

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle

En : Génie industriel

Spécialité : Génie industriel et Productique

Par :
ABDELLAOUI Wassila

Sujet

Modélisation, Ordonnancement d'un système de transport multi produits - un cas d'étude Algérien-

Soutenue publiquement, le / / , devant le jury composé de :

| | | | |
|-------------------------|------------|---------------------------------|---------------|
| Mr.MELIANI Sidi Mohamed | Professeur | Université de Tlemcen | Président |
| Mr.SOUIER Mehdi | Professeur | ESM. Tlemcen | Directeur |
| Mr.SAHNOUN M'hammed | MC, HDR | LINEACT laboratory CESI, France | Co- Directeur |
| Mr.DAHANE Mohammed | MC, HDR | Université de Lorraine, France | Examineur 1 |
| Mme.KOULOUGHLI Sihem | MCA | Université de Tlemcen | Examineur 2 |

Dédicace

À ma mère, À mon père,
À mon marié,
À ma soeur, À mes frères et
À toute ma grande famille et mes amis. . .
À mon amie Guezzen Imane.

Remerciement

Tout d'abord je remercie mon Dieu pour tout le courage, la patience et la volonté qu'il m'a donnés pour que je puisse terminer ce travail. "**Ma réussite n'est due qu'à Allah**".

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma reconnaissance profonde à mon directeur de thèse monsieur Souier Mehdi professeur à L'ESM.Tlemcen à pour avoir accepté de diriger ce travail, pour tous ses conseils,pour toute la confiance qu'il a eu envers mon travail et pour ses grandes qualités humaines.

Ma reconnaissance et mes sincères remerciements vont à mon Co-directeur de thèse monsieur Sahnoun M'hammed, MC.HDR au LINEACT laboratoire CESI, France, pour l'intérêt qu'il a apporté à mes travaux, pour la confiance qu'il a m'accordée. Ses conseils, des constants encouragements m'ont permis de mener à bien ce travail.

Un grand merci à monsieur Ben Abdelaziz Fouad professeur à NEOMA business school, Rouen Campus, France, pour leurs conseils, leur orientation et d'accepter de nous rejoindre pour travailler avec nous où nous avons grandement bénéficier de son expérience .

J'offre mes sincère remerciement au laboratoire de **center of management study dans L'institut supérieur de technologie -Portugal (CEG-IST)** de me accepter d'intégrer dans votre équipe de recherche sous la direction de professeur Relvas Susana qu'est accepter de mon encadré pendant la période de ma bourse PNE. Elle a aidée nous de compléter notre deuxième contributions où j'ai grandement bénéficié de son expérience dans le domaine et ai pu enrichir mon bilan de connaissances dans le domaine étudié d'ordonnement de pipeline .

Nous remercierons aussi la compagnie Sonatrach pour nous avoir fourni une opportunité de tester notre travail sur un vrai système de transport par pipeline.

Par ailleurs, je remercie vivement monsieur Sidi Mohamed professeur à l'université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Je tiens également à adresser mes plus vifs remerciements à monsieur Dahane Mohammed, MC.HDR à l'Université de Lorraine, France et Madame Kouloughli Sihem, Maître de Conférences à l'université Tlemcen pour leur participation à l'évaluation scientifique de ce travail.

Mes remerciements vont à tout le personnel du laboratoire MELT (Manufacturing Engineering Laboratory of Tlemcen) à Tlemcen particulièrement l'équipe de systèmes intelligents en productique dirigée par professeur Souier Mehdi.

Abréviations

| | |
|--|---|
| CPP | Chaîne d'approvisionnement pétrolière |
| SCM | Gestion de chaine Logistique |
| DSC | Chaîne d'approvisionnement en aval |
| SMP | système multi-produit |
| MILP/MINLP | programmation linéaire (no-linéaire) en nombre mixtes |
| MILP /MINLP- continue | programmation linéaire (no-linéaire) en nombre mixtes en représentation continue |
| MILP/MINLP- discrète | programmation linéaire (no-linéaire) en nombre mixtes en représentation discrète |
| PM | programmation Mathématique |
| LP | programmation linéaire |
| NLP | programmation non linéaire |
| CP | programmation par Contrainte |
| SMPS | ordonnancement du transport multi-produit par pipeline |
| SMPSP | problème d'ordonnancement du transport multi-produit par pipeline |

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Dédicace | 1 |
| Remerciement | 2 |
| Abréviations | 4 |
| 1 Introduction générale | 11 |
| 1.1 Contribution et Motivation de la recherche | 14 |
| 1.2 Organisation de la Thèse | 15 |
| 2 L'industrie Pétrolier | 17 |
| 2.1 Introduction | 17 |
| 2.2 L'industrie pétrolière | 17 |
| 2.2.1 localisation de l'industrie pétrolière dans économie mondiale | 20 |
| 2.2.2 Challenge de l'industrie pétrolière | 22 |
| 2.3 Chaîne d'approvisionnement pétrolière(CPP) | 24 |
| 2.3.1 Définition de CPP | 24 |
| 2.3.2 Classification de CPP | 25 |
| 2.3.3 Secteurs de CPP | 27 |
| 2.4 Transport dans CCP | 31 |
| 2.4.1 Différents modes du transport dans CPP | 32 |
| 2.4.2 Transport par pipeline multi-produit | 40 |
| 2.5 Gestion de chaîne d'approvisionnement pétrolière | 43 |
| 2.5.1 SCM dans l'industrie pétrolière | 43 |
| 2.5.2 Nécessité de SCM dans industrie pétrolière | 44 |
| 2.5.3 Optimisation de chaîne d'approvisionnement pétrolière | 45 |
| 2.6 Optimisations dans la chaîne d'approvisionnement en aval | 46 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.6.1 | Composants d'optimisation en DSC | 46 |
| 2.6.2 | Les avantages d'optimisation de DSC | 47 |
| 2.6.3 | Activités d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement pétrolières en aval | 48 |
| 2.7 | Conclusion et l'importance d'étudier les problèmes de SMPS | 50 |
| 3 | Etat de l'art | 52 |
| 3.1 | Introduction | 52 |
| 3.2 | problème d'ordonnancement de transport multi-produit par pipeline(SMPSP) | 53 |
| 3.2.1 | Structures des systèmes des pipelines | 53 |
| 3.2.2 | Cadre d'optimisation | 54 |
| 3.2.3 | Solution Technique | 60 |
| 3.3 | Travaux Réalisés des problèmes SMPS | 62 |
| 3.3.1 | Ordonnancement de transport multi-produit par pipeline droit | 64 |
| 3.3.2 | Ordonnancement de transport multi-produit par un réseau des pipelines | 74 |
| 3.4 | Résultats d'analyse de littérature | 77 |
| 3.5 | Conclusion | 79 |
| 4 | