



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

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 hiérarchique :

Multi niveau, Multi hub, Multi produit

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 précieux conseils, son suivi rigoureux et son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce mémoire de Master.

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 de Master.

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 de master traite de l'optimisation de la planification des opérations de pompage dans un réseau pipeline multiproduit multi-hubs, inspiré du réseau de distribution d'hydrocarbures exploité par NAFTAL dans le nord-ouest algérien.

Un modèle de **Programmation Linéaire en Nombres Entiers Mixtes (MILP)** générique est développé pour un réseau structuré en trois niveaux hiérarchiques : un hub principal (Arzew), un hub secondaire (Sidi Bel Abbès), et trois hubs terminaux (Oran, Remchi et Naâma). Le hub de Naâma constitue une **proposition d'extension originale** destinée à améliorer la couverture des wilayas du sud. Le modèle optimise simultanément le taux de remplissage des cuves de stockage, la pénalité de contamination aux interfaces entre produits successifs, et le taux de service aux zones de commande, sur un horizon de planification de dix jours découpé en 120 périodes de 2 heures.

Les contraintes non linéaires liées à la détection de contamination et à la récupération du contaminat sont linéarisées par la technique du Big-M. Le modèle est résolu par le solveur CPLEX et les résultats sont visualisés à l'aide de tableaux de bord Power BI. Trois scénarios de demande (faible, moyenne, forte) sont testés. Dans les trois cas, un taux de service de 100 % est atteint sur l'ensemble des hubs, validant la robustesse et la généricité du modèle proposé.

Mots-clés : pipeline multiproduit, MILP, planification, contamination aux interfaces, optimisation, NAFTAL, réseau multi-hubs.

Abstract

This master's thesis addresses the optimisation of pumping scheduling in a multi-product, multi-hub pipeline network, modelled after the hydrocarbon distribution network operated by NAFTAL in north-western Algeria.

A generic **Mixed-Integer Linear Programming (MILP)** model is developed for a three-level hierarchical network comprising one main hub (Arzew), one secondary hub (Sidi Bel Abbès), and three terminal hubs (Oran, Remchi, and Naâma). The Naâma hub represents an **original extension proposal** aimed at improving fuel distribution coverage in the southern provinces. The model simultaneously maximises the tank fill rate at all intermediate and terminal hubs, minimises the contamination penalty at product interfaces, and maximises the service rate to demand zones, over a ten-day planning horizon discretised into 120 two-hour periods.

Non-linear constraints arising from contamination detection and contaminant recovery are linearised using the Big-M technique. The model is solved using the CPLEX solver and results are visualised through Power BI dashboards. Three demand scenarios (low, medium, and high) are tested. In all three cases, a 100 % service rate is achieved across all hubs, demonstrating the robustness and generality of the proposed model.

Keywords : multi-product pipeline, MILP, scheduling, interface contamination, optimisation, NAFTAL, multi-hub network.

ملخص

تتناول هذه الأطروحة في إطار شهادة الماستر مسألة تحسين جدولة عمليات الضخ في شبكة أنابيب متعددة المنتجات ومتعددة المحاور، مستوحاة من شبكة توزيع المحروقات التي تشغلها شركة **نفطال** في شمال غرب الجزائر.

جرى تطوير نموذج برمجة خطية من النوع الصحيح المختلط (**MILP**) لشبكة هرمية ثلاثية المستويات تضم محوراً رئيسياً (أرزيو)، ومحوراً ثانوياً (سيدي بلعباس)، وثلاثة محاور طرفية (وهران، رمشي، والنعام). ويمثل محور النعام اقتراحاً أصيلاً لتوسيع الشبكة بهدف تحسين تغطية توزيع الوقود في الولايات الجنوبية. يُحسن النموذج في آن واحد معدل امتلاء خزانات التخزين في جميع المحاور، ويُخفّض عقوبة التلوث عند واجهات الفصل بين المنتجات المتعاقبة، ويُعظم معدل الخدمة المقدمة لمناطق الطلب، وذلك على أفق تخطيط مدته عشرة أيام مقسمة إلى 120 فترة زمنية مدة كل منها ساعتان.

خُطّط القيود غير الخطية المتعلقة برصد التلوث واسترداد المادة الملوثة باستخدام تقنية المتغير الكبير (**Big-M**) لضمان خطية النموذج. يُحلّ النموذج بواسطة برنامج الحل **CPLEX**، وتُعرض النتائج عبر لوحات متابعة **BI Power**. جرى اختبار ثلاثة سيناريوهات للطلب: منخفض، ومتوسط، ومرتفع. وفي جميع الحالات الثلاث، تحقّق معدل خدمة يبلغ 100 % على مستوى جميع المحاور، مما يُثبت متانة النموذج المقترح وعموميته.

الكلمات المفتاحية: خط أنابيب متعدد المنتجات، برمجة خطية من النوع الصحيح المختلط، جدولة عمليات الضخ، تلوث الواجهات، تحسين، نفطال، شبكة متعددة المحاور.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Liste des Abréviations	xiii
Introduction Générale	1
1 Configurations des Réseaux Pipelines Multiproduits et Rôle de NAFTAL	2
1.1 Introduction	2
1.2 NAFTAL et le Transport par Pipeline : cadre général	2
1.2.1 NAFTAL en bref	2
1.2.2 Le pipeline comme pilier de la distribution	2
1.3 Le Transport Multiproduit par Batching : mécanisme et enjeux	3
1.3.1 Le principe du batching	3
1.3.2 La contamination aux interfaces : un phénomène inévitable	3
1.3.3 Facteurs physiques gouvernant le volume de contaminat	4
1.3.4 Stratégies opérationnelles de minimisation du contaminat	4
1.4 Taxonomie des Configurations Topologiques des Réseaux Pipelines Multi- produits	5
1.4.1 Le Pipeline Rectiligne (<i>single-line pipeline</i>)	5
1.4.2 Le Pipeline Ramifié (<i>branched pipeline</i>)	6
1.4.3 Le Réseau Arborescent (<i>tree-structure network</i>)	6
1.4.4 Le Réseau Multi-Hubs Hiérarchique	7
1.5 Comparaison des Modes de Transport d'Hydrocarbures	7
1.5.1 Vue d'ensemble des modes de transport	8
1.5.2 Analyse comparative multicritère	8
1.5.3 Avantage économique et environnemental du pipeline	8
1.5.4 Limites du pipeline multiproduit et conditions d'emploi optimales	9
1.6 Enjeux Économiques et Environnementaux du Transport Pipeline Multiproduit	9
1.6.1 Réduction des coûts logistiques par l'optimisation de la planification	9
1.6.2 Bilan environnemental du cycle de vie d'un pipeline à produits pé- trolliers	10
1.6.3 Complexité combinatoire et enjeu de passage à l'échelle	10
1.7 Conclusion	10

2	État de l'Art	11
2.1	Introduction	11
2.2	Travaux antérieurs	11
2.2.1	Références fondatrices MILP	11
2.2.2	Extensions structurelles , réseaux et topologies complexes	12
2.2.3	Approches hybrides et matheuristiques pour instances de grande taille	15
2.2.4	Intelligence artificielle et perspectives futures	16
2.2.5	Synthèse et tableau comparatif	17
2.3	Conclusion	20
3	Modélisation Mathématique du Réseau Pipeline Multi-Hubs	21
3.1	Introduction	21
3.2	Hypothèses du Modèle	21
3.3	Modèle Mathématique Générique	22
3.3.1	Nomenclature	23
3.3.2	Fonction Objectif	26
3.3.3	Contraintes	26
3.4	Réseau d'Application	33
3.4.1	Description du Réseau	33
3.4.2	Cahier des Charges	34
3.4.3	Scénarios de Demande	35
3.5	Conclusion	37
4	Présentation et Interprétation des Résultats	38
4.1	Introduction	38
4.2	Séquences de Pompage Optimales : Diagrammes de Gantt	38
4.2.1	Remarque préliminaire	38
4.2.2	Scénario Faible Demande	39
4.2.3	Scénario Demande Moyenne	41
4.2.4	Scénario Forte Demande	42
4.3	Visualisation des Résultats sur Power BI	43
4.3.1	Hub Secondaire : Sidi Bel Abbès (SBA)	44
4.3.2	Hub Terminal : Remchi	51
4.3.3	Hub Terminal : Naâma (Proposé)	57
4.3.4	Hub Terminal : Oran	64
4.3.5	Interprétation des jauges	70
4.4	Conclusion	71
	Conclusion Générale	72

Références bibliographiques**73**

Table des figures

1.1	Système de distribution par pipeline rectiligne : une raffinerie alimente D dépôts via D segments en série. <i>Source</i> : Rejowski et Pinto, <i>Scheduling of a multiproduct pipeline system</i> , Computers & Chemical Engineering, 2003 [3].	5
1.2	Topologie arborescente d'un réseau pipeline multiproduit. <i>Source</i> : MirHasani et Fani Jahromi, <i>A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system</i> , Computers & Chemical Engineering, 2011 [6].	7
3.1	Schéma du réseau pipeline multiproduit multi-hubs.	34
4.1	Diagramme de Gantt – Scénario faible demande.	39
4.2	Diagramme de Gantt – Scénario demande moyenne.	41
4.3	Diagramme de Gantt – Scénario forte demande.	42
4.4	Tableau de bord Power BI – Vue générale du centre SBA.	44
4.5	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – SBA, scénario faible demande (J0–J10).	45
4.6	Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – SBA, scénario faible demande (J0–J10).	46
4.7	Quantités servies Essence/Gazoil par période – SBA, scénario faible demande (J0–J10).	47
4.8	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – SBA, scénario demande moyenne (J0–J10).	47
4.9	Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – SBA, scénario demande moyenne (J0–J10).	48
4.10	Quantités servies Essence/Gazoil par période – SBA, scénario demande moyenne (J0–J10).	49
4.11	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – SBA, scénario forte demande (J0–J10).	49
4.12	Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – SBA, scénario forte demande (J0–J10).	50
4.13	Quantités servies Essence/Gazoil par période – SBA, scénario forte demande (J0–J10).	51
4.14	Tableau de bord Power BI – Vue générale du centre Remchi.	51
4.15	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario faible demande (J0–J10).	52

4.16	Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario faible demande (J0–J10).	53
4.17	Quantités servies Essence/Gazoil par période – Remchi, scénario faible demande (J0–J10).	53
4.18	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario demande moyenne (J0–J10).	54
4.19	Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario demande moyenne (J0–J10).	54
4.20	Quantités servies Essence/Gazoil par période – Remchi, scénario demande moyenne (J0–J10).	55
4.21	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario forte demande (J0–J10).	55
4.22	Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario forte demande (J0–J10).	56
4.23	Quantités servies Essence/Gazoil par période – Remchi, scénario forte demande (J0–J10).	57
4.24	Tableau de bord Power BI – Vue générale du centre Naâma (hub proposé). .	57
4.25	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario faible demande (J0–J10).	58
4.26	Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario faible demande (J0–J10).	59
4.27	Quantités servies Essence/Gazoil par période – Naâma, scénario faible demande (J0–J10).	60
4.28	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario demande moyenne (J0–J10).	60
4.29	Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario demande moyenne (J0–J10).	61
4.30	Quantités servies Essence/Gazoil par période – Naâma, scénario demande moyenne (J0–J10).	61
4.31	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario forte demande (J0–J10).	62
4.32	Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario forte demande (J0–J10).	62
4.33	Quantités servies Essence/Gazoil par période – Naâma, scénario forte demande (J0–J10).	63
4.34	Tableau de bord Power BI – Vue générale du centre Oran.	64
4.35	Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Oran, scénario faible demande (J0–J10).	65

4.36 Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Oran, scénario faible demande (J0–J10).	66
4.37 Quantités servies Essence/Gazoil par période – Oran, scénario faible demande (J0–J10).	66
4.38 Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Oran, scénario demande moyenne (J0–J10).	67
4.39 Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Oran, scénario demande moyenne (J0–J10).	67
4.40 Quantités servies Essence/Gazoil par période – Oran, scénario demande moyenne (J0–J10).	68
4.41 Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Oran, scénario forte demande (J0–J10).	68
4.42 Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Oran, scénario forte demande (J0–J10).	69
4.43 Quantités servies Essence/Gazoil par période – Oran, scénario forte demande (J0–J10).	70

Liste des tableaux

1.1	Comparaison multicritère des modes de transport d'hydrocarbures raffinés.	8
2.1	Synthèse comparative des principaux travaux de la littérature.	17
3.1	Structure hiérarchique du réseau d'application (le hub de Naâma est une proposition d'extension).	33
3.2	Paramètres généraux de la simulation.	34
3.3	Délais de transit entre les hubs (en nombre de périodes de 2 h).	35
3.4	Capacités de stockage par hub.	35
3.5	Conditions initiales des stocks de produit et de contaminat à $t_a = 0$	35
3.6	Estimations des demandes par période (2 h) – Scénario faible demande. . .	36
3.7	Estimations des demandes par période (2 h) – Scénario demande moyenne.	36
3.8	Estimations des demandes par période (2 h) – Scénario forte demande. . . .	36

Liste des Abréviations

Abréviation	Désignation
ACO	Ant Colony Optimization (Optimisation par Colonie de Fourmis)
ACV	Analyse du Cycle de Vie
ARZ	Arzew
DES	Discrete Event Simulation
GES	Gaz à Effet de Serre
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MIP	Mixed Integer Programming
MPNMM	Multi-Product Network with Multiple sources and Multiple destinations
PLNE	Programmation Linéaire en Nombres Entiers
SBA	Sidi Bel Abbès
SM	Segmentation Model
SVC	Support Vector Clustering
TSP	Travelling Salesman Problem
WGIK	Weighted Generalized Intersection Kernel

Introduction Générale

L'énergie est au cœur du développement économique et social de toute nation. En Algérie, les produits pétroliers raffinés constituent une part essentielle de la consommation nationale et conditionnent directement le fonctionnement des transports, de l'industrie et des ménages. Assurer leur disponibilité continue en tout point du territoire est une mission stratégique de première importance, qu'assume NAFTAL, filiale à cent pour cent du groupe Sonatrach, en s'appuyant sur un réseau de pipelines multiproduits dont elle exploite l'épine dorsale logistique.

Cependant, exploiter un pipeline multiproduit va bien au-delà du simple pompage de carburants. Lorsque plusieurs produits de qualités différentes se succèdent dans une même conduite sans séparation physique (le principe du *batching*), une zone de mélange se forme inévitablement à chaque interface : c'est la *contamination*, un phénomène qui doit être quantifié, maîtrisé et minimisé. À cela s'ajoutent les contraintes de gestion des stocks dans les hubs de distribution, les délais de transit propres à chaque segment et la nécessité de satisfaire en permanence la demande des zones de commande. Planifier les séquences de pompage d'un tel réseau constitue donc un problème d'optimisation combinatoire complexe, d'autant plus difficile que le réseau s'organise en une architecture hiérarchique multi-hubs, où les décisions prises en amont produisent leurs effets en aval avec un retard temporel non négligeable.

C'est précisément ce défi que ce mémoire se propose de relever. Le réseau étudié est inspiré de l'infrastructure réelle de NAFTAL dans le nord-ouest algérien, reliant la raffinerie d'Arzew aux centres de Sidi Bel Abbès, Remchi et Oran, enrichi d'une extension originale vers le hub de Naâma pour améliorer la couverture des wilayas du sud. L'approche méthodologique retenue est la **Programmation Linéaire en Nombres Entiers Mixtes (MILP)**, résolue par le solveur CPLEX, avec une fonction objectif équilibrant le taux de remplissage des cuves, la minimisation des contaminations et la satisfaction prioritaire de la demande.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier pose les bases conceptuelles du transport par pipeline multiproduit et le rôle de NAFTAL. Le deuxième dresse un état de l'art des méthodes d'optimisation appliquées à ce domaine. Le troisième développe le modèle mathématique générique et présente le réseau d'application avec ses trois scénarios de demande. Le quatrième présente et interprète les résultats de la résolution à travers les diagrammes de Gantt et les tableaux de bord Power BI des quatre hubs du réseau.

Chapitre 1

Configurations des Réseaux Pipelines Multiproduits et Rôle de NAFTAL

1.1 Introduction

Ce chapitre présente les bases conceptuelles nécessaires à la compréhension du transport par pipeline multiproduit. Il décrit le rôle de NAFTAL dans la distribution des hydrocarbures en Algérie, les mécanismes du batching et de la contamination aux interfaces, ainsi que les différentes configurations topologiques des réseaux pipelines. Il positionne également le pipeline parmi les autres modes de transport sur les plans économique et environnemental.

1.2 NAFTAL et le Transport par Pipeline : cadre général

1.2.1 NAFTAL en bref

NAFTAL Entreprise Nationale de Commercialisation et de Distribution des Produits Pétroliers est la société par actions, filiale à 100 % du groupe Sonatrach, chargée de la distribution et de la commercialisation des produits pétroliers sur l'ensemble du territoire algérien [1]. Avec un volume dépassant 13 millions de tonnes de produits commercialisés par an, elle contribue à hauteur de 51 % de l'énergie finale consommée sur le marché national [2].

1.2.2 Le pipeline comme pilier de la distribution

Au sein de la chaîne logistique de NAFTAL, le transport par pipeline constitue le mode le plus économique et le plus sûr pour acheminer de grands volumes de carburants sur de longues distances. Contrairement au transport routier, le pipeline opère en continu, indépendamment des conditions météorologiques ou du trafic, avec une empreinte énergétique par tonne-kilomètre nettement inférieure [3].

Un réseau pipeline multiproduit présente néanmoins une contrainte opérationnelle majeure : plusieurs carburants de qualités différentes circulent séquentiellement dans une même conduite, générant des *interfaces de contamination* qu'il faut quantifier, surveiller et minimiser. C'est précisément ce problème d'optimisation la planification optimale des séquences de pompage

dans un réseau multi-hubs qui est l'objet du présent mémoire.

1.3 Le Transport Multiproduit par Batching : mécanisme et enjeux

1.3.1 Le principe du batching

La technique du *batching* ou transport par lots consiste à injecter séquentiellement plusieurs produits pétroliers distincts dans une même conduite, sans séparation physique entre eux. Chaque lot (*batch* ou *slug*) est pompé après le précédent, les deux produits se touchant directement en un point appelé *interface* [4].

Cette méthode présente un avantage économique considérable : elle évite la multiplication des conduites dédiées à un seul produit. En contrepartie, elle introduit un défi technique de premier ordre : la contamination.

1.3.2 La contamination aux interfaces : un phénomène inévitable

Lorsque deux produits différents se succèdent dans le pipeline, ils ne sont pas séparés par une frontière nette. La turbulence de l'écoulement et la différence de viscosité entre produits créent une zone de mélange progressif appelée *contaminat* ou *interface*. La longueur de cette zone dépend de plusieurs facteurs : le diamètre de la conduite, la vitesse d'écoulement, la distance parcourue et la nature des deux produits en contact [4, 5].

Deux règles fondamentales régissent la gestion du contaminat dans les réseaux pipeline :

1. **Règle de séquence** : certaines paires de produits génèrent un volume de contamination plus important que d'autres. En particulier, le passage de l'essence au gasoil produit généralement moins de contamination que l'inverse [3].
2. **Règle de récupération** : à l'arrivée au hub terminal, le contaminat est dérouté vers des cuves de stockage dédiées. Une fraction de ce mélange peut être réinjectée dans le produit correspondant si sa concentration est inférieure à la norme de qualité admissible [6].

La minimisation du contaminat généré est donc l'un des objectifs centraux de la planification des pipelines multiproduits, au même titre que la satisfaction de la demande et le maintien des niveaux de stock.

1.3.3 Facteurs physiques gouvernant le volume de contaminat

La quantification du volume de contaminat formé à l'interface entre deux produits repose sur un modèle physique bien établi : le modèle de dispersion axiale de Taylor [7]. Ce modèle décrit le mélange longitudinal entre deux fluides miscibles s'écoulant successivement dans une conduite cylindrique. En pratique, le volume de contaminat dépend de deux familles de facteurs :

1. **Facteurs hydrauliques.** Le régime d'écoulement (nombre de Reynolds Re) détermine le profil de vitesse dans la conduite et donc l'intensité de la dispersion axiale. En régime turbulent pleinement développé, le coefficient de dispersion est estimé par la formule empirique d'Austin et Palfrey (1963), dont la validité a été confirmée pour une large gamme de diamètres (de 50 mm à 1016 mm) et de longueurs de conduites [7]. Le modèle suppose un régime uniforme ; pour les sections de conduite en régime de transition ou laminaire (débit réduit), des corrections tiennent compte des effets visqueux de paroi.
2. **Facteurs géométriques et opérationnels.** Le diamètre interne D de la conduite a un effet prépondérant : le volume de contaminat varie approximativement en $\sqrt{L \cdot D^3}$, où L est la longueur du segment. Les variations de diamètre entre segments consécutifs, les changements de débit d'injection en cours de trajet, et le profil altimétrique de la conduite introduisent des corrections supplémentaires par rapport à la formule de base [8]. Les propriétés physico-chimiques de la paire de produits (densité, viscosité cinématique) influencent également la longueur de la zone de mélange, bien que cet effet soit plus faible que celui de la géométrie [7].

Dans les approches MILP de planification, le volume de contaminat est généralement paramétré comme une constante $qtm(i)$ propre à chaque segment i , estimée à partir de données historiques d'exploitation ou de la formule d'Austin-Palfrey appliquée aux caractéristiques réelles de chaque tronçon. La précision de ce paramètre conditionne directement la qualité des plans de pompage optimisés.

1.3.4 Stratégies opérationnelles de minimisation du contaminat

La littérature technique distingue trois stratégies complémentaires pour limiter la génération et l'impact du contaminat dans les réseaux pipelines multiproduits [9] :

- **Optimisation de la séquence d'injection.** L'ordre dans lequel les produits sont injectés détermine le nombre et la nature des interfaces générées. Des paires de produits peu contrastées en densité et en viscosité produisent moins de contaminat que des paires à forts écarts. La recherche de la séquence cyclique optimale est un problème combinatoire de type *Travelling Salesman Problem* (TSP) sur les produits, intégré directement

dans les formulations MILP par la variable binaire de détection de contamination.

- **Contrôle de la taille des batches.** Des batches plus grands réduisent le nombre d'interfaces par unité de temps mais augmentent les délais de livraison et les besoins en capacité de stockage aux dépôts terminaux [9]. Le dimensionnement optimal des batches résulte donc d'un compromis entre minimisation du contaminat et respect des contraintes de livraison.
- **Suivi en temps réel de l'interface (*batch tracking*).** Des capteurs de densité ou de viscosité en ligne, couplés à des modèles de prédiction de la position de l'interface, permettent de déclencher le basculement vers les cuves de stockage du contaminat au moment précis de l'arrivée de la zone de mélange au hub terminal. Cette technique réduit le volume de produit noble contaminé par déphasage opérateur [8].

1.4 Taxonomie des Configurations Topologiques des Réseaux Pipelines Multiproduits

La topologie d'un réseau pipeline détermine directement la complexité opérationnelle et les défis de planification associés. Quatre grandes configurations sont rencontrées dans les systèmes industriels de distribution de carburants, présentées ci-dessous par ordre croissant de complexité.

1.4.1 Le Pipeline Rectiligne (*single-line pipeline*)

Description générale. C'est la configuration fondatrice : une source unique (raffinerie) alimente plusieurs dépôts terminaux disposés *en série* le long d'une conduite principale, comme illustré en figure 1.1. Le pipeline est divisé en *segments*, chaque segment reliant deux centres de stockage consécutifs ; et en *packs*, chaque pack ne contenant qu'un seul produit à un instant donné [3].

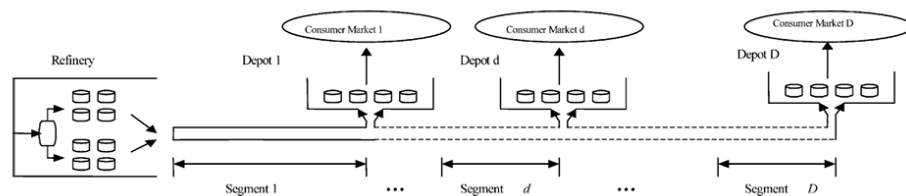


FIG. 1.1 : Système de distribution par pipeline rectiligne : une raffinerie alimente D dépôts via D segments en série. *Source* : Rejowski et Pinto, *Scheduling of a multiproduct pipeline system*, Computers & Chemical Engineering, 2003 [3].

Caractéristiques opérationnelles. Les décisions clés portent sur : le choix du produit à injecter à chaque période, le volume injecté, et la répartition entre les dépôts. Les contraintes sont les bilans de masse, les capacités de stockage aux dépôts et en raffinerie, les séquences admissibles de produits, et les coûts de pompage qui varient selon les périodes [3].

Limites. Cette configuration est limitée à un axe de distribution unique. Elle ne peut pas représenter les réseaux réels où plusieurs axes convergent ou divergent depuis différents centres de production.

1.4.2 Le Pipeline Ramifié (*branched pipeline*)

Description générale. La conduite principale se divise en une ou plusieurs branches secondaires au niveau d'un nœud de bifurcation. Chaque branche alimente ses propres dépôts ou zones de distribution. Cette configuration en « Y » est typique des réseaux qui doivent desservir des régions géographiquement séparées depuis une même source.

Caractéristiques opérationnelles. La présence d'un nœud de bifurcation introduit la notion de *routing* : à chaque période, le flux de produit doit être orienté vers l'une ou l'autre des branches. Cela requière des variables binaires supplémentaires modélisant l'activation de chaque chemin. La gestion du contaminat devient plus complexe car l'interface se propage différemment selon la branche activée.

Exemple industriel. Le réseau pipeline de l'OCP (Office Chérifien des Phosphates, Maroc) présente cette topologie : un pipeline principal transporte les produits depuis le site de production jusqu'à une station terminale, d'où des pipelines secondaires les acheminent vers différents groupes de stockage [10].

1.4.3 Le Réseau Arborescent (*tree-structure network*)

Description générale. La topologie arborescente est une généralisation de la topologie en Y à plusieurs niveaux hiérarchiques : une ou plusieurs raffineries alimentent des *hubs intermédiaires* qui redistribuent eux-mêmes les produits vers des *hubs terminaux* en aval. La structure résultante ressemble à un arbre dont la racine est la raffinerie et les feuilles sont les dépôts finaux.

Caractéristiques opérationnelles. La complexité combinatoire augmente significativement car :

- les décisions de pompage à un nœud amont ont des effets *retardés* aux nœuds aval, avec des délais de transit différents selon les segments ;

- la *livraison simultanée* est possible : un même cycle de pompage peut approvisionner plusieurs hubs en parallèle ;
- le suivi des batches (*batch tracking*) aux nœuds de transfert constitue un défi de modélisation majeur [11].

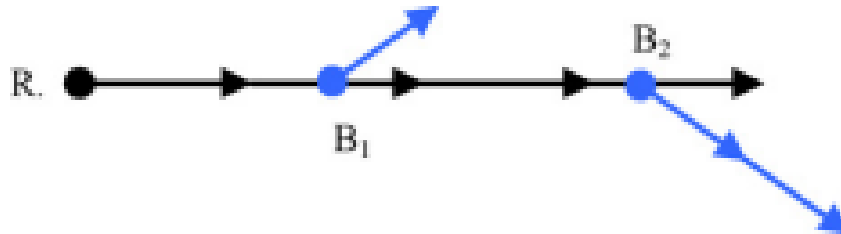


FIG. 1.2 : Topologie arborescente d'un réseau pipeline multiproduit. *Source* : MirHassani et Fani Jahromi, *A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system*, Computers & Chemical Engineering, 2011 [6].

Implication pour la contamination. Dans un réseau arborescent, les interfaces de contamination se forment indépendamment dans chaque segment. Le volume de contaminat généré dans l'artère principale est différent de celui généré dans les branches secondaires, car les diamètres et les débits peuvent varier d'un segment à l'autre.

1.4.4 Le Réseau Multi-Hubs Hiérarchique

Description générale. La topologie multi-hubs est la généralisation la plus complète. Elle organise les nœuds en plusieurs niveaux hiérarchiques et autorise des connexions directes entre niveaux non adjacents : certains hubs terminaux peuvent être connectés directement au hub principal, tandis que d'autres sont alimentés via des hubs secondaires. Un hub de niveau intermédiaire remplit ainsi simultanément un rôle de récepteur (depuis l'amont) et d'émetteur (vers l'aval), ce que la littérature désigne par l'expression *double-purpose depot* [12].

Enjeu temporel. La décision de pompage au hub principal à la période t ne produit ses effets sur les stocks terminaux qu'à la période $t + AR$, où AR est le délai de transit du segment concerné. Ce couplage temporel multi-échelle oblige le planificateur à *anticiper* les besoins des hubs aval de plusieurs périodes à l'avance [11].

1.5 Comparaison des Modes de Transport d'Hydrocarbures

Le choix du mode de transport des produits pétroliers raffinés est une décision stratégique qui repose sur plusieurs critères : capacité de transit, coût opérationnel, sécurité, fiabilité et empreinte environnementale. Cette section positionne le pipeline multiproduit par rapport

aux autres modes de transport afin d'en clarifier les avantages comparatifs et les conditions d'emploi optimales.

1.5.1 Vue d'ensemble des modes de transport

Cinq modes sont couramment utilisés pour acheminer les hydrocarbures raffinés de la raffinerie vers les centres de distribution : le pipeline, le transport routier par camion-citerne, le transport ferroviaire, le transport fluvial et le transport maritime côtier. Parmi eux, le pipeline se distingue comme le seul mode capable d'assurer un flux *continu, automatisable* et totalement *indépendant des aléas de surface* (trafic, météo, grèves de transporteurs). Il est particulièrement adapté aux grands volumes sur des distances fixes, conditions précisément rencontrées dans la chaîne de distribution de NAFTAL [13].

1.5.2 Analyse comparative multicritère

Le tableau 1.1 présente une comparaison synthétique des principaux modes de transport selon les critères pertinents pour un opérateur de distribution nationale.

TAB. 1.1 : Comparaison multicritère des modes de transport d'hydrocarbures raffinés.

Critère	Pipeline	Routier	Ferroviaire	Fluvial	Maritime
Capacité de transit	Très haute	Faible	Moyenne	Moyenne	Très haute
Coût / tonne-km	Très bas	Élevé	Moyen	Bas	Bas
Continuité de service	24 h/24, 7 j/7	Limitée	Horaires	Saisonnier	Saisonnier
Fiabilité météo	Totale	Partielle	Partielle	Faible	Faible
Empreinte CO ₂	Faible	Très élevée	Élevée	Faible	Moyenne
Risque de déversement	Faible	Moyen	Moyen	Faible	Moyen
Flexibilité de tracé	Faible	Très haute	Moyenne	Contrainte	Contrainte
Investissement initial	Élevé	Faible	Élevé	Moyen	Très élevé

1.5.3 Avantage économique et environnemental du pipeline

Sur le plan économique, le pipeline présente le coût opérationnel par tonne-kilomètre le plus faible de tous les modes terrestres, grâce à l'économie d'échelle liée à sa capacité de transit élevée et à l'automatisation de son fonctionnement [13].

Sur le plan environnemental, la comparaison avec le transport ferroviaire est éclairante : une étude de cycle de vie détaillée portant sur le transport de bitume sur 3000 km montre que le pipeline produit entre 61 % et 77 % d'émissions de gaz à effet de serre en moins que le transport

ferroviaire pour un même volume transporté [14]. L'analyse des coûts externes confirme également que les coûts combinés de pollution atmosphérique et de CO₂ du transport ferroviaire sont presque le double de ceux du pipeline pour un trajet équivalent [15].

1.5.4 Limites du pipeline multiproduit et conditions d'emploi optimales

Malgré ses avantages structurels, le pipeline multiproduit n'est pas adapté à toutes les configurations logistiques. Ses conditions d'emploi optimales exigent :

- des *volumes importants et réguliers*, pour amortir l'investissement initial en infrastructure ;
- des *origines et destinations fixes* sur le long terme, car l'inflexibilité du tracé est la principale limite du mode ;
- des produits *miscibles mais séparables en aval*, condition nécessaire au batching ;
- une *infrastructure de stockage aux deux extrémités*, permettant de tamponner les aléas de production et de consommation [13].

Lorsque ces conditions ne sont pas réunies — volumes trop faibles, destinations multiples et variables, produits incompatibles — le transport routier ou ferroviaire reprend l'avantage malgré son coût unitaire supérieur.

1.6 Enjeux Économiques et Environnementaux du Transport Pipeline Multiproduit

1.6.1 Réduction des coûts logistiques par l'optimisation de la planification

Le transport par pipeline est intrinsèquement économique, mais une planification sous-optimale des séquences de pompage peut compromettre cet avantage. Trois postes de coût sont directement affectés par la qualité du plan de pompage [4] :

- **Coût de pompage** : concentrer les opérations de pompage sur les périodes où le tarif électrique est faible réduit la facture énergétique des stations de pompage.
- **Coût de gestion des stocks** : des niveaux de stock équilibrés dans les hubs réduisent les risques de rupture ou de débordement, et limitent les pertes de produit par évaporation.
- **Coût de retraitement du contaminat** : chaque mètre cube de contaminat nécessite un retraitement en raffinerie, avec une dépense énergétique et financière associée. Une

séquence bien choisie minimise le nombre d’interfaces à fort potentiel de contamination [4].

1.6.2 Bilan environnemental du cycle de vie d’un pipeline à produits pétroliers

Des études récentes basées sur l’Analyse du Cycle de Vie (ACV) montrent que la phase d’exploitation d’un pipeline à produits pétroliers génère la grande majorité de son empreinte carbone totale : environ 74 % des émissions équivalent CO_2 sur l’ensemble du cycle de vie sont produites pendant la phase d’exploitation, principalement par la consommation électrique des stations de pompage [13].

Ce résultat a deux implications pratiques directes :

1. L’optimisation de la planification des séquences de pompage — objet du présent mémoire — est le levier le plus efficace pour réduire l’empreinte environnementale opérationnelle du réseau.
2. La minimisation du volume de contaminat retraité en raffinerie contribue doublement : elle réduit les pertes de produit noble et évite la consommation énergétique associée au retraitement [9].

1.6.3 Complexité combinatoire et enjeu de passage à l’échelle

D’un point de vue algorithmique, le problème de planification d’un pipeline multiproduit avec fenêtres de livraison est classé NP-complet dès lors que le nombre de produits ou de périodes augmente. Pour un réseau multi-hubs de taille industrielle, cette complexité théorique se traduit par des temps de calcul qui croissent exponentiellement, justifiant le recours à des formulations MILP efficaces et à des techniques de décomposition hiérarchique — approches détaillées dans le Chapitre 2.

1.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté les configurations topologiques des réseaux pipelines multiproduits, les mécanismes du batching et de la contamination, ainsi que les avantages du pipeline comme mode de transport. Le Chapitre 2 décrit l’état de l’art des méthodes d’optimisation associées, et le Chapitre 3 développe le modèle mathématique retenu pour le réseau NAFTAL.

Chapitre 2

État de l'Art

2.1 Introduction

La planification et l'optimisation du transport dans les réseaux pipelines multi-produits et multi-niveaux constituent un défi majeur pour l'industrie pétrolière. Les travaux académiques sur ce sujet ont évolué progressivement, passant de modèles portant sur des pipelines simples (une source, un ou deux dépôts) vers des formulations génériques couvrant des réseaux complexes à sources multiples, topologies arborescentes ou maillées, et niveaux hiérarchiques multiples.

Le présent état de l'art s'inscrit dans le cadre du mémoire de master portant sur la modélisation générique d'un réseau pipeline multi-hubs, composé de hubs principaux alimentés par des raffineries, de hubs secondaires et de hubs terminaux desservant des zones de commande. L'objectif est de recenser les travaux pertinents qui justifient et enrichissent cette extension vers un modèle MILP générique multi-niveaux.

La littérature est organisée selon quatre axes :

1. les références fondatrices MILP applicables aux deux niveaux d'étude ;
2. les extensions structurelles vers les réseaux complexes ;
3. les approches hybrides et matheuristiques pour les instances de grande taille ;
4. les approches par intelligence artificielle et les revues bibliométriques récentes.

2.2 Travaux antérieurs

2.2.1 Références fondatrices MILP

Ces travaux constituent le socle méthodologique commun. Ils introduisent les formalismes MILP discret et continu qui sont directement étendus dans le modèle générique multi-hubs.

Formulations MILP à temps discret

Rejowski et Pinto [3] ont proposé les premiers modèles MILP à temps discret complets pour la planification d'un pipeline multiproduits unidirectionnel (pipeline OSBRA, 955 km, 5 dépôts, 4 produits). La discrétisation du pipeline en *packs* de taille fixe et la formulation en intervalles de temps constituent la base des approches discrètes. Bien que notre modèle master adopte une représentation continue, ce travail constitue la référence historique incontournable de la littérature.

MirHassani et Ghorbanalizadeh [16] 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 dans le modèle multi-hubs pour gérer les connexions entre hubs de différents niveaux.

Formulations MILP à temps continu

Cafaro et Cerdá [4] ont proposé la première formulation MILP à temps continu, avec un gain de trois ordres de grandeur en temps de calcul par rapport aux formulations discrètes. La représentation en *slugs* (bouchons de produit) et les variables continues adoptées dans notre modèle générique s'inspirent directement de cette approche.

Mostafaei et Ghaffari-Hadigheh [5] ont proposé un modèle MILP long terme avec livraisons simultanées pour un pipeline reliant une raffinerie à cinq dépôts. La contrainte de livraisons simultanées est reprise dans le modèle générique pour gérer les flux entre hubs secondaires et terminaux.

Abdellaoui et al. [17] ont appliqué un modèle MILP continu au cas réel algérien NAFTAL (166 km, 4 produits, 2 centres). Ce travail valide la pertinence de l'approche MILP continue pour les pipelines algériens et constitue le point de départ de l'extension vers le réseau multi-hubs.

2.2.2 Extensions structurelles , réseaux et topologies complexes

Ces travaux ont étendu les modèles MILP de base vers des topologies de réseau plus complexes, directement pertinentes pour la conception du modèle générique multi-hubs proposé dans ce mémoire de master.

MirHassani et Fani Jahromi [6] ont proposé une formulation MILP continue pour un pipeline arborescent reliant une raffinerie unique à plusieurs dépôts via une structure en arbre. Ce modèle introduit la notion de hubs intermédiaires alimentant des hubs terminaux, structure directement reprise dans notre modèle multi-hubs avec les hubs secondaires et terminaux.

MirHassani, Abbasi et Moradi [18] ont introduit le concept de *dépôts à double fonction* (*dual-purpose depots*), capables simultanément d'injecter et de recevoir des produits. Cette capa-

cité réduit de 35 % le nombre de variables binaires. Dans le modèle multi-hubs, les hubs secondaires jouent ce double rôle en recevant des hubs principaux et en alimentant les hubs terminaux.

Magatao, Arruda et Neves-Jr [12] ont développé une approche de décomposition MILP hiérarchique en trois niveaux (planification → affectation → ordonnancement), appliquée à un réseau de 30 canalisations reliées à 14 nœuds comprenant 4 raffineries, 2 ports, 6 dépôts et 2 clients finaux. La structure hiérarchique de ce réseau est analogue à celle du modèle multi-hubs proposé.

Baghban et Yousefikhoshbakht [19] proposent un modèle MILP à temps discret pour des pipelines comportant plusieurs raffineries et plusieurs centres de distribution avec injections simultanées et nœuds à double fonction. La validation sur des benchmarks montre des réductions de coûts opérationnels de 0,8 % à 1,5 % par rapport aux modèles continus de référence.

Wodecki et al. [20] ont proposé une formulation MILP discrétisée modélisant le transport comme un problème de *bin-packing* à une dimension, développée avec l'opérateur tchèque CEPRO. Implémentée dans SCIP et Gurobi, cette formulation résout des instances jusqu'à 12 nœuds sur un horizon de 31 jours en moins de 1 000 secondes, démontrant la scalabilité des approches MILP pour des réseaux complexes.

Li et al. [11] proposent un modèle MILP en deux étapes pour les réseaux multiproduits à sources et terminaux multiples (MPNMM), avec une méthode dynamique de numérotation des lots (*dynamic index batch numbering*) qui réinitialise les indices aux nœuds de transfert. Le problème est décomposé en deux sous-problèmes : optimisation du réseau amont et allocation des ressources dans les dépôts intermédiaires pour le réseau aval, les inventaires en temps réel du dépôt de transfert servant de paramètres de couplage. Validé sur deux réseaux réels chinois en moins de 18 000 secondes CPU, ce travail justifie directement la stratégie de découpage hiérarchique aux nœuds de transfert adoptée dans le modèle multi-hubs.

Optimisation robuste pilotée par les données : Baghban, Castro et Oliveira (2025)

Baghban, Castro et Oliveira [21] ont développé une approche d'*optimisation robuste pilotée par les données* (*data-driven robust optimization*) pour la planification d'un pipeline droit reliant une raffinerie unique à plusieurs centres de distribution, en considérant l'incertitude sur les débits d'injection.

Contexte et motivation. Dans les applications réelles, les paramètres des modèles d'optimisation sont soumis à une incertitude élevée. En particulier, une chute du débit d'injection survient avec une probabilité de 17 % selon Muhlbauer (2004), notamment en raison de défaillances de pompes, de la variabilité de la demande ou des conditions d'exploitation. Un plan établi de façon déterministe peut alors devenir inapplicable en pratique, forçant les opé-

rateurs à replanifier en urgence.

Formulation déterministe de référence. Le modèle déterministe de base est une formulation MILP à temps continu centrée sur les batchs (*batch-centric*), qui améliore le modèle de Ghaffari-Hadigheh et Mostafaei (2015). La fonction objectif minimise le *makespan* (durée totale du plan de pompage). Les innovations clés par rapport aux formulations antérieures sont :

- la possibilité d'injecter *plusieurs batchs* par cycle de pompage (*pumping run*);
- la livraison simultanée à plusieurs centres de distribution lors d'un même cycle;
- une taille de problème significativement réduite : pour l'exemple de référence, 141 variables binaires et 874 variables continues contre 193/1083 (GM) et 454/1684 (LCLZ), pour un temps de calcul comparable ou inférieur.

Les tests sur deux exemples réels (pipeline à 5 dépôts, 3 à 4 produits) sous CPLEX 22.1/GAMS 43 montrent que le modèle atteint le *makespan* optimal de Liao et al. (2019) pour l'exemple 2 (148,417 h) avec un temps de calcul réduit à 41 % de celui du modèle LCLZ et 28 % de celui du modèle GM.

Construction de l'ensemble d'incertitude par SVC. L'approche de Baghban et al. utilise le *Support Vector Clustering* (SVC) à noyau linéaire, plus précisément le noyau WGIK (*Weighted Generalized Intersection Kernel*) introduit par Shang et al. (2017), pour apprendre automatiquement un ensemble d'incertitude convexe à partir des données historiques d'exploitation :

1. Un jeu de données synthétique de 300 points est généré à partir de distributions normales multivariées représentatives des débits d'injection réels;
2. Le SVC identifie la plus petite sphère englobant les données mappées dans l'espace des caractéristiques; les points hors de la sphère sont des valeurs aberrantes contrôlées par le paramètre ε ;
3. L'ensemble d'incertitude résultant est convexe et polyédral, ce qui préserve la linéarité du modèle MILP et prend en compte la corrélation entre les paramètres incertains via la matrice de pondération Q .

Le paramètre $\varepsilon \in (0, 1)$ règle le compromis robustesse/optimalité : quand $\varepsilon \rightarrow 1$, l'ensemble d'incertitude se concentre autour de la moyenne et la solution se rapproche de la solution déterministe.

Contre-parti robuste MILP. L'intégration de cet ensemble d'incertitude dans la formulation MILP robuste suit le contre-parti de Shang et al. (2017) : les contraintes incertaines de

débit d'injection sont remplacées par un système de contraintes linéaires auxiliaires faisant intervenir les variables duales μ_{abk} , λ_{abk} et η_k , ainsi que les vecteurs supports issus du SVC. La robustesse du modèle s'applique aux contraintes de débit de la forme :

$$-v_1 v_2 \cdots v_{|P|} L_k + \sum_{i,p} \prod_{p' \neq p} v_{p'} \cdot \text{VPR}_{i,p,k} \leq 0, \quad \forall k \in K,$$

où les v_p sont les débits d'injection incertains et L_k la durée du cycle k .

Comparaison avec l'approche Γ -robuste. Les résultats obtenus sur deux exemples (pipeline à 5 dépôts, 3–4 produits, horizon de 52 à 160 h) démontrent que :

- Pour un niveau de robustesse élevé (0 à 500 violations sur 1 700 points de test), la solution pilotée par les données présente un makespan plus court que la solution Γ -robuste : le débit d'injection au pire des cas est de 999 m³/h (SVC) contre 987 m³/h (Γ -robuste) pour le même niveau de couverture, permettant de satisfaire la demande plus rapidement ;
- L'approche SVC garantit que le pire scénario est l'un des points historiques eux-mêmes, alors que l'approche Γ -robuste construit un ensemble symétrique autour de la moyenne couvrant des zones éloignées des observations ;
- La contrepartie de cette performance est une augmentation notable de la taille du problème : pour l'exemple 1 avec $\varepsilon = 0,8$, le modèle robuste SVC compte 19 094 variables continues et nécessite 61 s de calcul, contre seulement 923 variables et 2 s pour l'approche Γ -robuste.

Apport pour le modèle multi-hubs. Cette approche ouvre une voie directe d'extension vers un modèle robuste capable d'absorber les variations de débit d'injection et de demande des zones de commande (SBA, Oran, Remchi, Naâma) sans compromettre la faisabilité du plan de pompage. Elle fournit également un cadre méthodologique pour l'exploitation des données historiques d'exploitation du réseau NAFTAL dans la construction d'ensembles d'incertitude adaptés au contexte algérien.

2.2.3 Approches hybrides et matheuristiques pour instances de grande taille

Pour les réseaux multi-hubs de grande taille, où les solveurs MILP exacts atteignent leurs limites computationnelles, plusieurs approches hybrides ont été développées. Ces travaux enrichissent les perspectives de résolution du modèle générique.

Moura, Becceneri et Yanasse [22] proposent un modèle hybride décomposant le problème en deux niveaux : une phase de planification globale suivie d'une phase d'ordonnancement

détaillé accompagnée de méthodes heuristiques itératives. Cette stratégie de décomposition est directement applicable aux réseaux multi-hubs de grande taille.

Ribas et al. [23] présentent un algorithme micro-génétique multi-objectifs hybridé avec le MILP pour résoudre conjointement les sous-problèmes d'ordonnancement et de synchronisation dans un réseau réel de pipelines. L'approche multi-objectif est pertinente pour le modèle multi-hubs qui vise simultanément à maximiser les stocks, minimiser les contaminations et maximiser le taux de service.

Meira et al. [24] proposent une matheuristique de décomposition en deux niveaux : un modèle d'affectation et de séquençement (ASM) et un modèle de segmentation (SM). Validée sur un réseau réel portugais avec des instances incluant maintenance et livraisons simultanées, cette méthode fournit des solutions opérationnellement réalisables en un temps raisonnable, offrant une alternative scalable au MILP pur pour les grands réseaux multi-hubs.

Éles et Heckl [25] proposent une approche de Simulation à Événements Discrets (DES) couplée à un recuit simulé pour des topologies en réseau maillé avec flux bidirectionnels. Le simulateur 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. Ce travail très récent ouvre des perspectives pour les extensions bidirectionnelles du modèle multi-hubs.

2.2.4 Intelligence artificielle et perspectives futures

Zhang et al. [26] proposent une approche d'auto-apprentissage combinant l'analyse par clustering flou et l'algorithme de colonie de fourmis (ACO). La méthode exploite une base de données historique pour identifier la solution initiale la plus proche du cas à résoudre, améliorant progressivement la qualité des solutions. Testée sur six cas réels d'un pipeline chinois de 375,5 km, elle surpasse les approches ACO classiques en vitesse de convergence. L'exploitation des données historiques est une perspective naturelle pour les réseaux multi-hubs exploités sur de longues périodes.

Zhou et al. [27] ont adopté une approche basée sur l'optimisation multi-objectif pour résoudre le problème complexe de la planification de transport dans un réseau de pipelines de gaz naturel en Chine. Les critères de performance incluent les coûts de transport, les contraintes de capacité et les émissions de gaz à effet de serre. L'intégration des objectifs environnementaux constitue une extension pertinente pour le modèle multi-hubs.

Acosta-Amado [28] a publié une revue systématique et bibliométrique complète couvrant 130 documents publiés entre 2015 et 2024. L'analyse révèle que plus de 90 % des travaux proviennent du Génie Chimique et de la Recherche Opérationnelle. Les trois fonctions objectif les plus fréquentes : minimisation des coûts de pompage, de gestion des stocks et de

retraitement des interfaces, couvrent environ 80 % de la littérature. L'auteur identifie plusieurs axes futurs : modélisation stochastique, décomposition de Benders, et topologies à flux bidirectionnel. Ces axes tracent directement les extensions possibles du modèle générique multi-hubs proposé dans ce mémoire.

2.2.5 Synthèse et tableau comparatif

Le tableau 2.1 présente une synthèse comparative des travaux retenus pour ce mémoire de master, avec indication de leur apport spécifique pour le modèle générique multi-hubs.

TAB. 2.1 : Synthèse comparative des principaux travaux de la littérature.

Auteur(s)/Année	Approche	Topologie	Contribution principale	Apport pour le master
Références fondatrices MILP				
Rejowski & Pinto [3]	MILP discret	1 source, multi-dépôts	Premier MILP discret complet. Pipeline OSBRA (955 km). Discrétisation en packs.	Base méthodologique MILP pour le réseau multi-hubs.
Cafaro & Cerdá [4]	MILP continu	1 source, multi-dépôts	Premier MILP continu. Formulation en slugs. Gain de 10^3 en temps de calcul vs. [3].	Justifie la représentation continue dans le modèle générique.
MirHassani & Ghorbanalizadeh [16]	MIP discret	Pipeline ramifié (Y)	Concept de chemin actif pour topologies en embranchement.	Gestion des connexions entre hubs de différents niveaux.
Mostafaei & Ghaffari-Hadigheh [5]	MILP continu	1 source, multi-dépôts	Livraisons simultanées, long terme. Réduction du coût de 15,83 %.	Contraintes de livraisons simultanées entre hubs.
Abdellaoui et al. [17]	MILP continu	Cas algérien (166 km)	Cas réel NAFTAL. 4 produits, 2 centres, 11 250 contraintes. Résolu en 3,76 min.	Validation du modèle MILP sur un cas algérien réel.
Extensions structurelles , réseaux et topologies complexes				

(suite page suivante)

(suite du tableau 2.1)

Auteur(s)/Année	Approche	Topologie	Contribution principale	Apport pour le master
MirHassani & Fani Jahromi [6]	MILP continu	Pipeline arborescent	Hubs intermédiaires alimentant des hubs terminaux. Coûts stockage + contamination + pompage.	Modélisation des hubs secondaires alimentant les hubs terminaux.
MirHassani et al. [18]	MILP continu	Nœuds mixtes	Dépôts à double fonction (injection + réception). –35 % de variables binaires.	Hubs simultanément source et destination.
Magatao et al. [12]	MILP décomposé	30 canalisations, 14 nœuds	Décomposition hiérarchique 3 niveaux. 4 raffineries, 6 dépôts.	Structure hiérarchique applicable au réseau multi-hubs.
Baghban & Yousefi-khoshbakht [19]	MILP discret	Multi-raffineries, multi-dépôts	Injections simultanées, nœuds à double fonction. Réduction coûts 0,8–1,5 %.	Réseau à sources multiples, hubs de différents niveaux.
Wodecki et al. [20]	MILP (bin-packing)	Réseau complexe, 12 nœuds	Formulation bin-packing 1D. Horizon 31 jours en < 1 000 s.	Scalabilité pour des réseaux de grande taille.
Li et al. [11]	MILP continu, 2 étapes	Multi-sources, multi-terminaux	Numérotation dynamique des lots. Découpage au nœud de transfert en sous-problèmes amont/aval. Résolu en < 18 000 s CPU. Gain ×2 vs. Cafaro (2012).	Justifie le découpage hiérarchique aux nœuds de transfert entre hubs principaux et secondaires.

(suite page suivante)

(suite du tableau 2.1)

Auteur(s)/Année	Approche	Topologie	Contribution principale	Apport pour le master
Baghban, Castro & Oliveira [21]	Optim. robuste data-driven (SVC)	1 source, 5 dépôts (pipeline droit)	Noyau WGIK linéaire pour construire l'ensemble d'incertitude convexe sur les débits d'injection. Moins conservatif que Γ -robuste. Makespan optimal 148,4 h en 2,37 s.	Extension robuste du modèle multi-hubs face à la variabilité des débits et de la demande des zones de commande. Cadre pour exploiter les données historiques NAFTAL.
Approches hybrides et matheuristiques				
Moura et al. [22]	Hybride MILP + heuristique	1 source, multi-dépôts	Décomposition en 2 niveaux : planification globale + ordonnancement détaillé.	Stratégie de décomposition pour les réseaux multi-hubs.
Ribas et al. [23]	GA + MILP hybride	Réseau réel	Algorithme micro-génétique multi-objectifs hybridé avec MILP.	Gestion multi-objectif pour le réseau multi-hubs.
Meira et al. [24]	Matheuristique (ASM + SM)	1 source, multi-dépôts	Décomposition ASM + SM. Maintenance intégrée, livraisons simultanées.	Alternative scalable pour les grands réseaux multi-hubs.
Éles & Heckl [25]	DES + Recuit simulé	Réseau maillé, flux bidir.	10^5 sim./s. Faisabilité en < 100 s pour 4–6 sites, 5–7 produits.	Perspectives pour extensions bidirectionnelles.
Intelligence artificielle et synthèse bibliométrique				
Zhang et al. [26]	Auto-apprentissage (ACO + clustering flou)	1 source, multi-dépôts	Base de données historique + ACO. Réduction du temps de calcul.	Exploitation des données historiques pour les réseaux multi-hubs.

(suite page suivante)

(suite du tableau 2.1)

Auteur(s)/Année	Approche	Topologie	Contribution principale	Apport pour le master
Zhou et al. [27]	Optimisation multi-objectif	Réseau gaz naturel, Chine	Coûts + capacité + émissions GES. Compromis Pareto.	Intégration des objectifs environnementaux.
Acosta-Amado [28]	Revue bibliométrique systématique	Tous types	130 articles (2015–2024). Axes futurs : stochastique, Benders, bidirectionnel.	Positionnement du master dans les tendances récentes de la recherche.

2.3 Conclusion

La revue de la littérature présentée dans ce chapitre montre que la planification des réseaux pipelines multiproduits a fait l’objet de nombreux travaux, allant des formulations MILP classiques jusqu’aux approches hybrides et robustes les plus récentes. Ces contributions ont progressivement élargi le champ d’application des modèles d’optimisation, en passant de pipelines simples à des réseaux de plus en plus complexes et réalistes.

C’est dans cette continuité que s’inscrit le présent mémoire, en proposant un modèle générique adapté à un réseau hiérarchique multi-hubs, tenant compte des spécificités du réseau NAFTAL et des contraintes opérationnelles du contexte algérien.

Chapitre 3

Modélisation Mathématique du Réseau Pipeline Multi-Hubs

3.1 Introduction

La gestion d'un réseau de distribution de produits pétroliers par pipeline est un problème d'optimisation complexe qui nécessite une planification rigoureuse des opérations de pompage, une maîtrise des niveaux de stock et une satisfaction continue de la demande des différents centres de distribution. La nature multiproduit du pipeline introduit une contrainte supplémentaire liée à la contamination aux interfaces entre produits successifs, qu'il est indispensable de quantifier et de contrôler.

Ce chapitre est consacré à la formulation mathématique du problème d'optimisation. Nous présentons successivement les hypothèses simplificatrices du modèle, sa nomenclature, sa fonction objectif et l'ensemble de ses contraintes. Nous décrivons ensuite le réseau retenu pour la validation numérique ainsi que les données du cahier des charges associé.

3.2 Hypothèses du Modèle

La formulation mathématique repose sur les hypothèses suivantes :

1. **Structure hiérarchique à trois niveaux.** Le réseau est composé de hubs principaux, de hubs secondaires et de hubs terminaux. Chaque hub est alimenté par une et une seule source amont.
2. **Capacité infinie des hubs principaux.** Les hubs principaux (raffineries) sont supposés disposer d'une capacité de stockage illimitée. Ils ne sont donc pas soumis aux contraintes de capacité et n'apparaissent pas dans la fonction objectif.
3. **Pipeline monodirectionnel.** Le produit circule dans un sens unique, du hub amont vers le hub aval, avec un délai de transit fixe entre deux hubs consécutifs.
4. **Volume d'injection fixe.** À chaque opération de lancement, un volume fixe VL est injecté dans le pipeline.

5. **Un seul produit lancé par période.** À chaque instant de lancement, au plus un produit peut être pompé depuis un hub vers le hub aval qui lui est associé.
6. **Contamination aux interfaces.** Lorsque deux produits différents se succèdent dans le pipeline, une zone de contamination se forme à leur interface. Le volume contaminé est proportionnel au volume moyen de contamination et à la fraction propre à chaque produit.
7. **Récupération partielle du contaminat.** Une fraction du stock contaminé peut être récupérée à chaque arrivée de produit, dans la limite de la capacité de correction du hub.
8. **Demande connue et déterministe.** Les demandes des zones de commande pour chaque produit sont supposées connues et fixes sur l'ensemble de l'horizon de planification (120 périodes de 2 heures). La demande est exprimée par période élémentaire de pompage.
9. **Desserte routière des zones de commande.** Les zones de commande sont desservies exclusivement par transport routier depuis les hubs secondaires ou terminaux.
10. **Discrétisation temporelle.** L'horizon de planification couvre une décade (10 jours) subdivisée en 120 périodes de pompage consécutives sans arrêt du pipeline, chaque période correspondant à 2 heures de pompage.
11. **Conditions initiales et finales imposées.** Les niveaux de stock initiaux et les stocks minimaux de sécurité en fin d'horizon sont fixés comme paramètres du modèle.

3.3 Modèle Mathématique Générique

Le modèle proposé est de type **Programmation Linéaire en Nombres Entiers Mixtes (PLNE/MILP)**.

Il représente un réseau pipeline structuré en trois niveaux hiérarchiques : des hubs principaux alimentés par les raffineries, des hubs secondaires alimentés par les hubs principaux, et des hubs terminaux alimentés par les hubs secondaires ou directement par les hubs principaux. Les zones de commande sont desservies par transport routier depuis les hubs secondaires et terminaux.

Les hubs principaux étant supposés à capacité infinie, ils n'apparaissent ni dans les contraintes de capacité ni dans la fonction objectif.

3.3.1 Nomenclature

Ensembles

Ensemble	Description
i	Ensemble des hubs du réseau logistique.
$i_1 \subset i$	Ensemble des hubs principaux.
$i_2 \subset i$	Ensemble des hubs secondaires.
$i_3 \subset i$	Ensemble des hubs terminaux.
j	Ensemble des zones de commande.
$j_1 \subset j$	Ensemble des zones de commande desservies par les hubs secondaires.
$j_2 \subset j$	Ensemble des zones de commande desservies par les hubs terminaux.
p	Ensemble des produits considérés, tel que $p \in \{1, \dots, NP\}$.
tl	Ensemble des instants de lancement.
tl_1	Lancements des hubs principaux vers les hubs secondaires.
tl_2	Lancements des hubs secondaires vers les hubs terminaux.
TL	Horizon de planification (120 périodes de 2 h).
ta	Ensemble des instants d'arrivée.
ta_1	Instants d'arrivée au niveau des hubs secondaires.
ta_2	Instants d'arrivée au niveau des hubs terminaux.

Paramètres

Paramètre	Description
$dem(j, p, ta)$	Demande de la zone de commande j pour le produit p à la période ta (exprimée en m^3 par période de 2 h).
$Capc(p, i)$	Capacité de stockage du produit p dans le hub $i \in i_2 \cup i_3$.
$Capqtmp(p, i)$	Capacité de stockage du contaminat du produit p dans le hub $i \in i_2 \cup i_3$.
$AR(i', i)$	Temps d'acheminement entre les hubs i' et i (exprimé en nombre de périodes de 2 h).
VL	Volume lancé dans le pipeline par période.
$qtm(i)$	Volume de contaminat généré dans le pipeline alimentant le hub i .
$fraction(p)$	Fraction de contaminat associée au produit p .
$coef(p, i)$	Coefficient de contaminat : $coef(p, i) = fraction(p) \times qtm(i)$.
$prc(p, i)$	Pourcentage de récupération du contaminat dans le hub i .
ω	Coefficient de pondération du taux de service.
$StockInit(p, i)$	Stock initial du produit p dans le hub i .
$StockMin(p, i)$	Niveau minimal du stock final du produit p dans le hub i .
$QTMinit(p, i)$	Quantité initiale de contaminat du produit p dans le hub i .
M	Grande constante (Big-M) pour la linéarisation.
$CPhz(i, j)$	Coefficient de permission : égal à 1 si la zone de commande j est desservie par le hub $i \in i_2 \cup i_3$, 0 sinon.

Variables de décision

Variable	Description
$YL(tl, p, i)$	Variable binaire égale à 1 si le produit p est lancé à l'instant tl vers le hub i , 0 sinon.
$ya(ta, p, i)$	Variable binaire égale à 1 si le produit p arrive au hub i à l'instant ta , 0 sinon.
$yc(tl, p_1, tl+1, p_2, i)$	Variable binaire de contamination entre deux produits successifs p_1 et p_2 .
$qstock(ta, p, i)$	Quantité stockée du produit p dans le hub i à l'instant ta .
$qstockqtm(ta, p, i)$	Quantité de contaminat stockée du produit p dans le hub i à l'instant ta .
$Qcor(ta, p, i)$	Quantité de contaminat corrigée du produit p dans le hub i à l'instant ta .
$QSERV(p, ta, j)$	Quantité servie à la zone de commande j pour le produit p à l'instant ta .
$frqtm1(ta, p, i)$	Fraction de contaminat arrivée au hub $i \in i_2 \cup i_3$ pour le produit p à l'instant ta , générée par le premier produit lors d'un changement de séquence.
$frqtm2(ta, p, i)$	Fraction de contaminat arrivée au hub $i \in i_2 \cup i_3$ pour le produit p à l'instant ta , générée par le second produit lors d'un changement de séquence.
$frqtm1(tl, tl+1, p_1, i)$	Fraction de contaminat générée côté produit p_1 lors du changement de séquence $(tl, tl+1)$ dans le pipeline alimentant le hub $i \in i_2 \cup i_3$.
$frqtm2(tl, tl+1, p_2, i)$	Fraction de contaminat générée côté produit p_2 lors du changement de séquence $(tl, tl+1)$ dans le pipeline alimentant le hub $i \in i_2 \cup i_3$.
$z(ta, p, i)$	Variable binaire auxiliaire pour la linéarisation de $Qcor$.

3.3.2 Fonction Objectif

$$\begin{aligned}
\max Z = & \underbrace{\sum_{i \in i_2 \cup i_3} \sum_{p \in P} \sum_{ta \leq TL} \frac{qstock(ta, p, i)}{Capc(p, i)}}_{\text{(A) Taux de remplissage}} \\
& - \underbrace{\sum_{i \in i_2 \cup i_3} \sum_{tl < TL} \sum_{\substack{p_1, p_2 \in P \\ p_1 \neq p_2}} \frac{qtm(i)}{VL} \cdot yc(tl, p_1, tl + 1, p_2, i)}_{\text{(B) Pénalité de contamination}} \\
& + \omega \underbrace{\sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{ta \leq TL} \frac{QSERV(p, ta, j)}{dem(j, p, ta)}}_{\text{(C) Taux de service}}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

avec $dem(j, p, ta) > 0$ et $\omega \gg 1$.

Le terme (A) favorise le maintien de niveaux de stock élevés dans les hubs. Le terme (B) pénalise les changements de produits générant des contaminations. Le terme (C) maximise la quantité livrée par rapport à la demande totale, avec un poids ω pour prioriser la satisfaction de la demande.

3.3.3 Contraintes

Contrainte 1 : Un seul produit injecté par période

$$\sum_{p \in P} YL(tl, p, i) \leq 1 \quad \forall tl, \quad \forall i \in i_1 \tag{3.2}$$

Cette contrainte garantit qu'un seul produit peut être injecté dans le pipeline à un instant donné pour chaque hub principal.

Contrainte 2 : Continuité des lancements

$$\sum_{p \in P} YL(tl + 1, p, i) \leq \sum_{p \in P} YL(tl, p, i) \quad \forall tl < TL, \quad \forall i \in i_1 \tag{3.3}$$

Cette contrainte assure la continuité logique des opérations de pompage : il ne peut pas y avoir de lancement en $tl + 1$ si aucun lancement n'a eu lieu en tl .

Contrainte 3 : Relation lancement–arrivée

$$ya(ta, p, i) = YL(tl, p, i') \quad \text{avec } ta = tl + AR(i', i), \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.4)$$

Cette relation relie l’instant d’injection au hub amont i' à l’instant d’arrivée du produit au hub aval i , avec un délai de transit $AR(i', i)$ périodes (multiples de 2 h).

Contrainte 4 : Détection de contamination

La contamination apparaît lorsque deux produits différents se succèdent dans le pipeline. La forme originale non linéaire est :

$$yc(tl, p_1, tl + 1, p_2, i) = \min(YL(tl, p_1, i), YL(tl + 1, p_2, i)) \\ \forall p_1 \neq p_2, \quad tl < TL, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.5)$$

Linéarisation. L’opérateur min est remplacé par les trois contraintes linéaires suivantes :

$$yc(tl, p_1, tl + 1, p_2, i) \leq YL(tl, p_1, i) \\ \forall p_1 \neq p_2, \quad tl < TL, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.6)$$

$$yc(tl, p_1, tl + 1, p_2, i) \leq YL(tl + 1, p_2, i) \\ \forall p_1 \neq p_2, \quad tl < TL, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.7)$$

$$yc(tl, p_1, tl + 1, p_2, i) \geq YL(tl, p_1, i) + YL(tl + 1, p_2, i) - 1 \\ \forall p_1 \neq p_2, \quad tl < TL, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.8)$$

Ces trois contraintes garantissent que $yc = 1$ si et seulement si les deux produits p_1 et p_2 sont lancés consécutivement.

Contrainte 5 : Absence de contamination entre segments identiques

$$yc(tl, p, tl + 1, p, i) = 0 \quad \forall p \in P, \quad tl < TL, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.9)$$

Aucune contamination n'est générée lorsque deux segments successifs transportent le même produit.

Contrainte 6 : Contamination uniquement entre segments directement successifs

$$yc(tl, p_1, tl', p_2, i) = 0 \quad \forall tl' > tl + 1, \quad \forall p_1 \neq p_2, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.10)$$

La contamination ne peut apparaître qu'entre deux segments directement successifs dans le temps.

Contrainte 7 : Contaminat côté premier produit p_1

$$\begin{aligned} frqtm1(tl, tl + 1, p_1, i) &= fraction(p_1) \cdot yc(tl, p_1, tl + 1, p_2, i) \cdot qtm(i) \\ &\quad \forall p_2 \neq p_1, \quad tl < TL, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Cette contrainte calcule la quantité de contaminat générée côté produit p_1 lors d'un changement de séquence.

Contrainte 8 : Contaminat côté second produit p_2

$$\begin{aligned} frqtm2(tl, tl + 1, p_2, i) &= fraction(p_2) \cdot yc(tl, p_1, tl + 1, p_2, i) \cdot qtm(i) \\ &\quad \forall p_2 \neq p_1, \quad tl < TL, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Cette contrainte calcule la quantité de contaminat générée côté produit p_2 .

Contrainte 9 : Transfert du contaminat p_1 vers le hub aval

$$\begin{aligned}
frqtm1(tl, tl + 1, p_1, i) &= frqtm1(ta, p_1, i) \\
\forall p_1 \in P, \quad ta &= tl + AR(i', i), \quad ta \leq TL, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3
\end{aligned} \tag{3.13}$$

La fraction contaminée $frqtm1$ est transférée vers la variable d'arrivée $frqtm1$ avec le délai de transit $AR(i', i)$ périodes.

Contrainte 10 : Transfert du contaminat p_2 vers le hub aval

$$\begin{aligned}
frqtm2(tl, tl + 1, p_2, i) &= frqtm2(ta, p_2, i) \\
\forall p_2 \in P, \quad ta &= (tl + 1) + AR(i', i), \quad ta \leq TL, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3
\end{aligned} \tag{3.14}$$

La fraction contaminée $frqtm2$ est transférée vers la variable d'arrivée $frqtm2$ avec le délai de transit $AR(i', i)$ périodes.

Contrainte 11 : Quantité récupérée de contaminat

La forme originale non linéaire est :

$$\begin{aligned}
Qcor(ta, p, i) &= \min(prc(p, i) \times VL \times ya(ta, p, i), qstockqtm(ta, p, i)) \\
\forall ta, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Linéarisation. L'opérateur min est linéarisé à l'aide de la variable binaire auxiliaire $z(ta, p, i) \in \{0, 1\}$ et de la grande constante M :

$$Qcor(ta, p, i) \leq prc(p, i) \times VL \times ya(ta, p, i) \quad \forall ta, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \tag{3.16}$$

$$Qcor(ta, p, i) \leq qstockqtm(ta, p, i) \quad \forall ta, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \tag{3.17}$$

$$Q_{cor}(ta, p, i) \geq prc(p, i) \times VL \times ya(ta, p, i) - M(1 - z(ta, p, i))$$

$$\forall ta, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.18)$$

$$Q_{cor}(ta, p, i) \geq qstockqtm(ta, p, i) - M \cdot z(ta, p, i) \quad \forall ta, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3$$

$$(3.19)$$

Ces quatre contraintes assurent que Q_{cor} prend la valeur du minimum des deux termes.

Contrainte 12 : Évolution du stock contaminé

$$qstockqtm(ta, p, i) = qstockqtm(ta - 1, p, i) + frqtma1(ta, p, i) + frqtma2(ta, p, i) - Q_{cor}(ta, p, i)$$

$$\forall ta > 0, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.20)$$

Cette équation décrit l'évolution temporelle du stock contaminé : il s'accroît des fractions contaminées apportées par chaque changement de produit et diminue de la quantité récupérée.

Contrainte 13 : Évolution du stock des hubs secondaires

$$qstock(ta, p, i) = ya(ta, p, i) \times VL + qstock(ta - 1, p, i) + Q_{cor}(ta, p, i)$$

$$- frqtma1(ta, p, i) - frqtma2(ta, p, i) \quad (3.21)$$

$$- \sum_{j \in j_1} QSERV(p, ta, j) - \sum_{i' \in i_3} VL \times ya(ta, p, i')$$

$$\forall ta > 0, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2$$

Cette contrainte représente l'évolution du stock des hubs secondaires, qui alimentent simultanément les zones de commande j_1 et les hubs terminaux i_3 . La sélectivité des livraisons par hub est assurée séparément par la contrainte de permission (3.23).

Contrainte 14 : Évolution du stock des hubs terminaux

$$\begin{aligned}
qstock(ta, p, i) = & ya(ta, p, i) \times VL + qstock(ta - 1, p, i) + Qcor(ta, p, i) \\
& - frqtma1(ta, p, i) - frqtma2(ta, p, i) - \sum_{j \in j_2} QSERV(p, ta, j) \\
& \forall ta > 0, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_3
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Cette équation représente l'évolution du stock des hubs terminaux, qui desservent uniquement les zones de commande j_2 . La sélectivité des livraisons est également contrôlée par la contrainte de permission (3.23).

Contrainte 15 : Permission de service hub–zone de commande

$$\begin{aligned}
QSERV(p, ta, j) \leq & M \cdot CPhz(i, j) \\
& \forall p \in P, \quad \forall ta, \quad \forall j \in J, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Cette contrainte garantit qu'une zone de commande j ne peut être approvisionnée par le hub i que si $CPhz(i, j) = 1$. Si $CPhz(i, j) = 0$, la borne supérieure devient nulle et aucune quantité ne peut être servie depuis ce hub vers cette zone.

Contrainte 16 : Capacité maximale de stockage

$$qstock(ta, p, i) \leq Capc(p, i) \quad \forall ta, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \tag{3.24}$$

Le niveau de stock ne dépasse jamais la capacité physique du hub.

Contrainte 17 : Capacité maximale du stock contaminé

$$qstockqtm(ta, p, i) \leq Capqtmp(p, i) \quad \forall ta, \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \tag{3.25}$$

Contrainte 18 : Satisfaction de la demande

$$QSERV(p, ta, j) \leq dem(j, p, ta) \quad \forall p \in P, \quad \forall ta, \quad \forall j \in J \quad (3.26)$$

La quantité servie ne peut pas excéder la demande exprimée par chaque zone de commande.

Contrainte 19 : Quantité servie initiale nulle

$$QSERV(p, 0, j) = 0 \quad \forall p \in P, \quad \forall j \in J \quad (3.27)$$

Aucune demande n'est satisfaite à l'instant initial.

Contrainte 20 : Conditions initiales des stocks

$$qstock(0, p, i) = StockInit(p, i) \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.28)$$

Contrainte 21 : Conditions initiales du stock contaminé

$$qstockqm(0, p, i) = QTMinit(p, i) \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.29)$$

Ces deux contraintes fixent l'état initial du pipeline, supposé rempli par le gazoil P_2 avant le début de l'exploitation.

Contrainte 22 : Conditions finales des stocks (stock de sécurité)

$$qstock(TL, p, i) \geq StockMin(p, i) \quad \forall p \in P, \quad \forall i \in i_2 \cup i_3 \quad (3.30)$$

Cette contrainte garantit un stock minimal de sécurité à la fin de l'horizon de planification.

3.4 Réseau d'Application

3.4.1 Description du Réseau

Le réseau retenu pour la validation numérique est inspiré du réseau pétrolier algérien exploité par NAFTAL dans le nord-ouest algérien. Il s'appuie sur l'infrastructure existante reliant la raffinerie d'Arzew aux principaux centres de distribution, enrichie d'une extension proposée vers le sud du pays.

La topologie du réseau est la suivante :

- **Hub principal : Arzew (ARZ).** Point d'injection unique de tous les produits dans le réseau. Sa capacité est supposée infinie à l'échelle de l'horizon de planification. Il peut être approvisionné par voie maritime.
- **Hub secondaire : Sidi Bel Abbès (SBA).** Alimenté directement par ARZ via le pipeline principal existant. Il redistribue les produits vers ses zones de commande locales et vers les hubs terminaux en aval.
- **Hub terminal : Remchi.** Hub terminal existant, alimenté par SBA, desservant les zones de commande de la région de Tlemcen.
- **Hub terminal : Oran.** Hub terminal existant, alimenté directement par ARZ, constituant un cas particulier de hub terminal relié directement au hub principal.
- **Hub terminal : Naâma (*proposition*).** Ce hub terminal ne fait pas partie de l'infrastructure actuelle de NAFTAL. Son intégration dans le réseau est une **proposition originale** de ce travail, visant à améliorer et rationaliser la distribution des carburants vers les wilayas du sud. Il serait alimenté par SBA via une extension du pipeline existant.

Niveau	Hub	Source	Rôle	Statut
i_1	Arzew (ARZ)	Raffinerie / maritime	Hub principal	Existant
i_2	Sidi Bel Abbès (SBA)	ARZ	Hub secondaire	Existant
i_3	Remchi	SBA	Hub terminal	Existant
i_3	Oran	ARZ (direct)	Hub terminal	Existant
i_3	Naâma	SBA	Hub terminal	Proposé

TAB. 3.1 : Structure hiérarchique du réseau d'application (le hub de Naâma est une proposition d'extension).

Les deux produits transportés sont : Essence et Gasoil. L'état initial du pipeline est supposé rempli de gazoil.

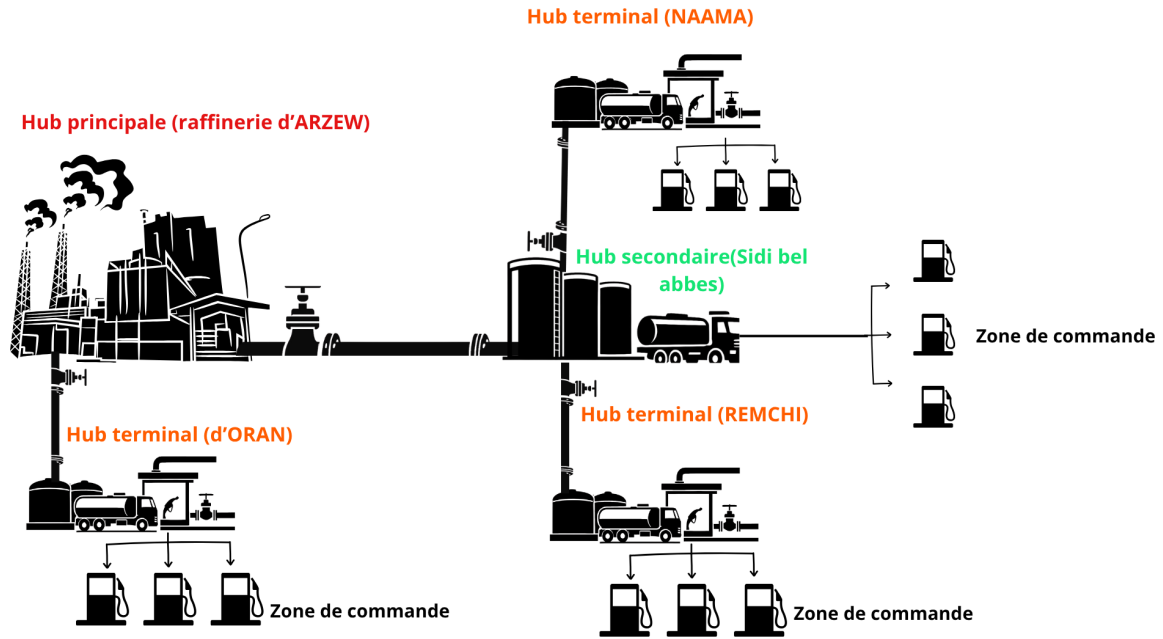


FIG. 3.1 : Schéma du réseau pipeline multiproduit multi-hubs.

3.4.2 Cahier des Charges

Paramètres généraux

Paramètre	Valeur
Horizon de planification TL	10 jours (1 décade)
Nombre de périodes	120 périodes de pompage
Durée d'une période	2 heures
Fonctionnement du pipeline	Continu (sans arrêt)
Nombre de produits NP	2
Coefficient ω	1000

TAB. 3.2 : Paramètres généraux de la simulation.

Délais de transit entre hubs

Segment	Trajet	$AR(i', i)$ (périodes)
AR_1	ARZ $\rightarrow$ Oran	6
AR_2	ARZ $\rightarrow$ SBA	14
AR_3	SBA $\rightarrow$ Remchi	9
AR_4	SBA $\rightarrow$ Naâma	20

TAB. 3.3 : Délais de transit entre les hubs (en nombre de périodes de 2 h).

Capacités de stockage

Hub	$Capc(P_1, i)$ (m ³)	$Capc(P_2, i)$ (m ³)	Statut
Oran	28 000	100 000	Estimé
SBA	30 000	150 000	Estimé
Remchi	14 000	22 000	Réel
Naâma	14 000	32 000	Hypothétique

TAB. 3.4 : Capacités de stockage par hub.

Conditions initiales

Hub	$StockInit(P_1)$ (m ³)	$StockInit(P_2)$ (m ³)	$QTMinit(P_1)$ (m ³)	$QTMinit(P_2)$ (m ³)
Oran	14 000	50 000	190	170
SBA	15 000	130 000	190	170
Remchi	7 000	11 000	190	170
Naâma	7 000	16 000	190	170

TAB. 3.5 : Conditions initiales des stocks de produit et de contaminat à $ta = 0$.**3.4.3 Scénarios de Demande**

Afin d'évaluer la robustesse du modèle d'optimisation proposé, trois scénarios de demande ont été définis et testés : un scénario de **faible demande**, un scénario de **demande moyenne** et un scénario de **forte demande**. Ces scénarios permettent de simuler différentes conditions opérationnelles réelles et de vérifier la capacité du modèle à s'adapter à des niveaux de consommation variables sur l'ensemble des hubs de distribution. La demande est exprimée

en **mètres cubes par période de 2 heures** et est supposée constante sur les 120 périodes de pompage actives de l'horizon de planification (périodes 1 à 120), puis nulle sur les périodes restantes correspondant aux délais de transit.

