/2026).
- [6] Sylviane TABARLY, Serge BOURGEAT et Catherine BRAS. *Conduite, pipeline (gazoduc, oléoduc, aqueduc...)* Géoconfluences – ENS de Lyon / DGESCO. 2025. URL : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/pipeline> (visité le 11/04/2026).
- [7] M. KARDACHE et A. LOUNIS. *Exploitation d'une station de pompage*. Cours universitaire. École d'Arzew, IAP, 2015.
- [8] Wassila ABDELLAOUI. *Logistique du transport pétrolier*. Rapport technique. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Faculté de Technologie, 2022.
- [9] Mostefa CHAIF et Mohammed Mortada BETAOUAF. « Modélisation et optimisation de la distribution des hydrocarbures dans un pipeline d'hydrocarbures ». Mémoire d'ingénieur, filière Génie Industriel, spécialité Management Industriel et Logistique. École Supérieure des Sciences Appliquées de Tlemcen, 2023. URL : http://thesis.essa-tlemcen.dz:8080/bitstream/handle/STDB_UNAM/454/INGENIORAT%5C%20CHAIF%5C%20BETAOUAF.pdf?sequence=1.
- [10] ENCYCLOPÉDIE DE L'ÉNERGIE – UNIVERSITÉ DE CALGARY. *Pipeline*. Energy Education. 2015. URL : https://energyeducation.ca/Encyclopedie_Energie/index.php/Pipeline (visité le 11/04/2026).
- [11] ANAVEM. *Qu'est-ce que SCADA ? Définition et fonctionnement*. Anavem. 2026. URL : <https://www.anavem.com/fr/explications/what-is-scada-definition-guide> (visité le 11/04/2026).

- [12] CODRA. *SCADA : contrôler efficacement les procédés industriels*. CODRA. 2025. URL : <https://codra.net/fr/actualite/2025/02/scada-efficacite-procedes-industriels/> (visité le 11/04/2026).
- [13] Wassila ABDELLAOUI et Asma BERRICHI. «Optimisation du transport des carburants dans le pipeline multiproduit ASR/NAFTAL par l’approche MILP». Mémoire de master, spécialité Génie Industriel. Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, Faculté de Technologie, 2016. URL : <https://dspace.univ-tlemcen.dz/server/api/core/bitstreams/ada84413-b18b-49b5-8fcc-9d8d74ba60c4/content> (visité le 15/04/2026).
- [14] BUREAU DE LA SÉCURITÉ DES TRANSPORTS DU CANADA. *Rapport d’enquête de pipeline P00H0061*. Bureau de la sécurité des transports du Canada. 2000. URL : <https://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/pipeline/2000/p00h0061/p00h0061.html> (visité le 11/04/2026).
- [15] NAFTAL SPA. *Historique de NAFTAL*. Site officiel NAFTAL. 2024. URL : <https://www.naftal.dz/fr/index.php/a-propos-de-naftal/historique> (visité le 10/04/2026).
- [16] NAFTAL SPA. *À propos de NAFTAL*. Site officiel NAFTAL. 2024. URL : <https://www.naftal.dz/fr/index.php/a-propos-de-naftal> (visité le 10/04/2026).
- [17] NAFTAL SPA. *Historique et organisation NAFTAL*. Scribd. 2012. URL : <https://fr.scribd.com/document/209838482/Historique-Et-Organisation-Naftal-Francais-2012> (visité le 10/04/2026).
- [18] INSTITUT NUMÉRIQUE. *Chapitre I : Présentation de NAFTAL/SPA*. Institut Numérique [en ligne]. 2012. URL : <https://www.institut-numerique.org/chapitre-i-presentation-de-naftalspa-50b75032bb39d> (visité le 10/04/2026).
- [19] MINISTÈRE DE L’ÉNERGIE ET DES MINES. *Produits pétroliers – Marché national*. Ministère de l’Énergie et des Mines, République Algérienne. 2024. URL : <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=produits-petroliers> (visité le 10/04/2026).
- [20] RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE. *Loi n° 05-07 du 28 avril 2005 relative aux hydrocarbures*. Ministère de l’Énergie et des Mines. 2005. URL : <https://www.energy.gov.dz/?article=recueil-des-textes-relatifs-aux-hydrocarbures> (visité le 10/04/2026).
- [21] NAFTAL. *Moyens de NAFTAL*. <https://www.naftal.dz/fr/index.php/moyens>. Consulté le 29 mai 2026. 2024.
- [22] TSA — TOUT SUR L’ALGÉRIE. *Naftal commande 400 tracteurs routiers Mercedes-Benz*. TSA – Tout Sur l’Algérie. 2026. URL : <https://www.tsa-algerie.com/naftal-commande-400-tracteurs-routiers-mercedes-benz/> (visité le 08/04/2026).
- [23] HORIZONS. *Approvisionnement du Sud en carburant : NAFTAL acquiert 400 attelages de l’EDIV/MDN*. Horizons. 2026. URL : <https://www.horizons.dz/2026/>

- 04 / approvisionnement - du - sud - en - carburant - naftal - acquiert - 400 -
attelages-de-lediv-mdn/ (visité le 08/04/2026).
- [24] ALGÉRIE ZOOM. *GPLc : NAFTAL explique les perturbations d'approvisionnement*. Algérie Zoom. 2026. URL : <https://algeriezoom.com/gplc-naftal-explique-les-perturbations-dapprovisionnement/> (visité le 04/04/2026).
- [25] MAGHREB ÉMERGENT. *Distribution des carburants : NAFTAL somme les transporteurs de reprendre le travail*. Maghreb Émergent. 2026. URL : <https://maghrebemergent.news/fr/distribution-des-carburants-naftal-somme-les-transporteurs-de-reprendre-le-travail/> (visité le 04/04/2026).
- [26] ALGÉRIE ÉCO / APS. *Transport des produits pétroliers : achèvement de la première tranche des canalisations*. Algérie Éco. 2022. URL : <https://www.algerie-eco.com/2022/07/18/transport-des-produits-petroliers-achevement-de-la-premiere-tranche-des-canalisation-pdg-de-naftal/> (visité le 10/04/2026).
- [27] EL WATAN. *Partenariat entre NAFTAL et EDIV : des camions Mercedes-Benz pour le transport de produits pétroliers*. El Watan. 2026. URL : <https://elwatan.dz/partenariat-entre-naftal-et-ediv-des-camions-mercedes-benz-pour-le-transport-de-produits-petroliers/> (visité le 08/04/2026).
- [28] AGENCE ECOFIN. *Algérie : NAFTAL vise une capacité de stockage de 200 000 m³ de carburants à Caroubier*. Agence Ecofin. 2015. URL : <https://www.agenceecofin.com/hydrocarbures/3006-30214-algerie-naftal-lorgne-une-capacite-de-stockage-de-200-000-m3-de-carburants-a-caroubier> (visité le 10/04/2026).
- [29] AUTORITÉ DE RÉGULATION DES HYDROCARBURES (ARH). *Décret exécutif n° 21-331 du 25 août 2021 définissant les conditions de mise en conformité des installations relevant des activités hydrocarbures*. ARH – Autorité de Régulation des Hydrocarbures. 2021. URL : <https://www.arh.gov.dz/category/decrets> (visité le 10/04/2026).
- [30] MAGHREB ÉMERGENT. *Arkab s'explique au sujet de la qualité du gasoil utilisé par les automobilistes*. Maghreb Émergent. 2025. URL : <https://maghrebemergent.news/fr/arkab-sexplique-au-sujet-de-la-qualite-du-gasoil-utilise-par-les-automobilistes/> (visité le 10/04/2026).
- [31] RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE. *Décret exécutif n° 21-319 du 14 août 2021 relatif au régime d'autorisation d'exploitation des installations et ouvrages relevant des activités d'hydrocarbures*. Journal Officiel de la République Algérienne. 2021. URL : <https://cei-halfaoui.com/wp-content/uploads/2021/10/Decret-executif-n%C2%B0-21-319-Algerie.pdf> (visité le 10/04/2026).
- [32] Christopher A. HANE et H. Donald RATLIFF. « Sequencing inputs to multi-commodity pipelines ». In : *Annals of Operations Research* (1995). URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02099692> (visité le 28/04/2026).

- [33] Ruy Luiz MILIDIU. *Planning of pipeline oil transportation with interface*. Rapp. tech. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2003. URL : https://bib-di.inf.puc-rio.br/ftp/pub/docs/techreports/03_56_milidiu.pdf (visité le 21/04/2026).
- [34] Ricardo REJOWSKI et José M. PINTO. «Scheduling of a multiproduct pipeline system». In : *Computers & Chemical Engineering* (2003). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098135403000498> (visité le 23/04/2026).
- [35] Seyed Ali MIRHASSANI et Morteza GHORBANALIZADEH. «The multi-product pipeline scheduling system». In : *Computers & Mathematics with Applications* (2008). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122108000904> (visité le 17/04/2026).
- [36] Meysam BAGHBAN et Majid YOUSEFIKHOSHBAKHT. «A mathematical model for planning oil products distribution via pipeline». In : *arXiv preprint arXiv :2203.15295* (2022). URL : <https://arxiv.org/abs/2203.15295> (visité le 25/04/2026).
- [37] Marek WODECKI, Mirosław UCHROSKI, Wojciech BOŻEJKO, Jarosław PEMPERA et Joanna JÓZEFOWSKA. «A MILP model for scheduling of multiproduct pipelines with bin-packing formulation». In : *arXiv preprint arXiv :2312.11381* (2023). URL : <https://arxiv.org/abs/2312.11381> (visité le 09/05/2026).
- [38] Diego C. CAFARO et Jaime CERDÁ. «Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a continuous time formulation». In : *Computers & Chemical Engineering* (2004). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098135404000869> (visité le 07/05/2026).
- [39] S. RELVAS, H. A. MATOS, A. P. F. D. BARBOSA-PÓVOA, J. FIALHO et A. S. PINHEIRO. «Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system». In : *Industrial & Engineering Chemistry Research* (2006). URL : <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie060309c> (visité le 19/04/2026).
- [40] S. RELVAS, H. A. MATOS, A. P. F. D. BARBOSA-PÓVOA et J. FIALHO. «Reactive scheduling framework for a multiproduct pipeline with inventory management». In : *Proceedings of the 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE-17)*. Elsevier, 2007. URL : <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie070214q> (visité le 09/05/2026).
- [41] Diego C. CAFARO et Jaime CERDÁ. «Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates». In : *Industrial & Engineering Chemistry Research* (2008). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098135407000592> (visité le 14/05/2026).
- [42] Seyed Ali MIRHASSANI, Mehdi ABBASI et Sahar MORADI. «Continuous-time formulation for pipeline scheduling of refined petroleum products with dual-purpose depots». In : *Applied Mathematical Modelling* (2013). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X12007251> (visité le 03/05/2026).

- [43] A. HERRÁN, J. M. DE LA CRUZ et B. DE ANDRÉS. «An integrated multi-period planning of the production and transportation of multiple petroleum products in a single pipeline system». In : *Computers & Chemical Engineering* (2011). URL : <https://www.researchgate.net/publication/47517690> (visité le 02/05/2026).
- [44] Hossein MOSTAFAEI et Alireza GHAFARI-HADIGHEH. «On the scheduling of real world multiproduct pipelines with simultaneous delivery». In : *Optimization and Engineering* (2015). URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11081-014-9263-9> (visité le 11/05/2026).
- [45] Wassila ABDELLAOUI, Mehdi SOUIER, M'hammed SAHNOUN et Fouad BENABDELAZIZ. «Multi-period optimal schedule of a multi-product pipeline : A case study in Algeria». In : *Computers & Industrial Engineering* (2021). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835221003879> (visité le 29/04/2026).
- [46] Arnaldo MOURA, José Carlos BECCENERI et Horacio H. YANASSE. «A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem». In : *Pesquisa Operacional* (2010). URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10601-009-9086-z> (visité le 16/04/2026).
- [47] L. A. A. MEIRA, L. MAGATÃO, F. NEVES-JR. et L. V. R. ARRUDA. «A matheuristic decomposition approach for the scheduling of a single-source and multiple destinations pipeline system». In : *European Journal of Operational Research* (2018). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221718300687> (visité le 11/05/2026).
- [48] András ÉLES et István HECKL. «Simulation and local-search based optimization of multiproduct pipeline networks». In : *Processes* (2025). URL : <https://www.mdpi.com/2305-6290/9/3/114> (visité le 12/05/2026).
- [49] Haoran ZHANG, Yongtu LIANG, Qi LIAO, Jing MA et Xiaohui YAN. «A self-learning approach for optimal scheduling of multi-product pipeline systems». In : *Journal of Computational and Applied Mathematics* (2018). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377042717302935> (visité le 21/04/2026).
- [50] Walid DBOUK, Jad HAYEK et Kassem GHORAYEB. «Optimal pipeline route selection using the A* algorithm». In : *Computers & Chemical Engineering* (2021). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092041052030989X> (visité le 08/05/2026).
- [51] Carlos ACOSTA-AMADO. «Optimization of distribution of refined petroleum products in multiproduct pipeline systems : A systematic and bibliometric review». In : *Heliyon* (2024). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402409978X> (visité le 30/04/2026).
- [52] Mouad SIDKI, Nikolay TCHERNEV, Pierre FÉNIES, Libo REN et Selwa ELFIRDOUSSI. «Multiproduct pipeline scheduling : A comprehensive bibliometric analysis and a

- systematic literature review». In : *Computers & Chemical Engineering* (2025). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098135424003296> (visité le 16/04/2026).
- [53] Alireza GHAFARI et al. «A combined LP–simulation approach for scheduling commodities in a multi-product pipeline». In : *Journal of Petroleum Science and Engineering* (2010). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410510000726> (visité le 30/04/2026).
- [54] ECOLOW. *Consommation camion : enjeux et impact*. ECOLOW [en ligne]. 2023. URL : <https://www.ecolow.fr/consommation-camion/> (visité le 12/05/2026).
- [55] MDSERCOM. *Consommation de carburant d'un poids lourd*. MDSercom [en ligne]. 2024. URL : <https://www.mdsercom.fr/comment-les-technologies-contribuent-a-la-securite-des-flottes-de-vehicules-et-comment-les-faire-adopter-dans-votre-entreprise/> (visité le 12/05/2026).
- [56] Amina HASNAOUI. «Planification, optimisation et pilotage du transport de carburant dans un réseau de pipeline». Mémoire d'ingéniorat. École Supérieure des Sciences Appliquées de Tlemcen, 2025.