*Note : les valeurs de demande utilisées dans ces scénarios sont des **estimations**. Elles ne constituent pas des mesures exactes et sont susceptibles de varier selon les conditions réelles d'exploitation.*

Pour chaque hub, la demande est fournie pour les deux produits transportés : P_1 (Essence) et P_2 (Gasoil).

Scénario 1 : Faible Demande

Produit	Hub secondaire SBA	Hubs terminaux		
		Remchi	Naâma	Oran
P_1 : Essence (m ³ /période)	29	7	8	15
P_2 : Gasoil (m ³ /période)	151	12	13	46

TAB. 3.6 : Estimations des demandes par période (2 h) – Scénario faible demande.

Scénario 2 : Demande Moyenne

Produit	Hub secondaire SBA	Hubs terminaux		
		Remchi	Naâma	Oran
P_1 : Essence (m ³ /période)	41	10	11	21
P_2 : Gasoil (m ³ /période)	211	17	18	65

TAB. 3.7 : Estimations des demandes par période (2 h) – Scénario demande moyenne.

Scénario 3 : Forte Demande

Produit	Hub secondaire SBA	Hubs terminaux		
		Remchi	Naâma	Oran
P_1 : Essence (m ³ /période)	53	13	13	26
P_2 : Gasoil (m ³ /période)	272	22	23	83
Total $P_1 + P_2$ (m³/période)	325	35	36	109

TAB. 3.8 : Estimations des demandes par période (2 h) – Scénario forte demande.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté le modèle mathématique générique de type MILP développé pour l'optimisation du réseau pipeline multiproduit multi-hubs. Le modèle prend en compte la structure hiérarchique du réseau, la gestion de la contamination aux interfaces et la satisfaction de la demande des zones de commande. Les contraintes non linéaires ont été linéarisées par la technique du Big-M, rendant le modèle exploitable par le solveur CPLEX. Le chapitre suivant présente et analyse les résultats obtenus, visualisés à l'aide de l'outil Power BI.

Chapitre 4

Présentation et Interprétation des Résultats

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus après résolution du modèle MILP par le solveur CPLEX. On y examine, pour les trois scénarios de demande (faible, moyenne et forte), les séquences de pompage optimales sous forme de diagrammes de Gantt, puis l'évolution des stocks, du contaminat et des quantités servies à travers les tableaux de bord Power BI des quatre hubs du réseau : SBA, Remchi, Naâma et Oran.

4.2 Séquences de Pompage Optimales : Diagrammes de Gantt

4.2.1 Remarque préliminaire

Dans tous les scénarios et sur tous les axes, deux hypothèses initiales du modèle se reflètent directement dans les diagrammes de Gantt.

Concernant les arrivées (YA) : Les premières arrivées enregistrées à chaque hub sont systématiquement du **Gazoil (P2)**, car le pipeline est supposé initialement rempli de Gazoil. Ce contenu résiduel se propage naturellement vers les hubs aval avant même le premier lancement planifié, et arrive à chaque hub avec le délai de transit propre à son segment. Ainsi, avant que le premier lancement effectif n'arrive à destination, le Gazoil initial remplit déjà les cuves des hubs secondaires et terminaux.

Concernant les lancements (YL) : Le premier lancement sur les axes partant directement du hub principal ARZ est systématiquement le Gazoil. Cette contrainte d'initialisation imposée au modèle garantit la cohérence entre l'état initial du pipeline rempli de Gazoil et le début des opérations de pompage planifiées : le premier produit lancé depuis ARZ doit être du Gazoil pour assurer la continuité de la séquence avec le contenu résiduel déjà présent dans la conduite. En revanche, sur les axes partant du hub secondaire SBA, cette période initiale de Gazoil n'apparaît pas, SBA n'étant pas un hub principal.

Ces deux hypothèses sont distinctes et indépendantes : l'une concerne le contenu physique

initial du pipeline qui se propage vers les arrivées, l'autre est une contrainte de démarrage imposée aux lancements depuis ARZ par le modèle MILP.

4.2.2 Scénario Faible Demande

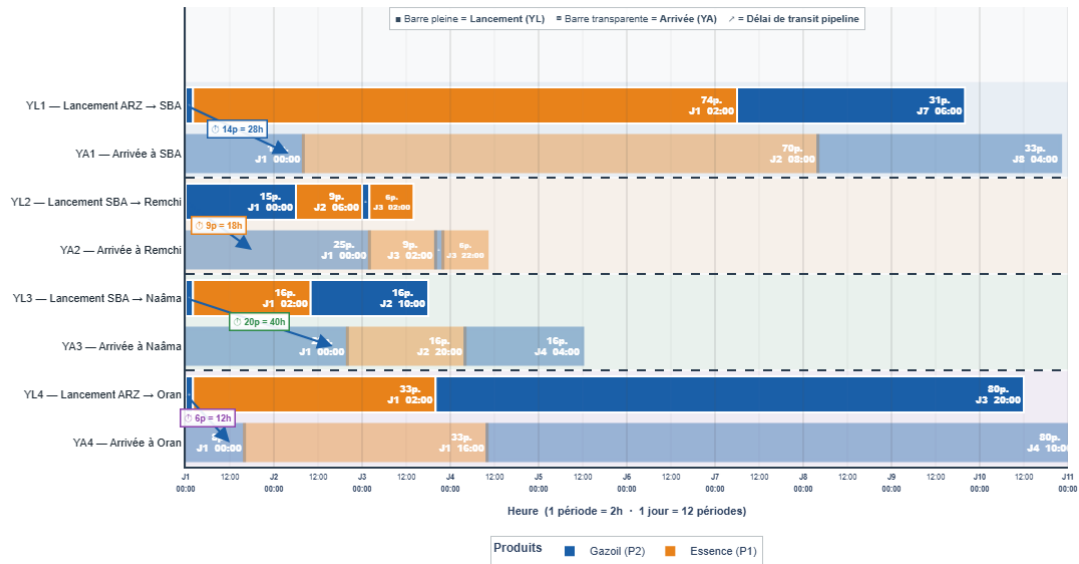


FIG. 4.1 : Diagramme de Gantt – Scénario faible demande.

Axe ARZ → SBA (délai de transit : 14 périodes = 28h)

La séquence de lancement planifiée par le modèle est : **G(1p) → E(74p) → G(31p)**. Le lancement débute par une période de Gazoil correspondant au contenu initial du pipeline depuis ARZ, suivie d'un long batch d'Essence de 74 périodes lancé dès J1, puis d'un batch de Gazoil de 31 périodes à partir de J7. La séquence effective planifiée par le modèle génère **deux interfaces de contamination** : un premier changement G→E et un second changement E→G. Ce comportement reflète la stratégie du solveur face à une faible demande : privilégier un long approvisionnement en Essence en début d'horizon pour satisfaire la demande de SBA et de ses hubs aval, puis compléter avec du Gazoil en fin de décade. Les arrivées à SBA (YA1) débutent par le Gazoil initial dû au contenu résiduel du pipeline, l'Essence arrivant à J2 et le Gazoil final à J8, soit avec un décalage de 28 heures par rapport aux lancements correspondants.

Axe SBA → Remchi (délai de transit : 9 périodes = 18h)

La séquence de lancement est : **G(15p) → E(9p) → G(1p) → E(6p)**. Le modèle planifie 15 périodes de Gazoil à J1, suivies de 9 périodes d'Essence à J2, puis d'une période de Gazoil et enfin de 6 périodes d'Essence. La séquence G→E→G→E génère **trois interfaces de**

contamination. La présence de quatre batchs distincts sur cet axe traduit la nécessité de réalimenter Remchi alternativement en Gazoil et en Essence pour couvrir la demande sur les 10 jours, même si celle-ci est faible. Les arrivées à Remchi (YA2) suivent avec un décalage de 18 heures, le Gazoil initial du pipeline arrivant en premier.

Axe SBA → Naâma (délai de transit : 20 périodes = 40h)

La séquence de lancement est : **G(1p) → E(16p) → G(16p)**. Le lancement débute par une période de Gazoil correspondant au contenu initial du pipeline depuis ARZ transmis via SBA, suivie de 16 périodes d'Essence à J1 et de 16 périodes de Gazoil à J2. La séquence effective génère **deux interfaces de contamination** : $G \rightarrow E$ puis $E \rightarrow G$. Le délai de transit de 40 heures, le plus long du réseau, est la contrainte déterminante de cet axe : le modèle doit anticiper les lancements très tôt pour que les produits arrivent à Naâma en temps voulu. Les arrivées (YA3) débutent par le Gazoil initial, l'Essence arrivant à J2 et le Gazoil final à J4, soit avec un décalage de 40 heures par rapport aux lancements.

Axe ARZ → Oran (délai de transit : 6 périodes = 12h)

La séquence de lancement est : **G(1p) → E(33p) → G(80p)**. Le lancement débute par une période de Gazoil correspondant au contenu initial du pipeline depuis ARZ, suivie de 33 périodes d'Essence à J1 et d'un très long batch de Gazoil de 80 périodes à J3. La séquence génère **deux interfaces de contamination** : $G \rightarrow E$ puis $E \rightarrow G$. Le très long batch de Gazoil de 80 périodes couvrant quasiment toute la seconde moitié de l'horizon reflète la prédominance du Gazoil dans la demande d'Oran en faible demande. Le court délai de transit de 12 heures permet au modèle de réagir rapidement ; les arrivées (YA4) sont décalées d'une demi-journée seulement par rapport aux lancements.

4.2.3 Scénario Demande Moyenne

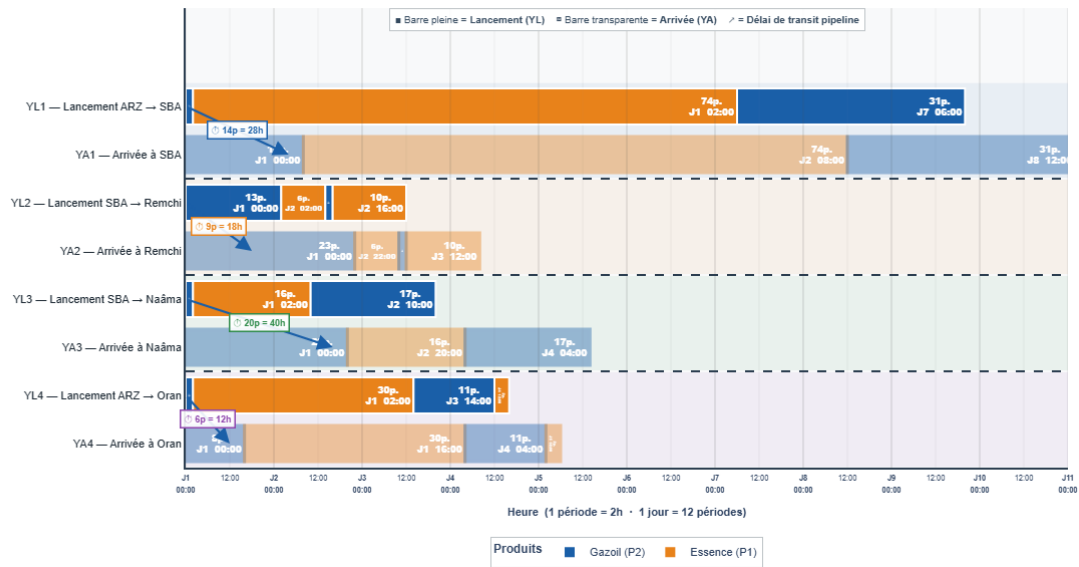


FIG. 4.2 : Diagramme de Gantt – Scénario demande moyenne.

Axe ARZ → SBA (délai de transit : 14 périodes = 28h)

La séquence de lancement est : **G(1p) → E(74p) → G(31p)**. La séquence est identique à celle du scénario faible demande et génère **deux interfaces de contamination**. La hausse de consommation entre les deux scénarios n'est pas suffisante pour modifier la stratégie de pompage sur l'axe principal ARZ→SBA, les stocks initiaux de SBA absorbant l'écart de consommation sur l'horizon de planification. Les arrivées à SBA (YA1) restent identiques au scénario faible, avec le Gazoil initial en tête, l'Essence arrivant à J2 et le Gazoil final à J8.

Axe SBA → Remchi (délai de transit : 9 périodes = 18h)

La séquence de lancement est : **G(13p) → E(6p) → G(1p) → E(10p)**. Par rapport au scénario faible, le premier batch de Gazoil se réduit de 15 à 13 périodes, tandis que le dernier batch d'Essence s'allonge de 6 à 10 périodes. Cette évolution traduit une demande en Essence plus élevée à Remchi en demande moyenne. La séquence **G→E→G→E** génère toujours **trois interfaces de contamination**, la structure générale restant identique au scénario faible. Les arrivées (YA2) suivent avec un décalage de 18 heures.

Axe SBA → Naâma (délai de transit : 20 périodes = 40h)

La séquence de lancement est : **G(1p) → E(16p) → G(17p)**. Par rapport au scénario faible, le batch de Gazoil final s'allonge d'une période (17p contre 16p), traduisant une légère augmentation de la demande en Gazoil à Naâma. La séquence effective génère **deux interfaces de**

contamination : $G \rightarrow E$ puis $E \rightarrow G$, identiques en structure au scénario faible. La contrainte du délai de transit de 40 heures reste prédominante et impose la même anticipation précoce des lancements. Les arrivées (YA3) suivent avec l'Essence à J2 et le Gazoil à J4.

Axe ARZ $\rightarrow$ Oran (délai de transit : 6 périodes = 12h)

La séquence de lancement est : **G(1p) $\rightarrow$ E(30p) $\rightarrow$ G(11p) $\rightarrow$ E(2p)**. Par rapport au scénario faible, la structure change significativement : un quatrième batch apparaît avec 2 périodes d'Essence en fin d'horizon, portant à **trois interfaces de contamination** la séquence $E \rightarrow G \rightarrow E$. Le batch d'Essence initial se réduit légèrement (30p contre 33p) et le long batch de Gazoil du scénario faible (80p) se réduit considérablement à 11p, ce qui indique que la demande moyenne d'Oran en Gazoil est mieux répartie sur l'horizon et nécessite un réapprovisionnement supplémentaire en Essence que le scénario faible ne requerrait pas. Les arrivées (YA4) suivent avec un décalage de 12 heures.

4.2.4 Scénario Forte Demande

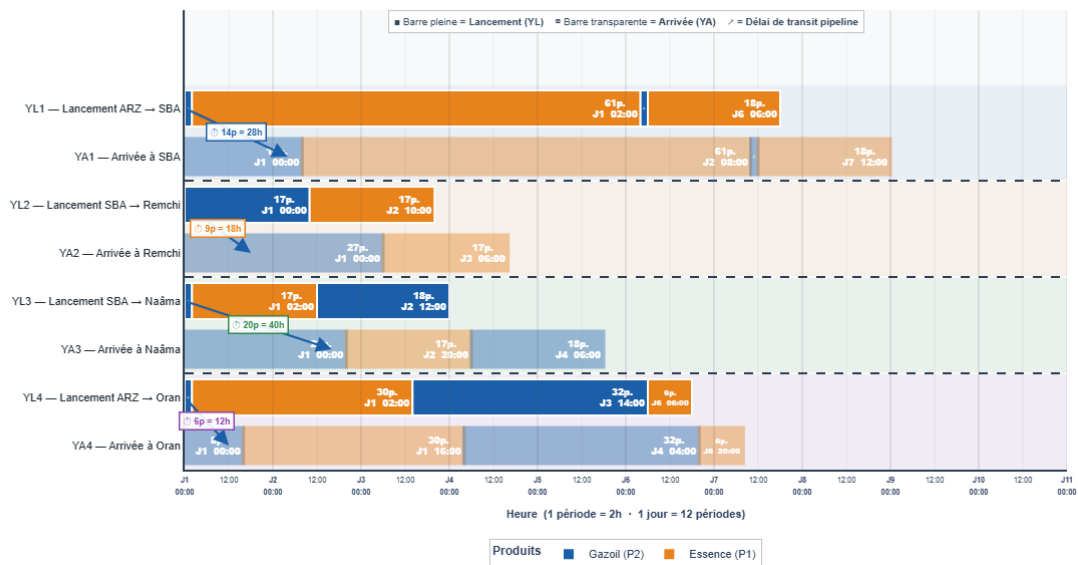


FIG. 4.3 : Diagramme de Gantt – Scénario forte demande.

Axe ARZ $\rightarrow$ SBA (délai de transit : 14 périodes = 28h)

La séquence de lancement est : **G(1p) $\rightarrow$ E(61p) $\rightarrow$ G(1p) $\rightarrow$ E(18p)**. Par rapport aux deux scénarios précédents où un seul batch d'Essence suffisait, le modèle planifie ici deux batches d'Essence séparés par une courte période de Gazoil, générant **trois interfaces de contamination** : $G \rightarrow E$, $E \rightarrow G$ puis $G \rightarrow E$. Le premier batch d'Essence se raccourcit de 74 à 61 périodes et un second batch d'Essence de 18 périodes apparaît en fin d'horizon. Cette structure indique que la forte consommation de SBA et de ses hubs aval épuise les stocks d'Essence plus

rapidement, forçant le modèle à prévoir un second approvisionnement en Essence avant la fin de la décade. Les arrivées (YA1) reflètent cette séquence avec un décalage de 28 heures.

Axe SBA → Remchi (délai de transit : 9 périodes = 18h)

La séquence de lancement est : **G(17p) → E(17p)**. La séquence se simplifie notablement par rapport aux scénarios précédents : seulement deux batchs de taille égale avec **une seule interface de contamination** $G \rightarrow E$, contre trois interfaces en faible et moyenne demande. Cette simplification est remarquable : en forte demande, le modèle opte pour deux gros batchs plutôt que plusieurs petits batchs alternés. Ce comportement est directement cohérent avec la pénalité de contamination (terme B) de la fonction objectif : en augmentant la taille des batchs et en réduisant leur nombre, le modèle minimise le nombre d'interfaces tout en livrant un volume total plus important pour satisfaire la forte demande. Les arrivées (YA2) : Gazoil à J1 et Essence à J3, avec un décalage de 18 heures.

Axe SBA → Naâma (délai de transit : 20 périodes = 40h)

La séquence de lancement est : **G(1p) → E(17p) → G(18p)**. Les tailles de batchs augmentent légèrement par rapport au scénario moyen (17p et 18p contre 16p et 17p), traduisant directement la hausse de demande à Naâma. La séquence génère **deux interfaces de contamination** : $G \rightarrow E$ puis $E \rightarrow G$, identiques en structure aux deux scénarios précédents. Le délai de transit de 40 heures demeure la contrainte dominante de cet axe, imposant la même anticipation précoce des lancements quelle que soit la demande. Les arrivées (YA3) : Essence à J2 et Gazoil à J4.

Axe ARZ → Oran (délai de transit : 6 périodes = 12h)

La séquence de lancement est : **G(1p) → E(30p) → G(32p) → E(6p)**. Cet axe présente l'évolution la plus marquée entre scénarios et génère **trois interfaces de contamination** : $G \rightarrow E$, $E \rightarrow G$ puis $G \rightarrow E$, comme en demande moyenne. Cependant les volumes changent considérablement : le batch de Gazoil passe de 11 périodes en demande moyenne à 32 périodes en forte demande, reflétant la forte hausse de la demande en Gazoil à Oran. Le dernier batch d'Essence de 6 périodes en toute fin d'horizon témoigne d'une tension sur les stocks d'Essence à Oran qui nécessite un ultime réapprovisionnement avant la fin de la décade. Le court délai de transit de 12 heures permet au modèle de réagir à cette tension en fin d'horizon. Les arrivées (YA4) suivent avec le décalage de 12 heures.

4.3 Visualisation des Résultats sur Power BI

Remarque préliminaire sur la lecture des tableaux de bord. Les tableaux de bord Power BI visualisent, pour chacun des quatre hubs et pour les trois scénarios de demande, quatre

indicateurs clés issus de la résolution CPLEX : l'évolution du stock des produits purs ($qstock$), l'évolution du stock contaminé ($qstockqtm$), les quantités servies par période ($QSERV$), et les jauges de taux de remplissage des cuves. L'axe des abscisses représente les jours J0 à J10, chaque valeur journalière correspondant à la moyenne ou à la somme des 12 périodes de 2 heures composant la journée. Les stocks sont exprimés en m^3 . L'interprétation qui suit met systématiquement en regard les courbes Power BI avec les instants d'arrivée calculés à partir des séquences de lancement des diagrammes de Gantt et des délais de transit propres à chaque segment.

Du point de vue de la fonction objectif (Chapitre 3, équation 3.1), les visualisations Power BI permettent de lire directement la contribution de chacun des trois termes : le terme (A) se lit dans les niveaux de stock des produits purs (plus les courbes $qstock$ sont élevées, plus la contribution au taux de remplissage est forte); le terme (B) se lit dans le nombre et l'amplitude des pics du stock contaminé (chaque pic correspond à une interface $G \rightarrow E$ ou $E \rightarrow G$ pénalisée); le terme (C), pondéré par $\omega = 1000$, se lit dans les histogrammes des quantités servies qui doivent coïncider exactement avec la demande à chaque période.

4.3.1 Hub Secondaire : Sidi Bel Abbès (SBA)

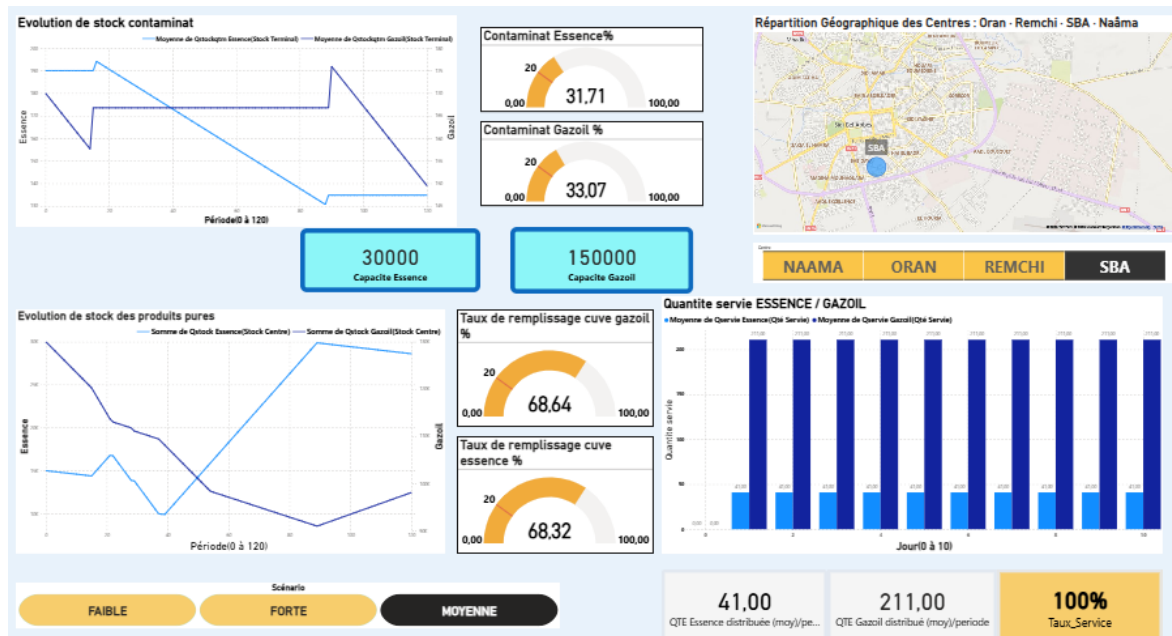


FIG. 4.4 : Tableau de bord Power BI – Vue générale du centre SBA.

Description de la vue générale. Le tableau de bord de SBA se compose de quatre zones fonctionnelles. En haut à gauche figure le graphique d'évolution du stock de contaminat, représentant les moyennes journalières de $qstockqtm$ pour l'Essence (axe gauche) et le Gazoil (axe droit) sur les 120 périodes. En haut au centre sont affichées les jauges de taux de

remplissage des cuves de contaminat (*Contaminat Essence%* et *Contaminat Gazoil%*), ainsi que les capacités de stockage des produits purs (30 000 m³ pour l'Essence et 150 000 m³ pour le Gazoil). En haut à droite se trouve la carte de répartition géographique des centres du réseau (Naâma, Oran, Remchi, SBA). Au centre gauche figure le graphique d'évolution du stock des produits purs (*qstock*), avec les jauges de taux de remplissage des cuves de produit pur (*Taux de remplissage cuve gazoil%* et *Taux de remplissage cuve essence%*). En bas à droite se trouvent les histogrammes des quantités servies en Essence et en Gazoil par jour, ainsi qu'un sélecteur de scénario (*FAIBLE*, *FORTE*, *MOYENNE*) permettant de filtrer l'ensemble du tableau de bord. Les chiffres résumés en bas (41,00 m³/période pour l'Essence et 211,00 m³/période pour le Gazoil avec un taux de service de 100%) correspondent au scénario demande moyenne actuellement sélectionné.

Scénario Faible Demande

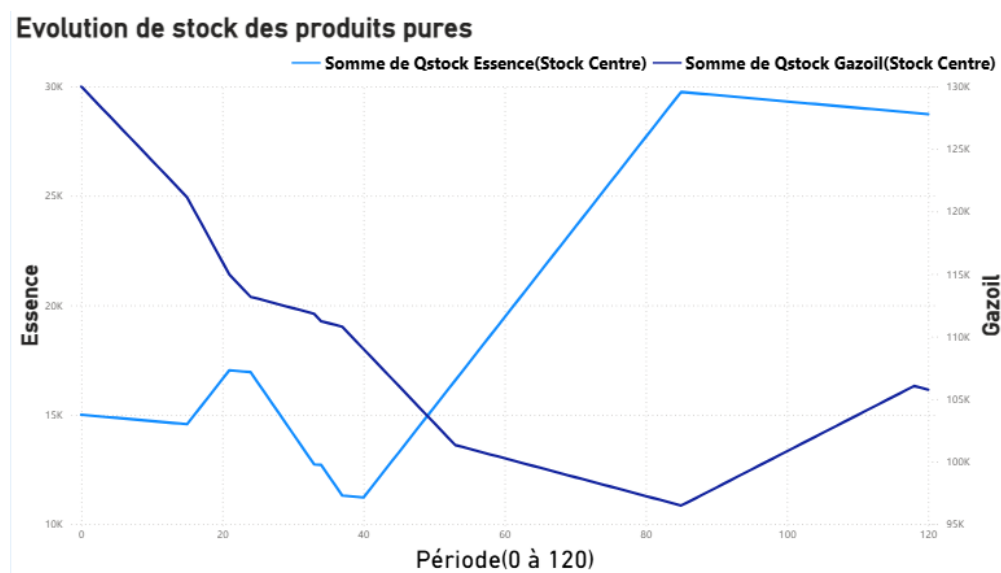


FIG. 4.5 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – SBA, scénario faible demande (J0–J10).

L'évolution du stock d'Essence à SBA (figure 4.5) présente un profil en « V » dont la dynamique est directement imputable à la séquence de lancement sur l'axe ARZ→SBA. Le stock démarre à 15 000 m³, puis décroît sous l'effet de la consommation locale et des expéditions vers les hubs terminaux de Remchi et de Naâma. Le minimum est atteint autour de la période 40 (soit vers J3–J4). La remontée intervient dès l'arrivée du premier batch d'Essence : ce batch est lancé depuis ARZ à $t_l = 2$ et arrive à SBA à $t_a = 16$, soit J1 (08h), compte tenu du délai de transit de 14 périodes = 28 h. Cette anticipation précoce, visible dans le diagramme de Gantt, est précisément ce qui permet au solveur de reconstituer le stock d'Essence sans rupture de service.

Le stock de Gazoil suit une trajectoire de décroissance progressive, partant de 130 000 m³ :

la demande combinée de SBA, des livraisons vers Remchi et vers Naâma érode le stock sur l'ensemble de la décade, mais aucun épuisement n'est observé, les stocks initiaux étant dimensionnés pour couvrir l'horizon sans réapprovisionnement en Gazoil nécessaire avant J7,5 (arrivée du batch G final à $t_a = 90$). Ce niveau élevé de stock contribue positivement au terme (A) de la fonction objectif.

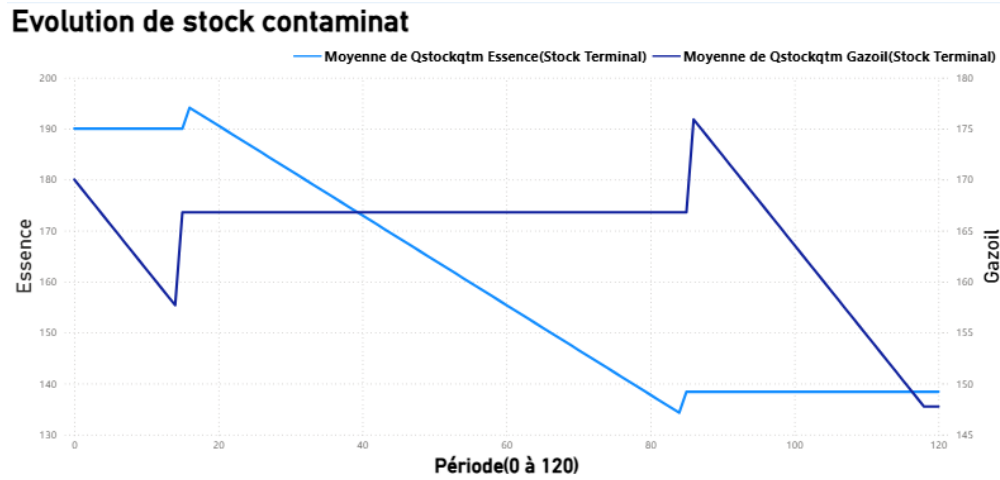


FIG. 4.6 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – SBA, scénario faible demande (J0–J10).

La courbe du stock contaminé (figure 4.6) présente deux pics distincts, chacun correspondant à l'arrivée d'une interface de changement de produit sur l'axe ARZ→SBA. Le premier pic apparaît vers J1 (07h) : il correspond à l'interface G→E, c'est-à-dire au moment où le front de séparation entre le Gazoil initial et le premier batch d'Essence arrive à SBA ($t_a = 16$). La zone de mélange entre les deux produits génère alors un volume de contaminat égal à $coef(p, i) = fraction(p) \times qtm(i)$ (contrainte 7 et 8 du modèle). Après ce pic, le stock contaminé décroît progressivement sous l'effet de la récupération partielle Q_{cor} (contrainte 11) : à chaque arrivée de produit pur, une fraction du contaminat est réintégrée dans le stock de produit noble si sa concentration reste en deçà du seuil admissible. Le second pic, plus tardif, vers J7 (12h), correspond à l'interface E→G (arrivée du changement d'Essence vers Gazoil à $t_a = 90$). En faible demande, seulement deux interfaces sont générées sur cet axe, conformément à la séquence G(1p)→E(74p)→G(31p) du diagramme de Gantt. La pénalité associée (terme B de la fonction objectif) reste donc minimale pour ce scénario.

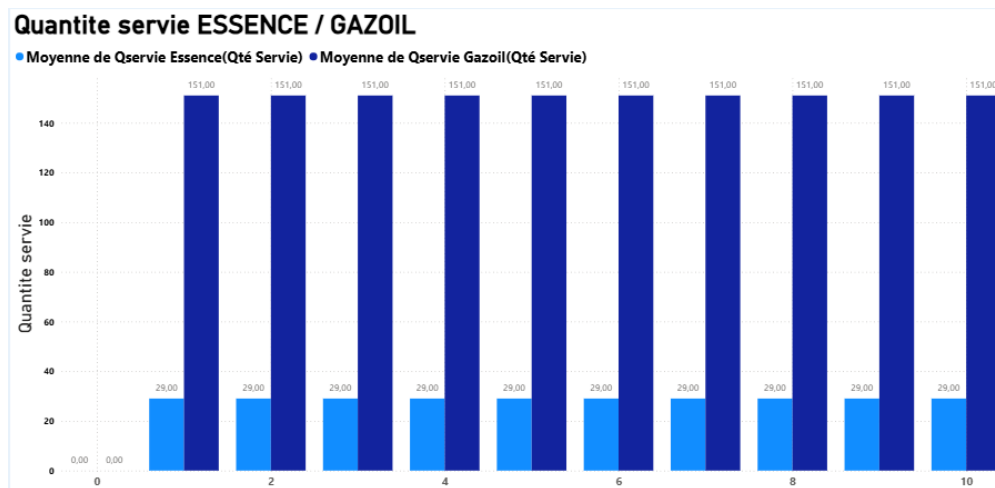


FIG. 4.7 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – SBA, scénario faible demande (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.7) sont constantes et strictement égales à la demande : $29 \text{ m}^3/\text{période}$ pour l'Essence et $151 \text{ m}^3/\text{période}$ pour le Gazoil sur l'ensemble de l'horizon. Cette constance est la signature directe du terme (C) de la fonction objectif : avec un coefficient $\omega = 1000$, le solveur priorise absolument la satisfaction de la demande ($QSERV(p, ta, j) = dem(j, p, ta)$ à chaque période), ce qui se traduit par des histogrammes parfaitement plats et identiques d'un jour à l'autre. Le taux de service de 100% est ainsi confirmé dès J1.

Scénario Demande Moyenne

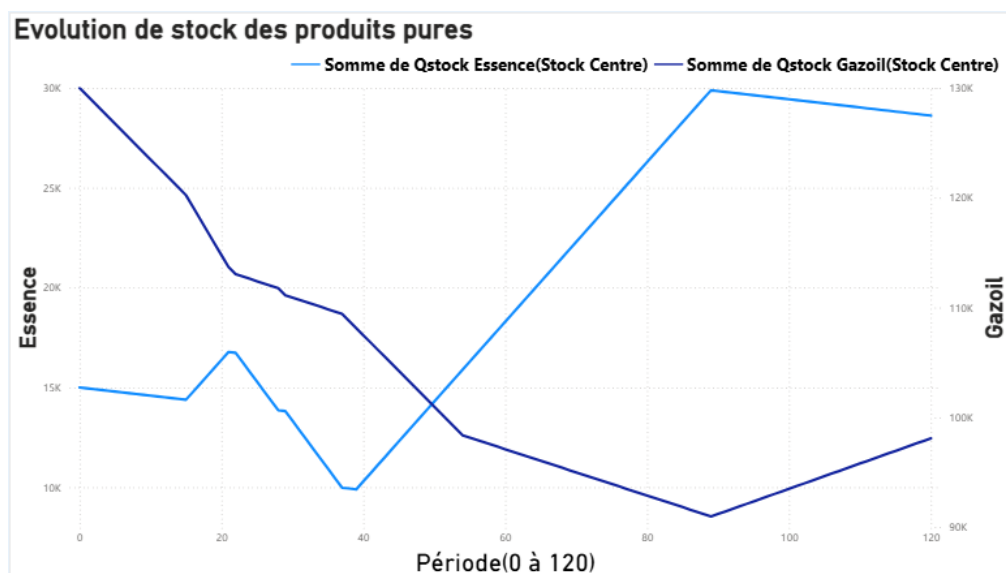


FIG. 4.8 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – SBA, scénario demande moyenne (J0–J10).

En demande moyenne, le stock d'Essence à SBA (figure 4.8) présente un profil de forme identique au scénario faible, avec cependant une descente initiale plus prononcée, reflet d'une consommation de $41 \text{ m}^3/\text{période}$ contre 29. La remontée à J1 (08h) reste inchangée, la séquence de pompage sur l'axe ARZ→SBA étant rigoureusement identique dans les deux scénarios : même batch d'Essence de 74 périodes, même délai d'arrivée. Les stocks initiaux de SBA absorbent ainsi l'écart de consommation entre les deux scénarios sur la première moitié de l'horizon. Le stock de Gazoil s'érode plus rapidement ($211 \text{ m}^3/\text{période}$), mais reste au-dessus du seuil de sécurité sur toute la décade, maintenant une contribution positive au terme (A) de la fonction objectif.

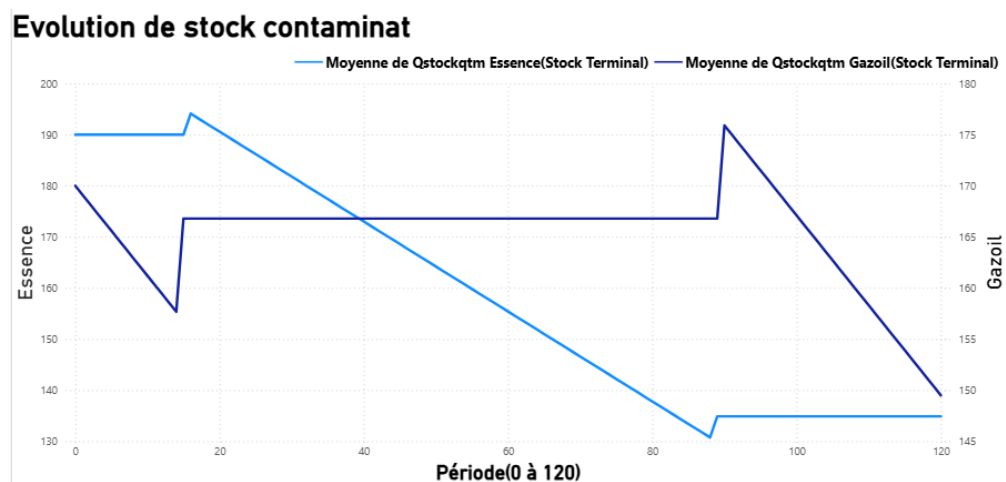


FIG. 4.9 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – SBA, scénario demande moyenne (J0–J10).

L'évolution du contaminat (figure 4.9) est quasi identique au scénario faible en amplitude et en profil : les deux mêmes pics sont observables aux mêmes instants (J1 (07h) et J7 (12h)), correspondant aux deux interfaces G→E et E→G de la séquence ARZ→SBA, inchangée entre les deux scénarios. Ce résultat illustre un point fondamental : la contribution au terme (B) de la fonction objectif sur cet axe est strictement identique en faible et en moyenne demande, car le nombre d'interfaces de contamination est le même. La légère différence d'amplitude entre les deux scénarios est imputable aux variations du flux de produit arrivant, sans modifier la structure des pics.

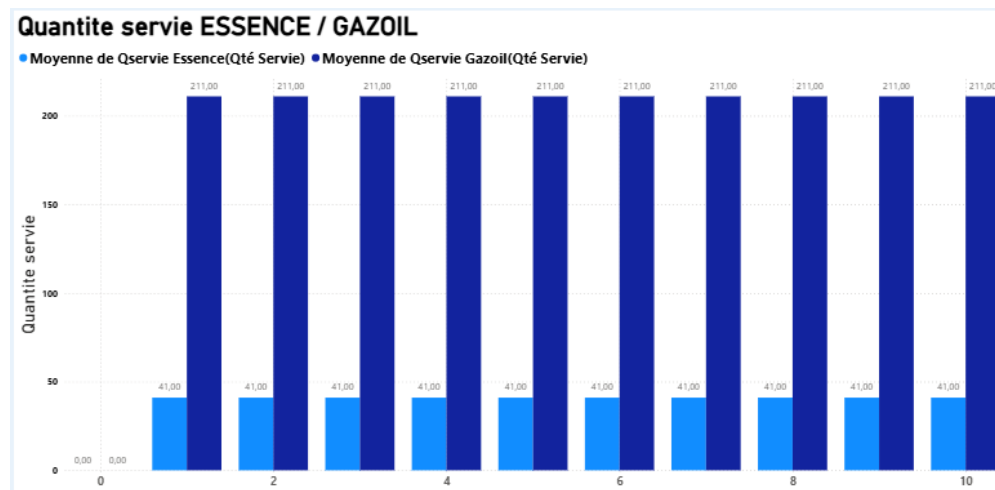


FIG. 4.10 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – SBA, scénario demande moyenne (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.10) sont constantes et strictement égales à la demande : $41 \text{ m}^3/\text{période}$ (Essence) et $211 \text{ m}^3/\text{période}$ (Gazoil). Comme au scénario faible, les histogrammes sont parfaitement plats, confirmant que le terme (C) domine la fonction objectif et que $Q_{SERV} = dem$ à chaque période. Le taux de service de 100% est maintenu.

Scénario Forte Demande

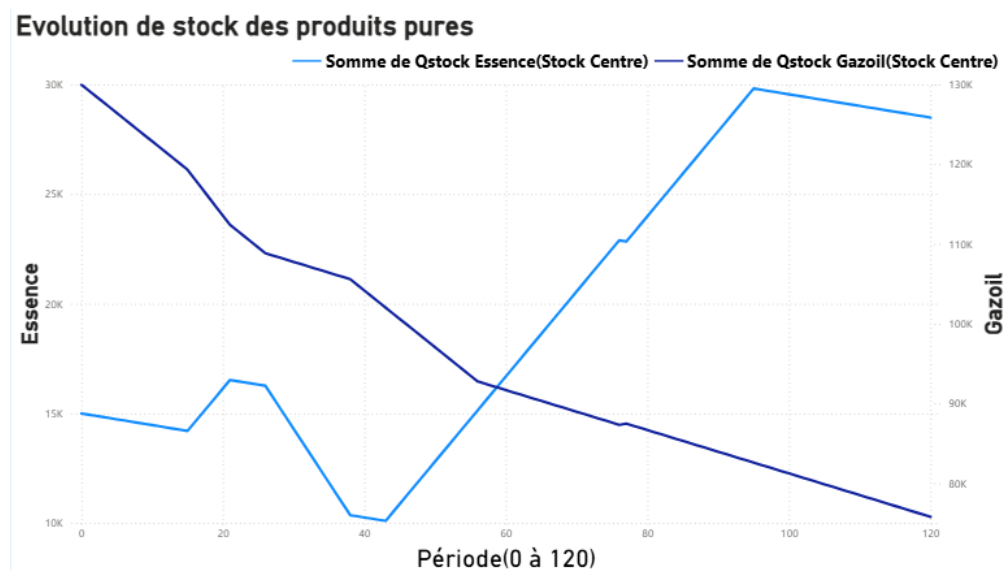


FIG. 4.11 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – SBA, scénario forte demande (J0–J10).

En forte demande, le stock d'Essence à SBA (figure 4.11) présente une dynamique nettement différente. La décroissance initiale est la plus accentuée des trois scénarios ($53 \text{ m}^3/\text{période}$). Le premier batch d'Essence de 61 périodes arrive à SBA à J1 (08h) et reconstitue le stock,

mais ce batch est plus court que dans les scénarios précédents : sa fin intervient à $t_a = 76$, soit J6 (08h). À partir de ce moment, une courte période de Gazoil (1 période, arrivée J6 (10h)) précède l'arrivée d'un second batch d'Essence de 18 périodes, lancé à $t_l = 64$ et arrivant à $t_a = 78$, soit J6 (12h) jusqu'à J7 (22h). Ce second réapprovisionnement en Essence, visible sous forme d'une seconde remontée de la courbe en fin d'horizon, est la signature directe de la forte consommation de SBA et de ses hubs aval. Le stock de Gazoil présente la décroissance la plus rapide des trois scénarios ($272 \text{ m}^3/\text{période}$), mais reste au-dessus du seuil minimal de sécurité.

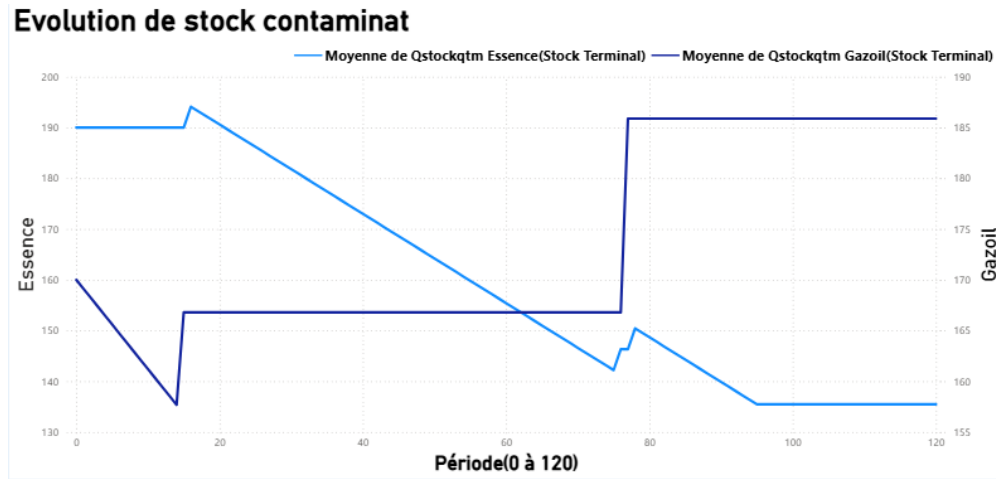


FIG. 4.12 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – SBA, scénario forte demande (J0–J10).

L'évolution du contaminat (figure 4.12) révèle désormais **trois pics**, correspondant aux trois interfaces de la séquence $G(1p) \rightarrow E(61p) \rightarrow G(1p) \rightarrow E(18p)$: un premier pic à l'interface $G \rightarrow E$ (arrivée J1 (08h)), un second pic à l'interface $E \rightarrow G$ (arrivée J6 (08h)), et un troisième pic à l'interface $G \rightarrow E$ du second batch d'Essence (arrivée J6 (12h)). Le passage de deux à trois interfaces par rapport aux scénarios précédents pénalise davantage le terme (B) de la fonction objectif. Néanmoins, les stocks contaminés restent bien en deçà de leurs capacités maximales, et la récupération partielle Q_{cor} entre chaque pic atténue progressivement l'accumulation.

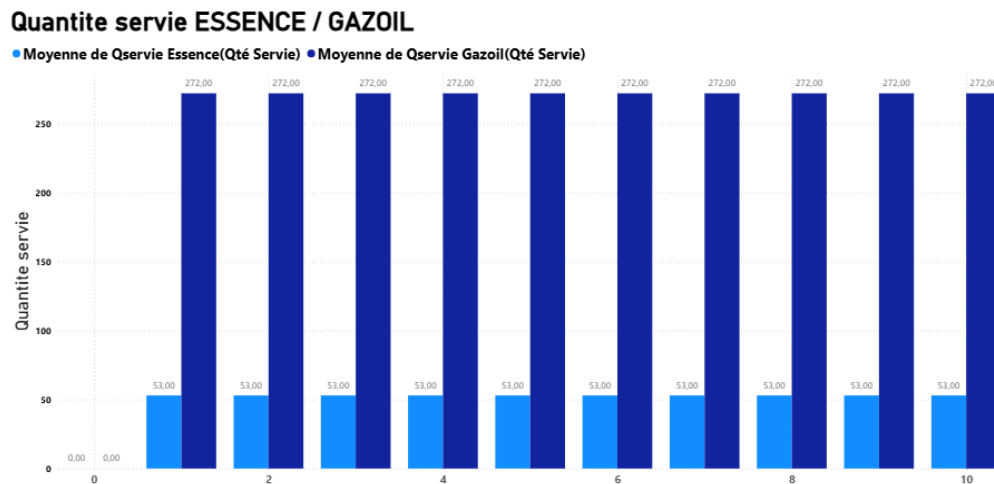


FIG. 4.13 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – SBA, scénario forte demande (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.13) atteignent $53 \text{ m}^3/\text{période}$ (Essence) et $272 \text{ m}^3/\text{période}$ (Gazoil), strictement égales à la demande à chaque jour de l’horizon. Malgré la tension accrue sur les stocks et la multiplication des interfaces, le terme (C) de la fonction objectif impose au solveur de satisfaire intégralement la demande, ce qui se traduit une nouvelle fois par des histogrammes constants et un taux de service de 100%.

4.3.2 Hub Terminal : Remchi

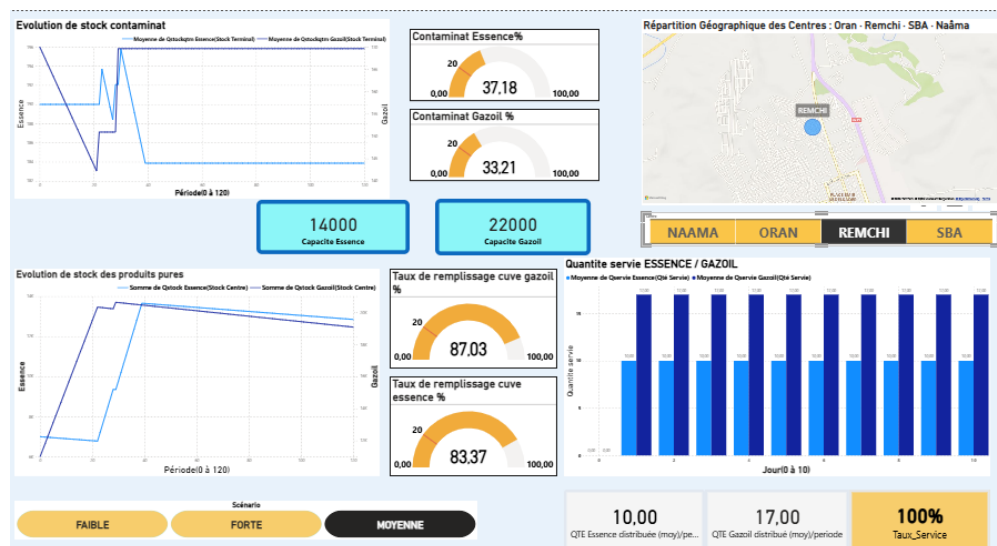


FIG. 4.14 : Tableau de bord Power BI – Vue générale du centre Remchi.

Description de la vue générale. Le tableau de bord du centre de Remchi reprend la même organisation que celui de SBA. En haut à gauche, le graphique d’évolution du stock de contaminat (*qstockqtm* Essence et Gazoil) présente les oscillations liées aux interfaces de chan-

gement de produit sur l'axe SBA→Remchi. Les jauges centrales indiquent les taux de contaminat (37,18% pour l'Essence et 33,21% pour le Gazoil) ainsi que les capacités de stockage (14 000 m³ pour l'Essence et 22 000 m³ pour le Gazoil), qui correspondent aux valeurs réelles du site. La carte géographique en haut à droite positionne Remchi dans le réseau, à l'est de SBA. Au centre gauche, les courbes de stock des produits purs (*qstock*) illustrent les vagues d'approvisionnement depuis SBA avec le délai de transit de 18 h. Les jauges de taux de remplissage indiquent 87,03% pour le Gazoil et 83,37% pour l'Essence (scénario demande moyenne sélectionné). En bas, les histogrammes de quantités servies et les indicateurs résumés (10,00 m³/période Essence, 17,00 m³/période Gazoil, taux de service 100%) confirment la satisfaction complète de la demande pour le scénario affiché.

Scénario Faible Demande

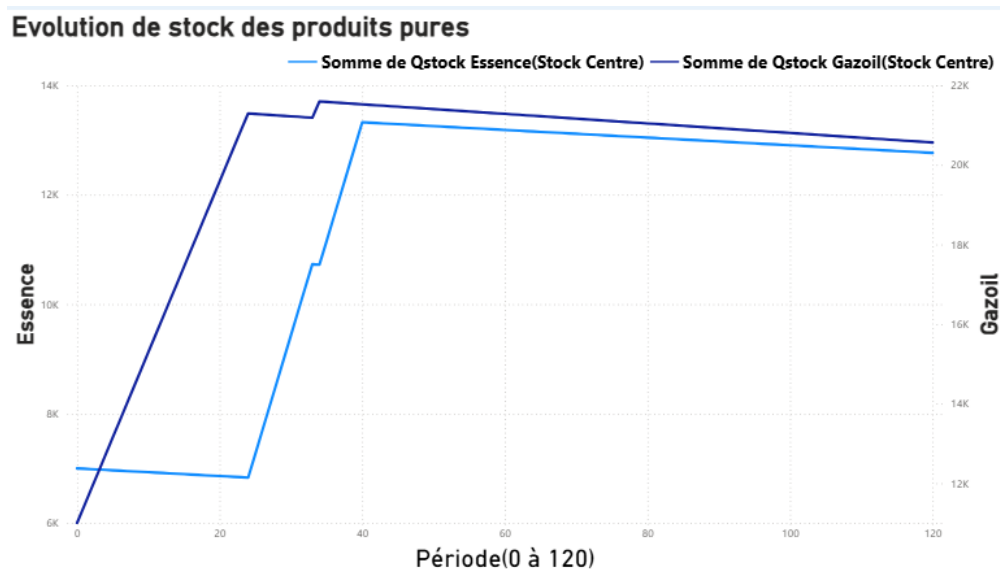


FIG. 4.15 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario faible demande (J0–J10).

À Remchi, l'évolution du stock d'Essence (figure 4.15) présente une montée rapide dès J2 (02h) ($t_a = 25$), correspondant à l'arrivée du premier batch d'Essence lancé depuis SBA à $t_l = 16$ (délai de transit de 9 périodes = 18 h). Cette arrivée fait suite à 15 périodes de Gazoil qui ont commencé à arriver dès J1 (00h) ($t_a = 10$). Le stock d'Essence monte jusqu'à un niveau proche de la capacité maximale de 14 000 m³, avant de décroître progressivement sous l'effet de la demande locale de 7 m³/période. La deuxième arrivée d'Essence (6 périodes, $t_a = 35$ à $t_a = 40$, soit J2 (22h) à J3 (08h)) produit une légère remontée du stock visible dans la courbe. Ce niveau de stock élevé contribue au terme (A) de la fonction objectif.

Le stock de Gazoil suit un profil de légère accumulation nette sur la décade : le premier batch de Gazoil (15 périodes) plus le second batch d'une période (arrivant à J2 (20h)) couvrent largement la consommation locale de 12 m³/période. Aucune rupture n'est observée.

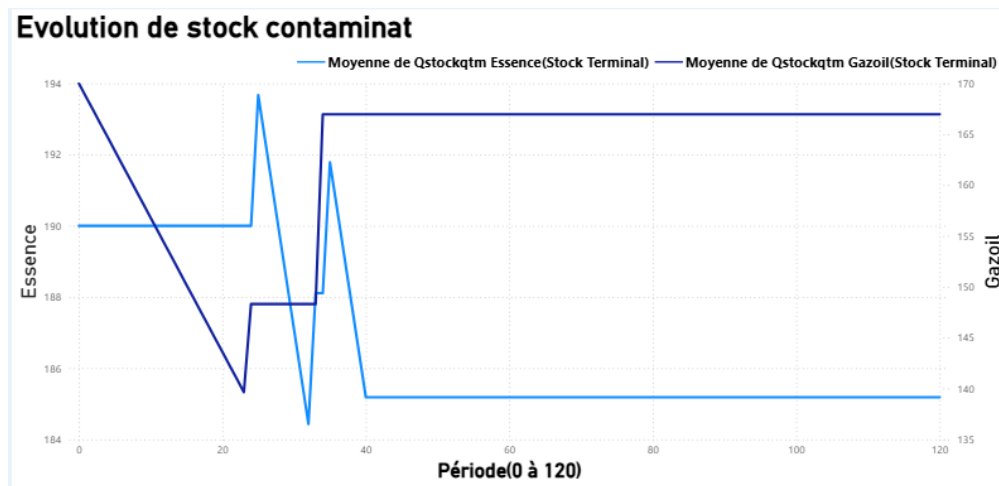


FIG. 4.16 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario faible demande (J0–J10).

La courbe de contaminat (figure 4.16) présente **trois oscillations successives** en début d'horizon, correspondant aux trois interfaces de la séquence $G \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow E$ sur l'axe $SBA \rightarrow Remchi$: un premier pic à l'arrivée de l'interface $G \rightarrow E$ vers J1 (00h)–J2 (02h), un second pic à l'interface $E \rightarrow G$ vers J2 (20h), et un troisième pic à la seconde interface $G \rightarrow E$ vers J2 (22h). Entre chaque pic, le mécanisme de récupération partielle (Q_{cor} , contrainte 11) réduit progressivement le niveau contaminé. Après J3 (08h), aucune nouvelle interface n'arrive à Remchi sur la seconde moitié de la décade, et le stock contaminé décroît continûment vers son minimum. Ces trois interfaces pénalisent le terme (B) de la fonction objectif davantage que les deux interfaces de l'axe $ARZ \rightarrow SBA$. Les valeurs restent bien en deçà des capacités de stockage du contaminat.

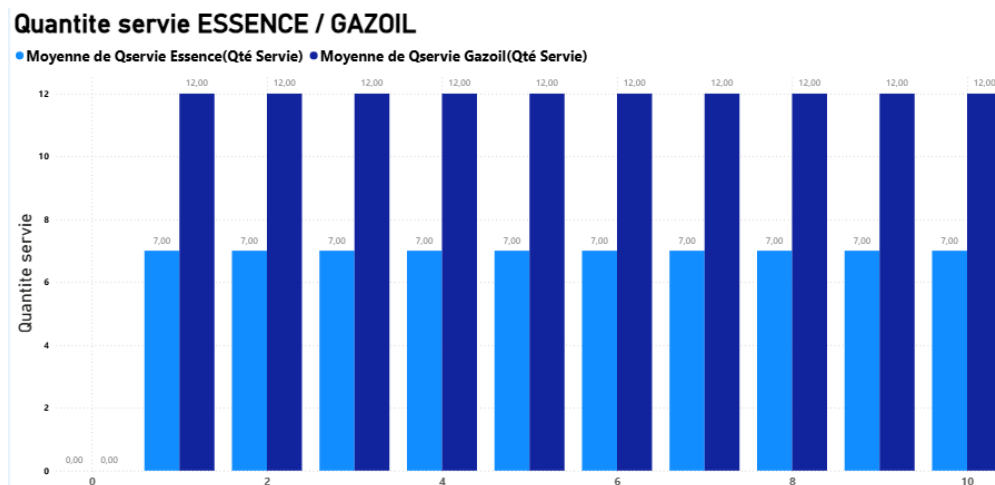


FIG. 4.17 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – Remchi, scénario faible demande (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.17) sont constantes et strictement égales à la demande : 7 m³/période (Essence) et 12 m³/période (Gazoil) sur tout l'horizon, confirmant un taux de service de 100%.

Scénario Demande Moyenne

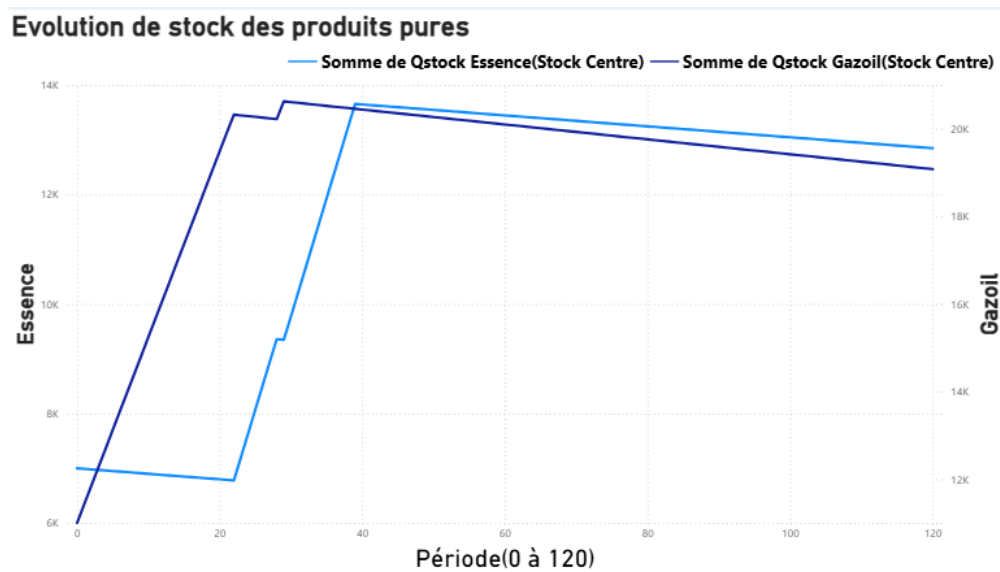


FIG. 4.18 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario demande moyenne (J0–J10).

En demande moyenne (figure 4.18), les séquences sur l'axe SBA→Remchi changent légèrement : G(13p)→E(6p)→G(1p)→E(10p). Le premier batch de Gazoil est réduit à 13 périodes, et l'Essence arrive plus tôt à $t_a = 23$ (J1 (22h) contre J2 (02h) en faible demande). Le dernier batch d'Essence de 10 périodes arrive à $t_a = 30$, soit J2 (12h) et se termine à $t_a = 39$, soit J3 (06h), assurant un approvisionnement complémentaire pour couvrir la demande accrue de 10 m³/période. Les taux de remplissage des cuves (87,03% pour le Gazoil et 83,37% pour l'Essence) indiquent des niveaux de stock éloignés des deux extrêmes, contribuant positivement au terme (A).

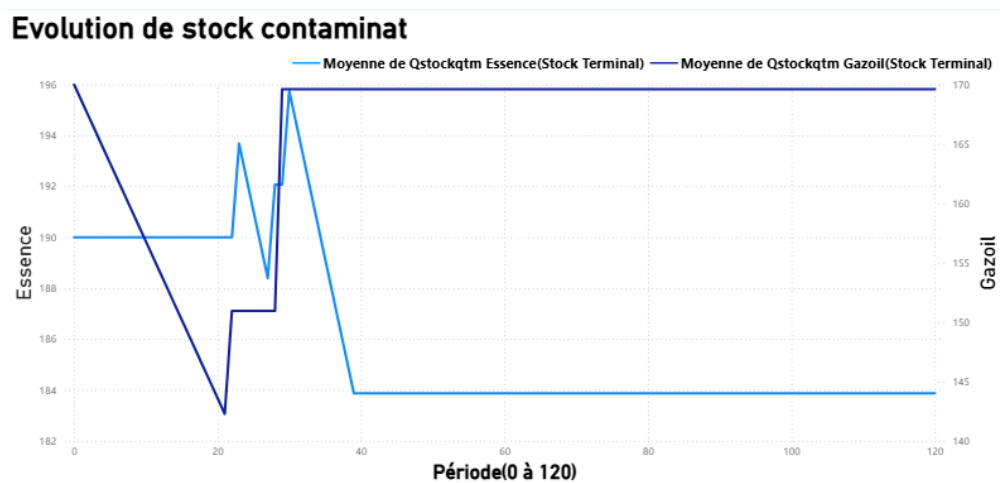


FIG. 4.19 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario demande moyenne (J0–J10).

Le contaminant (figure 4.19) conserve **trois pics** aux mêmes instants qu'en faible demande, car la structure de la séquence $G \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow E$ reste identique : les interfaces $G \rightarrow E$ (vers J1 (02h)), $E \rightarrow G$ (vers J2 (04h)) et $G \rightarrow E$ (vers J1 (22h)) pour le second batch d'Essence) génèrent les mêmes trois zones de mélange. Les amplitudes sont comparables à celles du scénario faible. La contribution au terme (B) est donc équivalente entre les deux scénarios sur cet axe.

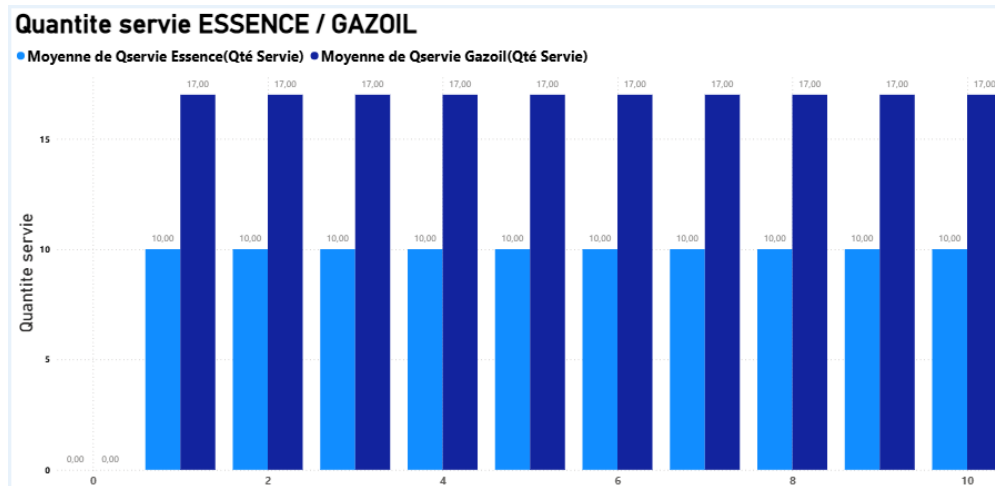


FIG. 4.20 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – Remchi, scénario demande moyenne (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.20) sont constantes et strictement égales à la demande : $10 \text{ m}^3/\text{période}$ (Essence) et $17 \text{ m}^3/\text{période}$ (Gazoil). Le taux de service de 100% est maintenu, confirmant la primauté du terme (C).

Scénario Forte Demande

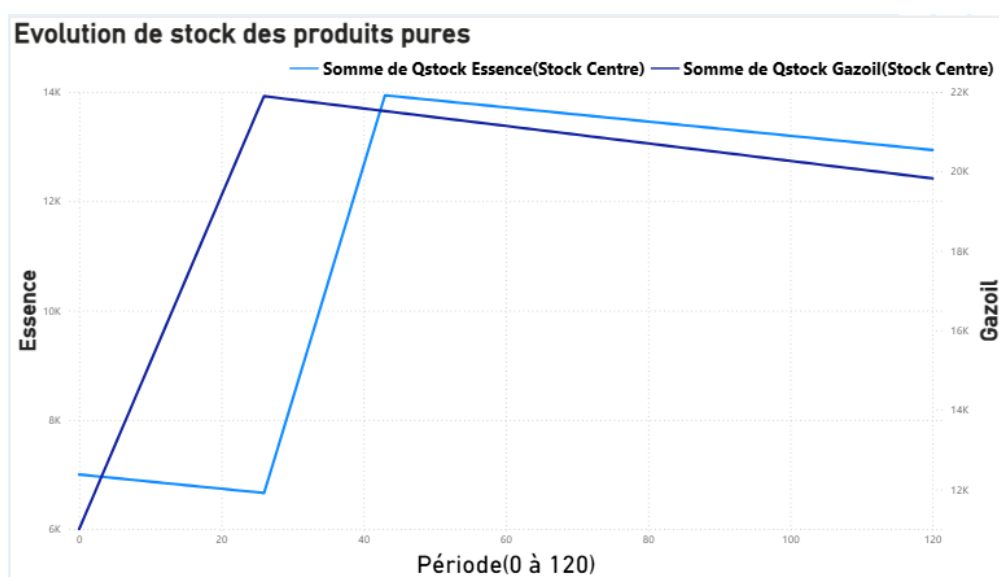


FIG. 4.21 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario forte demande (J0–J10).

En forte demande, la simplification remarquable de la séquence sur l'axe SBA→Remchi — passage à seulement deux batchs G(17p)→E(17p) et une seule interface de contamination — se lit directement dans les courbes de stock (figure 4.21). Le stock de Gazoil monte en une seule vague entre J1 (00h) et J2 (04h) ($t_a = 10$ à $t_a = 26$), puis décroît sous l'effet de la consommation de 22 m³/période. Le stock d'Essence monte en une seule vague entre J2 (06h) et J3 (14h) ($t_a = 27$ à $t_a = 43$), puis décroît. Ces deux profils en « V inversé » simples, sans oscillations secondaires, contrastent avec les profils plus hachés observés aux scénarios précédents.

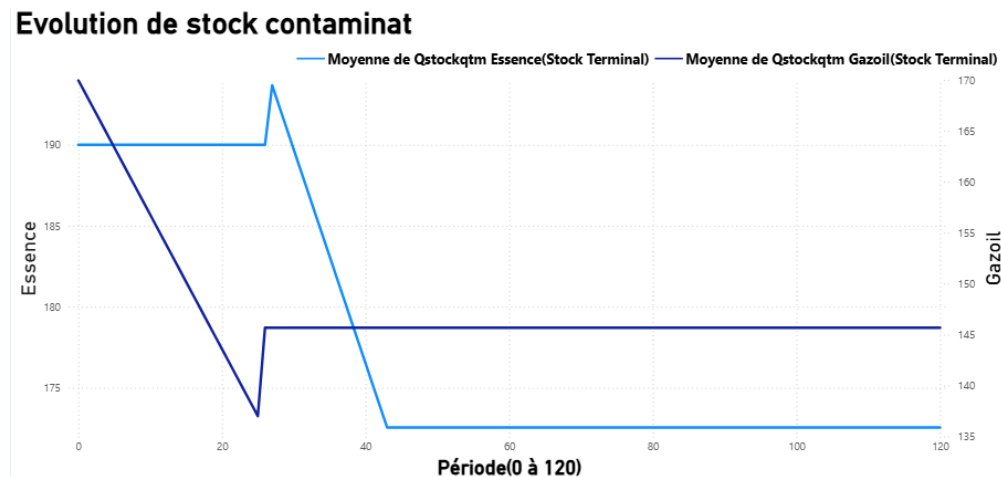


FIG. 4.22 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Remchi, scénario forte demande (J0–J10).

L'évolution du contaminat en forte demande (figure 4.22) ne présente qu'un **unique pic**, correspondant à la seule interface G→E de la séquence G(17p)→E(17p). Ce pic apparaît vers J2 (04h)–J2 (06h), au moment où le front de séparation entre le Gazoil et l'Essence arrive à Remchi. Après ce pic, le stock contaminé décroît continûment jusqu'à la fin de l'horizon, sans perturbation supplémentaire. Ce profil mono-pic est la traduction directe de la décision du solveur de réduire le nombre d'interfaces pour minimiser la pénalité du terme (B) de la fonction objectif : en optant pour deux grands batchs égaux de 17 périodes plutôt que quatre batchs alternés, le solveur réduit le terme (B) de trois interfaces à une seule, tout en satisfaisant le volume total requis.

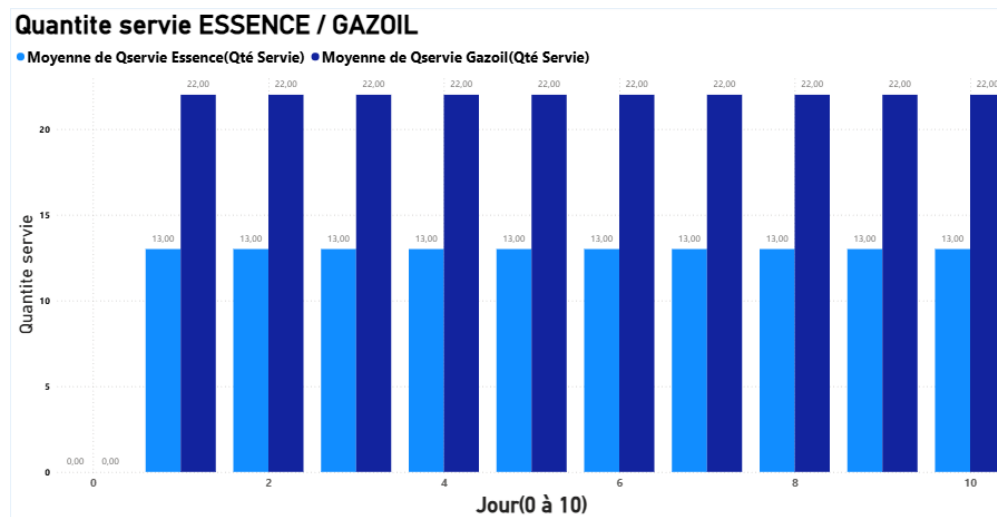


FIG. 4.23 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – Remchi, scénario forte demande (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.23) atteignent 13 m³/période (Essence) et 22 m³/période (Gazoil), strictement égales à la demande sur tout l’horizon. Taux de service de 100%.

4.3.3 Hub Terminal : Naâma (Proposé)

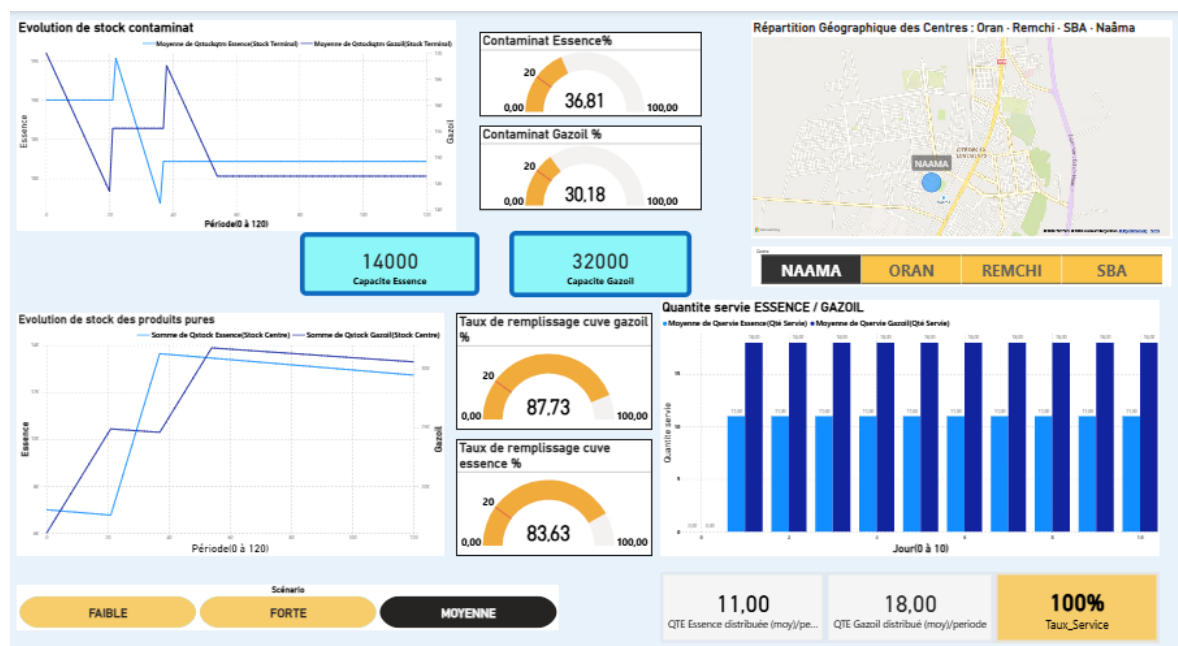


FIG. 4.24 : Tableau de bord Power BI – Vue générale du centre Naâma (hub proposé).

Description de la vue générale. Le tableau de bord de Naâma présente la même architecture que les autres hubs, avec des particularités liées à son statut de hub proposé et à son délai de transit le plus long du réseau (40 h). En haut à gauche, le graphique de contaminat montre deux pics bien distincts, caractéristiques de la séquence G→E→G constante pour

tous les scénarios. Les jauges centrales indiquent les taux de contaminat (36,81% pour l'Essence et 30,18% pour le Gazoil) et les capacités hypothétiques retenues pour la modélisation (14 000 m³ Essence et 32 000 m³ Gazoil). La carte géographique positionne Naâma au sud du réseau, soulignant son rôle d'extension vers les wilayas du sud algérien. Les courbes de stock des produits purs, au centre gauche, illustrent les profils caractéristiques avec une fenêtre sans approvisionnement de 40 h en début d'horizon. Les jauges de taux de remplissage (87,73% Gazoil et 83,63% Essence) et les indicateurs résumés en bas (11,00 m³/période Essence, 18,00 m³/période Gazoil, taux de service 100%) correspondent au scénario demande moyenne.

Scénario Faible Demande

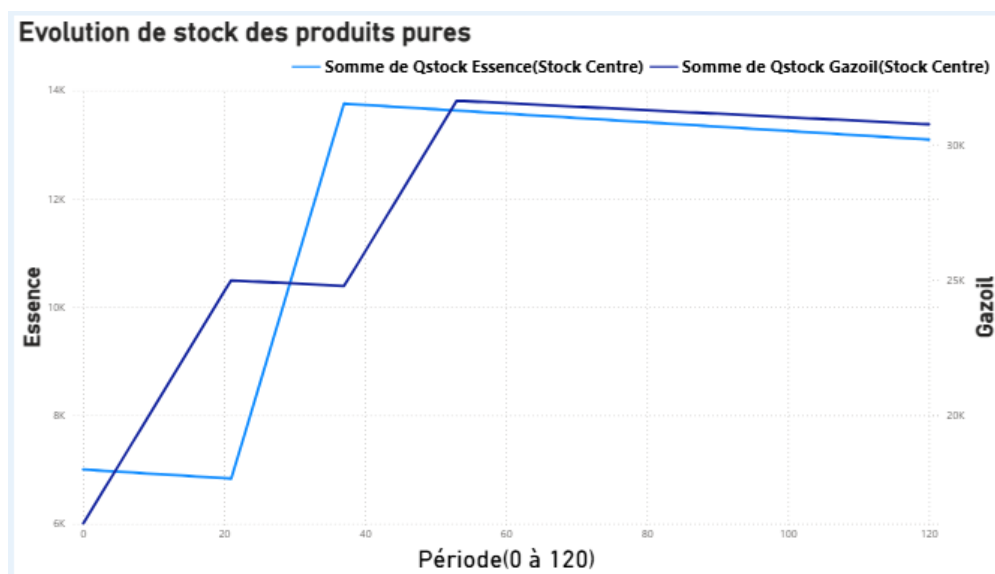


FIG. 4.25 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario faible demande (J0–J10).

Naâma est le hub le plus contraint du réseau en raison du délai de transit de 20 périodes (40 h) depuis SBA. Cette contrainte se traduit directement dans l'évolution du stock (figure 4.25) : le Gazoil résiduel du pipeline arrive en premier à $t_a = 21$, soit J1 (18h), immédiatement suivi de l'Essence à $t_a = 22$, soit J1 (20h). Pendant cette fenêtre de 40 heures précédant la première arrivée, le stock d'Essence (initialement 7 000 m³) se réduit sous l'effet de la consommation locale de 8 m³/période, soit une consommation de $20 \times 8 = 160$ m³ sur les 20 premières périodes, largement couverte par le stock initial. Aucun risque de rupture n'existe en faible demande.

Le stock d'Essence remonte à partir de J1 (20h) avec l'arrivée du batch de 16 périodes d'Essence (fin à $t_a = 37$, J3 (02h)), puis redescend jusqu'à l'arrivée du batch de Gazoil de 16 périodes à $t_a = 38$, soit J3 (04h). Le stock de Gazoil suit un profil d'accumulation nette sur la

décade, la demande de $13 \text{ m}^3/\text{période}$ étant couverte par les livraisons. Ces niveaux élevés de stock contribuent positivement au terme (A) de la fonction objectif.

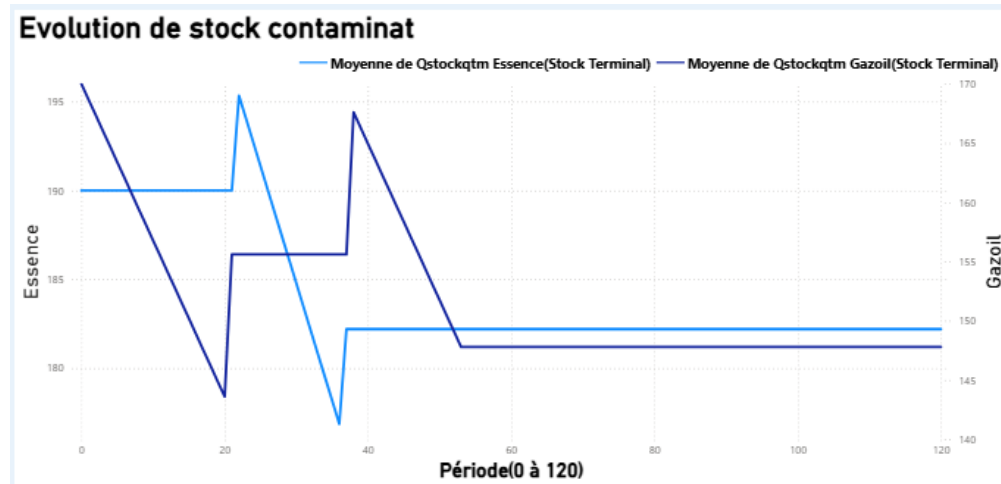


FIG. 4.26 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario faible demande (J0–J10).

La courbe de contaminat (figure 4.26) présente **deux pics** correspondant exactement aux deux interfaces de la séquence $G(1p) \rightarrow E(16p) \rightarrow G(16p)$. Le premier pic apparaît vers J1 (18h)–J1 (20h), à l'arrivée de l'interface $G \rightarrow E$: le front de séparation entre le Gazoil résiduel initial et le premier batch d'Essence génère un volume de contaminat proportionnel à $coef(p, i) = fraction(p) \times qtm(i)$. Le stock contaminé décroît ensuite par récupération partielle (Q_{cor}) jusqu'au second pic, vers J3 (02h)–J3 (04h), correspondant à l'interface $E \rightarrow G$: l'arrivée du front de séparation entre l'Essence et le Gazoil final produit un nouveau volume de mélange. Après ce second pic, aucune interface supplémentaire n'arrive à Naâma, et le stock contaminé décroît continûment jusqu'en fin d'horizon. La contribution au terme (B) est identique à celle de l'axe $ARZ \rightarrow SBA$ (deux interfaces), mais le délai de transit plus long décale les pics vers la droite de l'axe temporel.

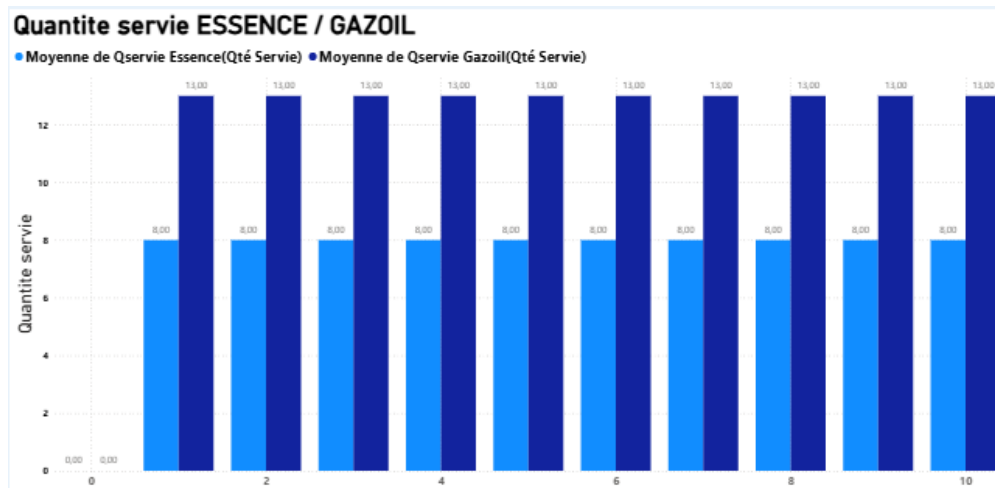


FIG. 4.27 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – Naâma, scénario faible demande (J0–J10).

Les taux de remplissage des cuves (87,73% pour le Gazoil et 83,63% pour l'Essence) témoignent d'une utilisation efficace des capacités hypothétiques. Les quantités servies (figure 4.27) sont constantes et strictement égales à la demande : 8 m³/période (Essence) et 13 m³/période (Gazoil), taux de service de 100%.

Scénario Demande Moyenne

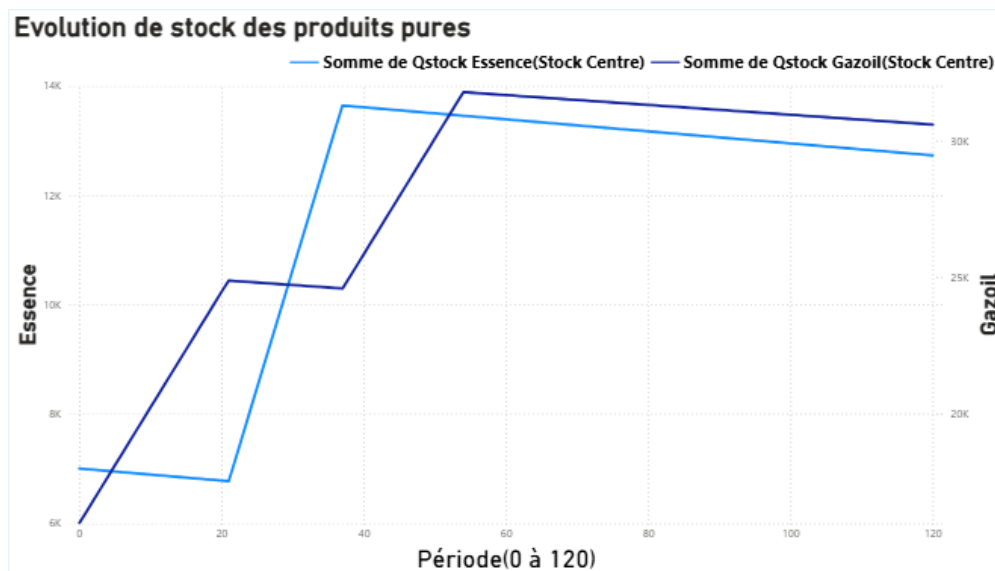


FIG. 4.28 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario demande moyenne (J0–J10).

En demande moyenne (figure 4.28), la fenêtre de risque initiale est légèrement plus tendue : 11 m³/période implique une consommation de $20 \times 11 = 220$ m³ avant la première arrivée, sur un stock initial de 7 000 m³. La marge reste confortable. Le solveur conserve la même

séquence $G(1p) \rightarrow E(16p) \rightarrow G(17p)$, les arrivées à Naâma se produisant aux mêmes instants qu'en faible demande (J1 (18h), J1 (20h), J3 (02h), J3 (04h)), seule la taille du batch de Gazoil final augmentant d'une période. Les profils de stock sont de forme identique au scénario faible, avec des niveaux finaux légèrement plus bas.

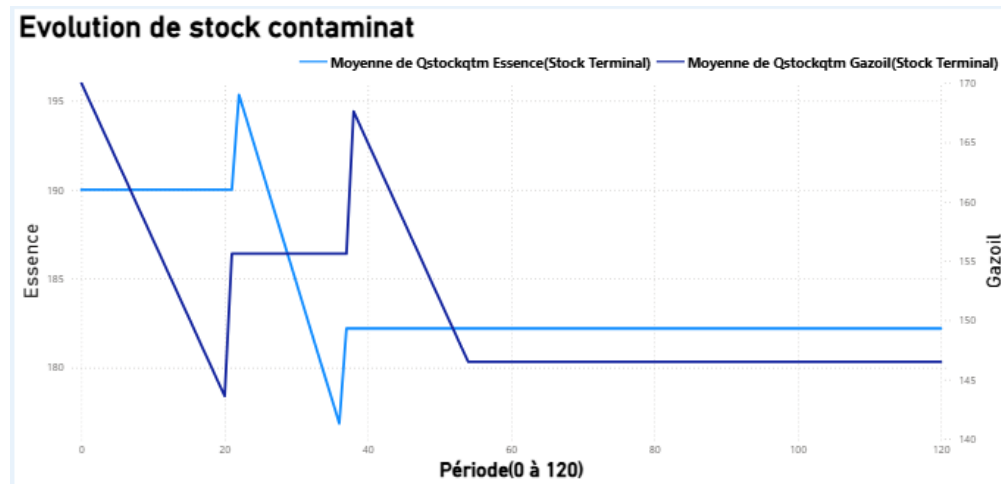


FIG. 4.29 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario demande moyenne (J0–J10).

Le contaminat (figure 4.29) conserve **deux pics** aux mêmes instants qu'en faible demande (J1 (18h)–J1 (20h) pour l'interface $G \rightarrow E$, et J3 (02h)–J3 (04h) pour l'interface $E \rightarrow G$), car la structure de la séquence est inchangée : seule la durée du dernier batch de Gazoil varie d'une période. Les amplitudes et la contribution au terme (B) sont donc quasi identiques entre les scénarios faible et moyen à Naâma.

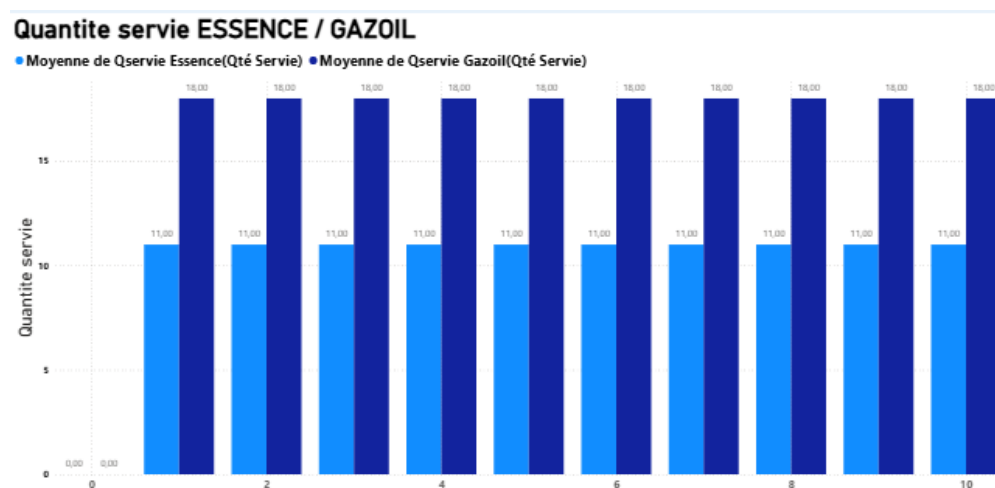


FIG. 4.30 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – Naâma, scénario demande moyenne (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.30) sont constantes et strictement égales à la demande : $11 \text{ m}^3/\text{période}$ (Essence) et $18 \text{ m}^3/\text{période}$ (Gazoil). Taux de service de 100%.

Scénario Forte Demande

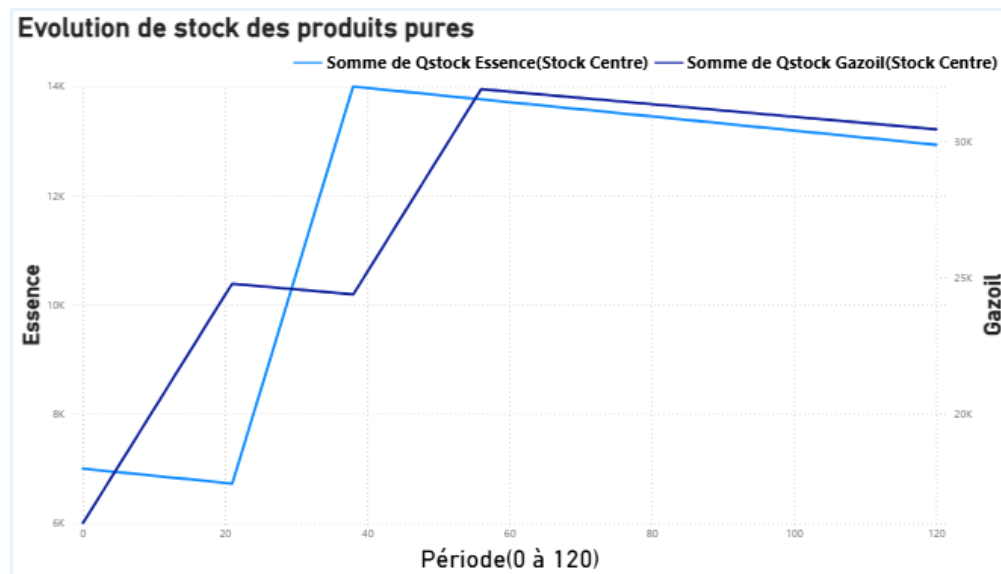


FIG. 4.31 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario forte demande (J0–J10).

En forte demande (figure 4.31), la fenêtre critique s'intensifie : une consommation de $13 \text{ m}^3/\text{période}$ représente $20 \times 13 = 260 \text{ m}^3$ consommés avant la première arrivée, la marge restant positive grâce au stock initial de $7\,000 \text{ m}^3$. Le solveur répond en augmentant la taille du batch d'Essence à 17 périodes (contre 16 précédemment) et le batch de Gazoil à 18 périodes, les arrivées se produisant aux mêmes instants (J1 (18h), J1 (20h), J3 (04h), J3 (06h)). Les profils de stock sont de forme identique aux scénarios précédents, avec des niveaux finaux légèrement plus bas pour l'Essence.

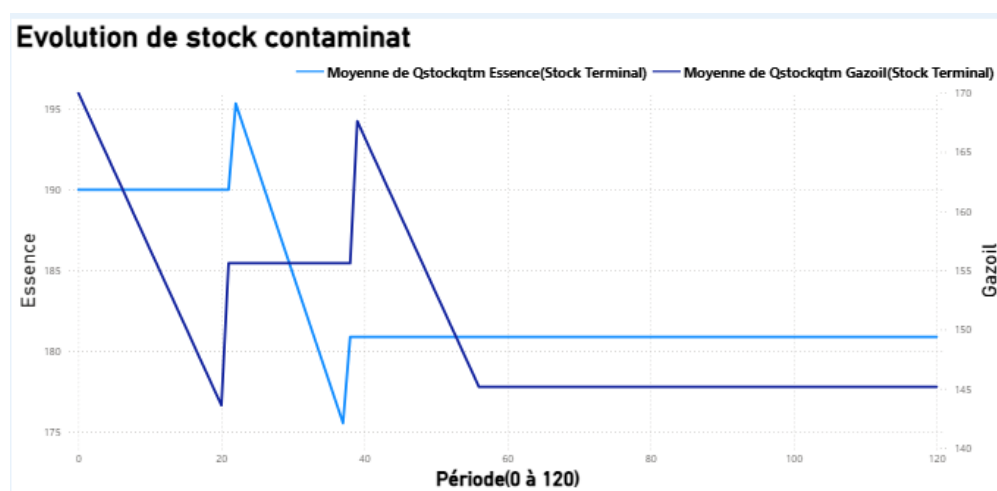


FIG. 4.32 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Naâma, scénario forte demande (J0–J10).

La courbe de contaminat (figure 4.32) conserve **deux pics**, correspondant aux deux mêmes

interfaces $G \rightarrow E$ (vers J1 (18h)–J1 (20h)) et $E \rightarrow G$ (vers J3 (04h)–J3 (06h)). La légère augmentation de la taille des batchs n'introduit pas de nouvelle interface, ce qui maintient la contribution au terme (B) au même niveau que dans les scénarios précédents. C'est précisément ce que le solveur cherche à optimiser : augmenter les volumes livrés (terme C) sans multiplier les interfaces (terme B).

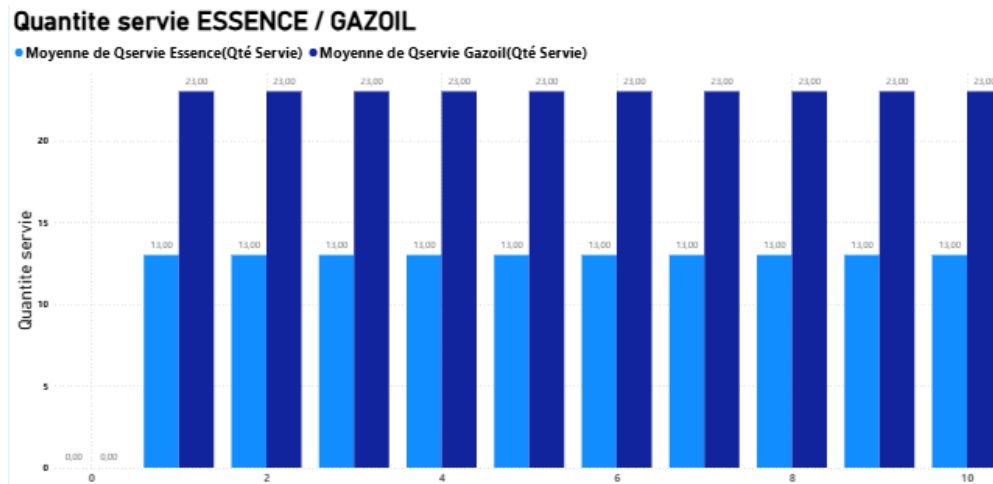


FIG. 4.33 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – Naâma, scénario forte demande (J0–J10).

La comparaison des trois scénarios à Naâma révèle un résultat structurel important : le taux de service de 100% est maintenu dans les trois cas malgré le délai de transit le plus long du réseau. Cela valide le dimensionnement hypothétique des capacités de stockage (14 000 m³ pour l'Essence et 32 000 m³ pour le Gazoil) et constitue un argument quantitatif direct en faveur de l'intégration du hub de Naâma dans le réseau NAFTAL réel. Les quantités servies (figure 4.33) atteignent 13 m³/période (Essence) et 23 m³/période (Gazoil), strictement égales à la demande sur chaque période. Taux de service de 100%.

4.3.4 Hub Terminal : Oran

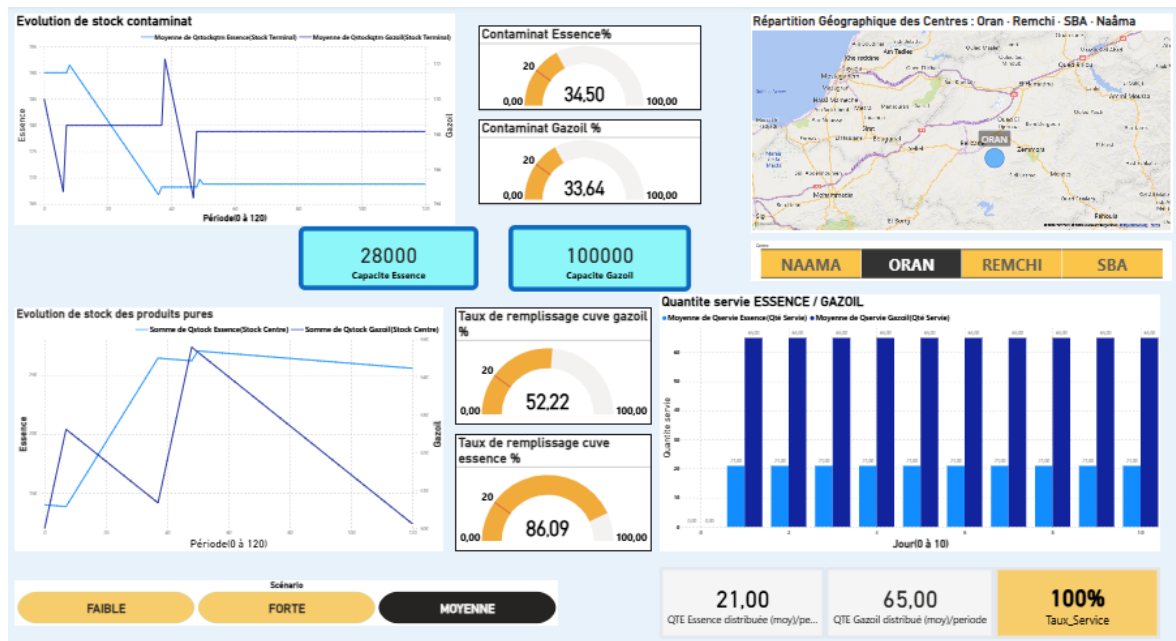


FIG. 4.34 : Tableau de bord Power BI – Vue générale du centre Oran.

Description de la vue générale. Le tableau de bord d'Oran se distingue des autres hubs par ses capacités de stockage nettement supérieures, visibles dans les indicateurs centraux (28 000 m³ d'Essence et 100 000 m³ de Gazoil). En haut à gauche, le graphique de contaminat présente des profils plus variables selon les scénarios : de deux à trois pics selon la complexité de la séquence de pompage. Les jauges de contaminat (34,50% pour l'Essence et 33,64% pour le Gazoil) reflètent un usage modéré des cuves de contaminat malgré les forts volumes transitant par ce hub. La carte géographique positionne Oran directement connecté à ARZ, soulignant sa connexion directe au hub principal sans passer par SBA. Au centre gauche, les courbes de stock des produits purs illustrent la dynamique particulière d'Oran : une descente initiale du Gazoil (absence de réapprovisionnement jusqu'à l'arrivée du long batch de Gazoil) puis une remontée soutenue, caractéristique de tous les scénarios. Les jauges de taux de remplissage (52,22% Gazoil et 86,09% Essence, scénario demande moyenne) et les indicateurs résumés en bas (21,00 m³/période Essence, 65,00 m³/période Gazoil, taux de service 100%) complètent la vue d'ensemble.

Scénario Faible Demande

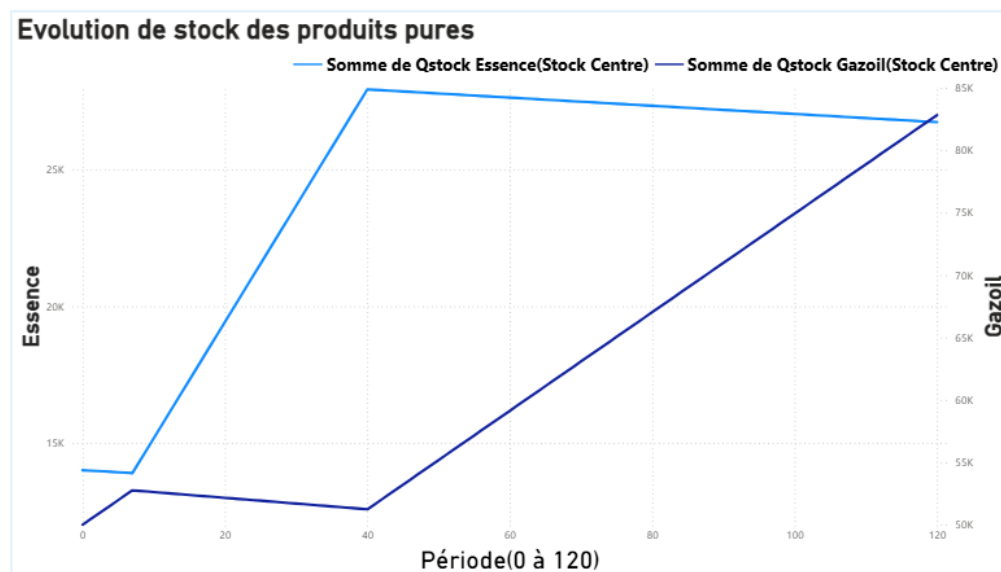


FIG. 4.35 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Oran, scénario faible demande (J0–J10).

Oran se distingue des autres hubs terminaux par deux caractéristiques : il est alimenté directement par ARZ (sans passer par SBA) avec le délai de transit le plus court du réseau (6 périodes = 12 h), et il dispose des plus grandes capacités de stockage estimées (28 000 m³ pour l'Essence et 100 000 m³ pour le Gazoil).

En faible demande (figure 4.35), la séquence G(1p)→E(33p)→G(80p) produit les arrivées suivantes : le Gazoil résiduel arrive à $t_a = 7$, soit J0 (14h), l'Essence à $t_a = 8$, soit J0 (16h). Le stock d'Essence monte rapidement dès J0 (16h) et atteint un niveau élevé ; il commence à décroître à $t_a = 40$, soit J3 (08h), moment où l'Essence cède la place au Gazoil dans le pipeline. Le stock de Gazoil, quant à lui, s'érode de J0 à J3 (10h) (aucun réapprovisionnement en Gazoil n'arrivant pendant cette période, la demande de 46 m³/période consomme le stock initial), puis remonte fortement à partir de l'arrivée du long batch de Gazoil de 80 périodes à $t_a = 41$, soit J3 (10h) et jusqu'à la fin de l'horizon. Cette dynamique — descente initiale du Gazoil puis remontée soutenue — est directement lisible dans les courbes Power BI et traduit la prédominance du terme (A) sur la gestion des stocks de Gazoil en fin d'horizon.

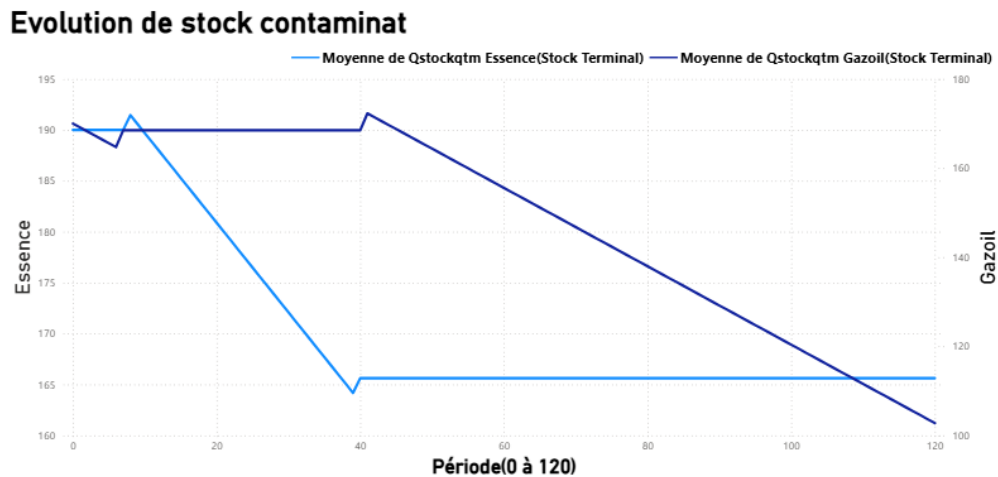


FIG. 4.36 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Oran, scénario faible demande (J0–J10).

La courbe de contaminat (figure 4.36) présente **deux pics**, correspondant aux deux interfaces de la séquence $G(1p) \rightarrow E(33p) \rightarrow G(80p)$. Le premier pic, très précoce à J0 (16h), correspond à l'interface $G \rightarrow E$: dès $t_a = 8$, le front de séparation entre le Gazoil résiduel initial du pipeline et le premier batch d'Essence arrive à Oran avec seulement 12 h de délai. Ce pic précoce est caractéristique du court délai de transit d'Oran. Le second pic, vers J3 (07h)–J3 (10h), correspond à l'interface $E \rightarrow G$ (arrivée à $t_a = 40$ –41) : il marque la transition entre la fin du batch d'Essence et le début du long batch de Gazoil. Entre les deux pics, la récupération partielle (Q_{cor}) réduit progressivement le stock contaminé. La faible pénalité sur le terme (B) (seulement deux interfaces) est cohérente avec la stratégie de faible demande qui privilégie de longs batchs.

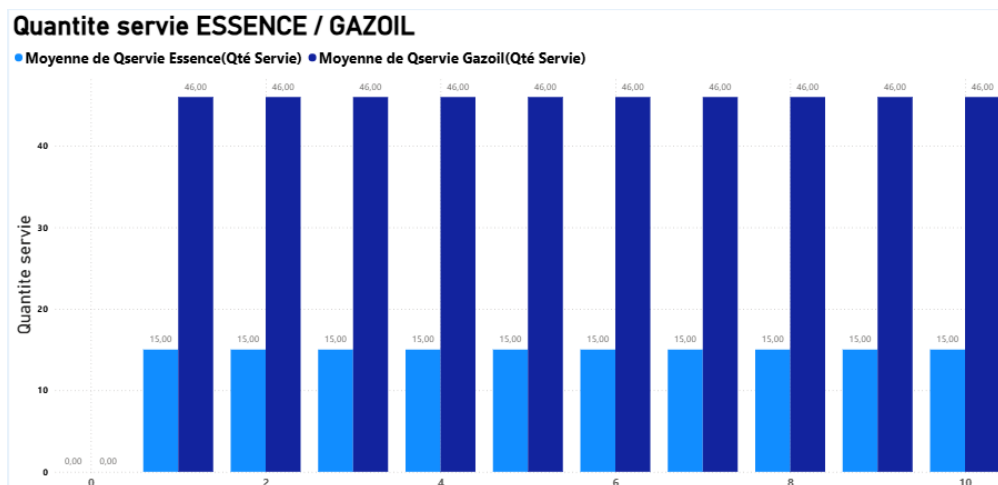


FIG. 4.37 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – Oran, scénario faible demande (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.37) sont constantes et strictement égales à la demande : $15 \text{ m}^3/\text{période}$ (Essence) et $46 \text{ m}^3/\text{période}$ (Gazoil) sur tout l'horizon. Taux de service de 100%.

Scénario Demande Moyenne

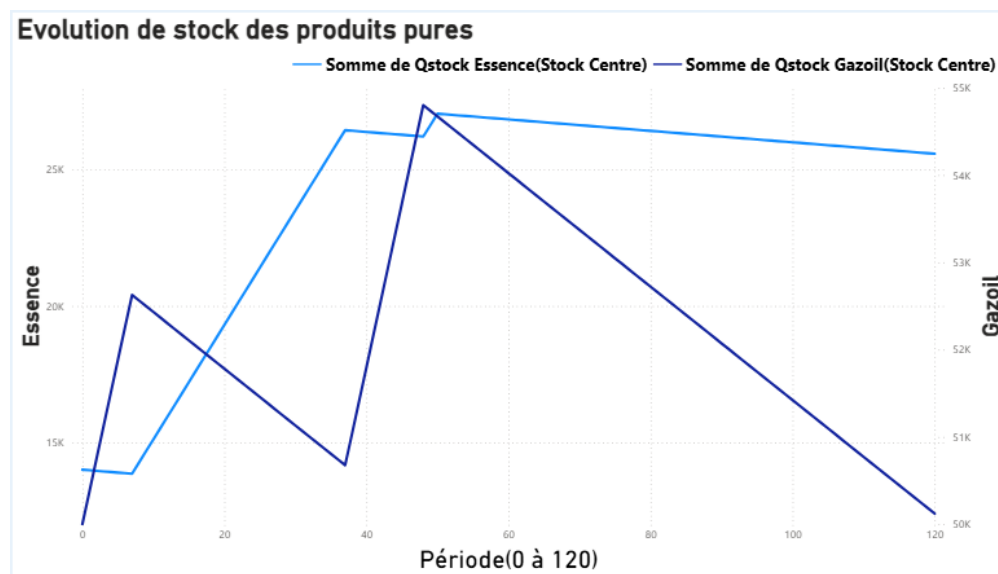


FIG. 4.38 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Oran, scénario demande moyenne (J0–J10).

En demande moyenne (figure 4.38), la séquence passe à quatre batchs $G(1p) \rightarrow E(30p) \rightarrow G(11p) \rightarrow E(2p)$, générant trois interfaces et des arrivées à Oran aux instants : J0 (16h) (Essence), J3 (02h) (fin Essence, début Gazoil), J4 (00h) (fin Gazoil), J4 (02h) (second batch Essence). Le stock d'Essence présente donc un profil en deux montées : une montée principale de J0 (16h) à J3 (02h), puis une courte remontée secondaire entre J4 (02h) et J4 (04h). Le stock de Gazoil, alimenté par un batch de seulement 11 périodes (contre 80 en faible demande), présente une montée brève entre J3 (04h) et J4 (00h), puis décroît sous l'effet de la demande de $65 \text{ m}^3/\text{période}$.

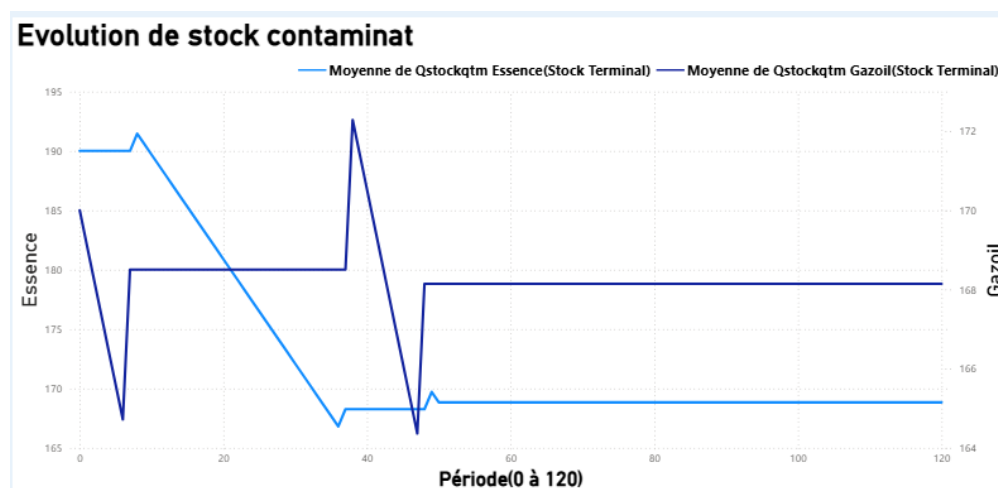


FIG. 4.39 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Oran, scénario demande moyenne (J0–J10).

La courbe de contaminat (figure 4.39) présente désormais **trois pics**, correspondant aux trois

interfaces $G \rightarrow E$, $E \rightarrow G$, $G \rightarrow E$ de la séquence. Le premier pic à J0 (16h) correspond à l'interface $G \rightarrow E$ initiale ; le second pic à J3 (02h) correspond à l'interface $E \rightarrow G$ (fin du batch d'Essence, début du batch de Gazoil de 11 périodes) ; le troisième pic à J4 (02h) correspond à l'interface $G \rightarrow E$ du second batch d'Essence. Ce troisième pic, absent en faible demande, traduit une pénalité accrue sur le terme (B) de la fonction objectif. Cependant, entre chaque pic, la récupération partielle limite l'accumulation du contaminant.

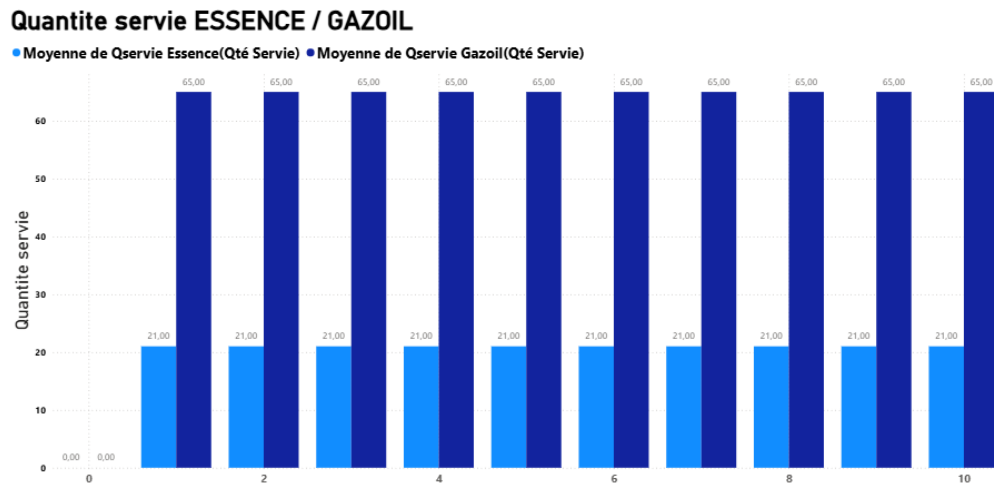


FIG. 4.40 : Quantités servies Essence/Gazoil par période – Oran, scénario demande moyenne (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.40) sont constantes et strictement égales à la demande : $21 \text{ m}^3/\text{période}$ (Essence) et $65 \text{ m}^3/\text{période}$ (Gazoil). Taux de service de 100%.

Scénario Forte Demande

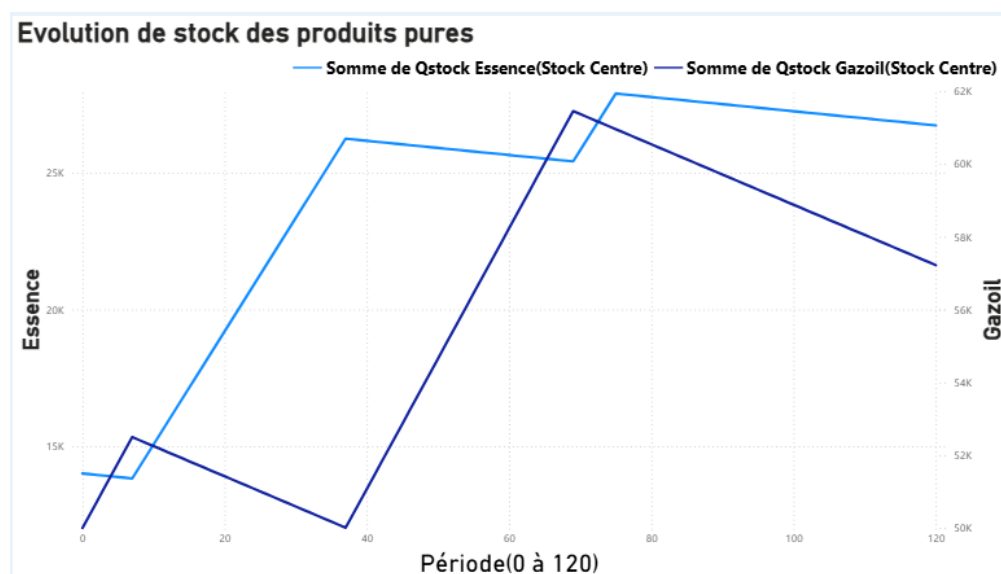


FIG. 4.41 : Évolution du stock des produits purs (Essence et Gazoil) – Oran, scénario forte demande (J0–J10).

En forte demande, Oran présente les évolutions de stock les plus dynamiques du réseau (figure 4.41). La séquence $G(1p) \rightarrow E(30p) \rightarrow G(32p) \rightarrow E(6p)$ génère les arrivées suivantes : Essence à J0 (16h) (fin J3 (02h)), Gazoil à J3 (04h) (fin J5 (18h)), second batch Essence à J5 (20h) (fin J6 (06h)). Le stock d'Essence suit un profil en deux vagues : la première montée de J0 (16h) à J3 (02h), puis une décroissance due à la consommation de $26 \text{ m}^3/\text{période}$, suivie d'une courte remontée entre J5 (20h) et J6 (06h). Cette deuxième vague d'Essence en fin d'horizon traduit la tension sur les stocks évoquée dans l'analyse des Gantt : le modèle planifie un dernier réapprovisionnement pour honorer la contrainte de stock final de sécurité (contrainte 22). Le stock de Gazoil bénéficie d'un réapprovisionnement plus important qu'en demande moyenne (32 périodes contre 11), mais décroît fortement sous l'effet de la consommation de $83 \text{ m}^3/\text{période}$.

Evolution de stock contaminat

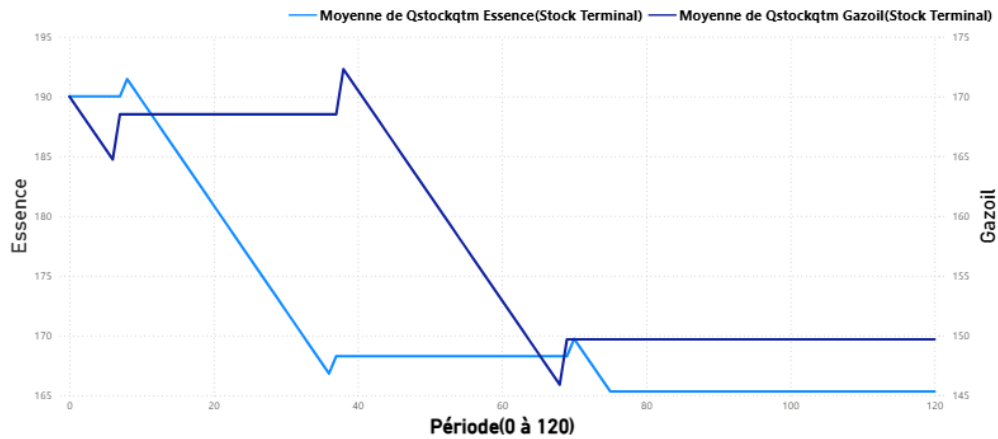


FIG. 4.42 : Évolution du stock de contaminat (Essence et Gazoil) – Oran, scénario forte demande (J0–J10).

La courbe de contaminat (figure 4.42) présente **trois pics**, comme en demande moyenne, mais avec des instants d'occurrence décalés. Le premier pic à J0 (16h) correspond à l'interface $G \rightarrow E$ initiale ; le second pic vers J3 (02h) correspond à l'interface $E \rightarrow G$ (transition vers le batch de Gazoil de 32 périodes) ; le troisième pic à J5 (20h) correspond à l'interface $G \rightarrow E$ du second batch d'Essence final. Ce troisième pic, plus tardif qu'en demande moyenne (J5 (20h) contre J4 (02h)), reflète le batch de Gazoil nettement plus long (32 périodes contre 11). La contribution au terme (B) est identique en nombre d'interfaces à la demande moyenne, mais la distribution temporelle des pics est modifiée. La récupération partielle Q_{cor} entre chaque pic maintient les niveaux contaminés en deçà des capacités maximales.

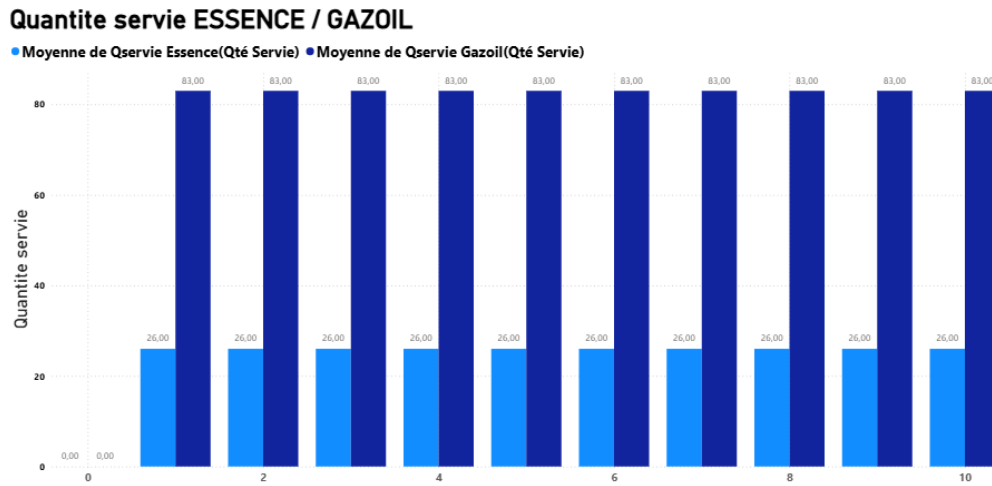


FIG. 4.43 : Quantités services Essence/Gazoil par période – Oran, scénario forte demande (J0–J10).

Les quantités servies (figure 4.43) atteignent 26 m³/période (Essence) et 83 m³/période (Gazoil), strictement égales à la demande sur chaque période de l’horizon. Malgré la pression la plus forte du réseau sur cet hub en termes de volumes, le terme (C) de la fonction objectif impose au solveur de satisfaire intégralement la demande, ce qui se traduit une nouvelle fois par des histogrammes constants et un taux de service de 100%.

4.3.5 Interprétation des jauges

Les tableaux de bord Power BI présentent, pour chaque hub et chaque scénario, deux paires de jauges semi-circulaires. Ces jauges condensent en un seul indicateur visuel l’information distribuée sur 120 périodes, offrant une lecture synthétique de l’état moyen des cuves sur l’ensemble de la décade.

Jauges de taux de remplissage des cuves de contaminat

Les deux premières jauges indiquent respectivement le **taux de remplissage moyen de la cuve de contaminat Essence** et celui de la **cuve de contaminat Gazoil**, exprimés en pourcentage par rapport à une capacité de référence fixée à 500 m³ par cuve. Ce taux correspond au rapport entre le stock moyen de contaminat du produit p au hub i , calculé sur l’ensemble des 120 périodes actives de la décade, et la capacité maximale des cuves dédiées :

$$\text{Taux contaminat}_p(\%) = \frac{\overline{qstockqtm}(ta, p, i)}{500} \times 100$$

Sur l’exemple du hub SBA en scénario demande moyenne (figure 4.4), les valeurs affichées sont 31,71% pour l’Essence et 33,07% pour le Gazoil, confirmant que les cuves de contaminat restent exploitées au tiers de leur capacité maximale en moyenne sur la décade. Ces

niveaux modérés résultent de l'effet combiné de la récupération partielle du contaminat (Q_{cor}) à chaque arrivée de produit et de la minimisation des interfaces de changement de produit optimisée par le solveur (terme B de la fonction objectif). Un taux inférieur à 100% sur toute la décade confirme que la **contrainte 17** du modèle ($qstock_{tm} \leq Capq_{tmp}$) est satisfaite en tout point : aucun débordement de contaminat hors des cuves dédiées n'est observé, quel que soit le hub ou le scénario.

Jauges de taux de remplissage des cuves de produits purs

Les deux jauges suivantes mesurent respectivement le **taux de remplissage moyen de la cuve d'Essence pure** et celui de la **cuve de Gazoil pur**, exprimés en pourcentage par rapport à la capacité de stockage nominale propre à chaque hub. Ce taux est calculé comme le rapport entre le stock moyen du produit p sur la décade et la capacité totale de la cuve correspondante :

$$\text{Taux stock}_p(\%) = \frac{\overline{qstock}(ta, p, i)}{Capc(p, i)} \times 100$$

Sur l'exemple du hub SBA en scénario demande moyenne (figure 4.4), les valeurs affichées sont 68,32% pour l'Essence et 68,64% pour le Gazoil, indiquant que les cuves de produits purs sont exploitées à environ 68% de leur capacité nominale en moyenne sur la décade. Ces taux sont le reflet direct du **terme A** de la fonction objectif : en maintenant des niveaux de stock élevés, le solveur maximise le taux de remplissage moyen sur l'horizon tout en assurant la satisfaction intégrale de la demande (terme C prioritaire avec $\omega = 1000$) et la maîtrise des interfaces de contamination (terme B). Les valeurs observées, comprises entre 50% et 90% selon le hub et le scénario, confirment que les cuves ne descendent jamais à des niveaux dangereux tout en restant éloignées de la saturation, validant ainsi le dimensionnement des capacités de stockage retenues pour le réseau.

4.4 Conclusion

Les résultats obtenus montrent que le modèle répond correctement aux trois niveaux de demande testés. Les séquences de pompage s'adaptent à chaque scénario tout en maîtrisant les interfaces de contamination, et la demande est satisfaite à 100% sur l'ensemble des hubs et des périodes. Le cas de Naâma est particulièrement encourageant : malgré le délai de transit le plus long du réseau, aucune rupture de stock n'est observée, ce qui conforte l'idée d'intégrer ce hub dans le réseau réel. Dans l'ensemble, le modèle se révèle fiable et suffisamment flexible pour servir de base à une planification opérationnelle réelle.

Conclusion Générale

Ce mémoire avait pour objectif de concevoir et de valider un modèle d'optimisation générique pour la planification des séquences de pompage d'un réseau pipeline multiproduit hiérarchique multi-hubs, appliqué au réseau NAFTAL du nord-ouest algérien. Les résultats obtenus permettent de dresser un bilan positif et d'ouvrir des perspectives concrètes.

Sur le plan de la modélisation, la formulation MILP proposée intègre simultanément la gestion des contaminations aux interfaces, la récupération partielle du contaminat, les délais de transit différenciés, les contraintes de capacité de stockage et la satisfaction de la demande des zones de commande, le tout dans un cadre linéarisé exploitable par CPLEX. La validation numérique sur trois scénarios de demande a confirmé la robustesse du modèle : un taux de service de cent pour cent est atteint sur l'ensemble des hubs et des périodes dans chaque scénario. Le comportement adaptatif du solveur est particulièrement révélateur : face à une forte demande, il privilégie de grands batchs pour réduire le nombre d'interfaces et la pénalité de contamination, illustrant concrètement l'arbitrage cohérent entre les trois termes de la fonction objectif.

La proposition d'intégration du hub de Naâma constitue l'apport original de ce travail. La démonstration qu'un taux de service de cent pour cent est atteignable malgré le délai de transit le plus long du réseau (quarante heures depuis Sidi Bel Abbès) fournit un argument quantitatif solide en faveur de cette extension vers les wilayas du sud.

Des perspectives d'amélioration demeurent ouvertes. L'extension vers un cadre stochastique ou robuste permettrait de prendre en compte les incertitudes réelles sur les débits et la demande. Le recours à des techniques de décomposition hiérarchique rendrait le modèle applicable à des réseaux de plus grande taille. Enfin, le couplage avec des données réelles d'exploitation transformerait cet outil en un véritable système d'aide à la décision opérationnelle pour les planificateurs de NAFTAL. Ce travail constitue ainsi, nous l'espérons, une contribution concrète à la modernisation de la chaîne logistique des hydrocarbures en Algérie.

Références bibliographiques

- [1] NAFTAL. *À propos de NAFTAL*. Site officiel de NAFTAL. 2026. URL : <https://www.naftal.dz/fr/index.php/a-propos-de-naftal> (visité le 28/05/2026).
- [2] NAFTAL. *Naftal en chiffres — Rapport d'activité 2023*. Site officiel de NAFTAL. 2023. URL : <https://www.naftal.dz/fr/index.php/rapports-annuels> (visité le 28/05/2026).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Hossein MOSTAFAEI et Alireza GHAFFARI-HADIGHEH. « On the scheduling of real world multiproduct pipelines with simultaneous delivery ». In : *Optimization and Engineering* (2015). URL : https://www.researchgate.net/publication/266394760_On_the_scheduling_of_real_world_multiproduct_pipelines_with_simultaneous_delivery (visité le 11/05/2026).
- [6] Seyed Ali MIRHASSANI et Hamed FANI JAHROMI. « A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system ». In : *Computers & Chemical Engineering* (2011). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098135409002944> (visité le 20/04/2026).
- [7] Anirudh R. PATRACHARI et Adrienne H. JOHANNES. « A conceptual framework to model interfacial contamination in multiproduct petroleum pipelines ». In : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55.15–16 (2012), p. 4029-4038. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931012002608> (visité le 20/05/2026).
- [8] Yansong LI, Dong HAN, Baoying WANG et Jianfei SUN. « An industrial scale simulation method for predicting the contamination evolution in long-distance multiproduct pipelines ». In : *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 14.1 (2023). URL : <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29PS.1949-1204.0000696> (visité le 21/05/2026).
- [9] Yulei XU, Bin XU, Jinzhou SONG, Zhengbing LI, Yi GUO, Renfu TU, Yongtu LIANG, Hongyang GAO et Hengyu WANG. « Scheduling of straight multiproduct pipelines considering the contamination control ». In : *Journal of Pipeline Systems Engineering and*

- Practice* 14.4 (2023). URL : <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JPSEA2.PSENG-1451> (visité le 22/05/2026).
- [10] Marouane BAMOUMEN. « Modélisation et optimisation d'un réseau de pipelines lors de changements de produits ». Thèse de doct. Université Clermont Auvergne, 2022.
- [11] Zhuochao LI, Yi GUO, Bohong WANG, Yamin YAN, Yongtu LIANG et Hrvoje MIKULČIĆ. « Two-stage optimization model for scheduling multiproduct pipeline network with multi-source and multi-terminal ». In : *Energy* (2024). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544224022850> (visité le 18/04/2026).
- [12] Sergio Nascimento Bicalho MAGATAO, Lauro Valentim Rodrigues ARRUDA et Flavio NEVES-JR. « A combined CLP–MILP approach for scheduling commodities in a pipeline ». In : *Computers & Chemical Engineering* (2012). URL : https://www.researchgate.net/publication/220366576_A_combined_CLP-MILP_approach_for_scheduling_commodities_in_a_pipeline (visité le 14/05/2026).
- [13] Lin HUANG, Qi LIAO, Jun YAN, Yongtu LIANG et Haoran ZHANG. « Carbon footprint of oil products pipeline transportation ». In : *Science of the Total Environment* 783 (2021), p. 146906. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721019768> (visité le 23/05/2026).
- [14] Balwinder NIMANA, Chad CANTER et Amit KUMAR. « Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from Canada's oil sands-derived transportation fuels ». In : *Energy* 88 (2015), p. 544-554. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215007756> (visité le 25/05/2026).
- [15] Karen CLAY, Akshaya JHA, Nicholas MULLER et Randall WALSH. *The external costs of transporting petroleum products by pipelines and rail : evidence from shipments of crude oil from North Dakota*. Working Paper 23852. National Bureau of Economic Research, 2017. URL : https://www.nber.org/system/files/working_papers/w23852/w23852.pdf (visité le 24/05/2026).
- [16] 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).
- [17] Wassila ABDELLAOUI, Mehdi SOUIER, M'hammed SAHNOUN et Fouad BEN ABDELAZIZ. « 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).
- [18] Seyed Ali MIRHASSANI, Mahdi ABBASI et Saeideh 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).

- [19] Meysam BAGHBAN et Majid YOUSEFIKHOSHBAKHT. *Short-term scheduling of multiproduct pipelines with multiple refineries and multiple depots*. arXiv preprint arXiv :2203.15295. 2022. URL : <https://arxiv.org/abs/2203.15295> (visité le 25/04/2026).
- [20] Marek WODECKI, Mirosław UCHRONSKI, Wojciech BOZEJKO, Jarosław PEMPERA et Joanna JOZEFOWSKA. *A MILP model for scheduling of multiproduct pipelines with bin-packing formulation*. arXiv preprint arXiv :2312.11381. 2023. URL : <https://arxiv.org/abs/2312.11381> (visité le 09/05/2026).
- [21] Amir BAGHBAN, Pedro M. CASTRO et Fabricio OLIVEIRA. «Data-driven robust optimization for pipeline scheduling under flow rate uncertainty». In : *Computers & Chemical Engineering* (2025). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135424003429> (visité le 06/05/2026).
- [22] Arnaldo MOURA, José Carlos BECCENERI et Horácio Hideki YANASSE. «A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem». In : *Pesquisa Operacional* (2010). URL : <https://www.scielo.br/j/pope/a/mwfkWCfwXshcGHPRN6pscKx/> (visité le 16/04/2026).
- [23] Paulo Cesar RIBAS, Lauro MAGATAO, Sergio Nascimento Bicalho MAGATAO, Flavio NEVES-JR et Lauro Valentim Rodrigues ARRUDA. «A micro-genetic algorithm for multi-objective scheduling of a real world pipeline network». In : *Proceedings of the 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE-22)*. 2012. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197612002588> (visité le 05/05/2026).
- [24] Luis Alberto Avgusz MEIRA, Lauro MAGATAO, Flavio NEVES-JR et Lauro Valentim Rodrigues 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 28/04/2026).
- [25] 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).
- [26] Haoran ZHANG, Yongtu LIANG, Qi LIAO, Jian MA et Xiaohan 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/S037704271730293> (visité le 21/04/2026).
- [27] Xia ZHOU et al. «Multi-objective optimization for natural gas pipeline transport scheduling». In : *Journal of Natural Gas Science and Engineering* (2020). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510016308149> (visité le 08/05/2026).
- [28] Carlos ACOSTA-AMADO. «Optimization of distribution of refined petroleum products in multiproduct pipeline systems : A systematic and bibliometric review». In : *Heliyon*

10 (2024). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402409978X> (visité le 30/04/2026).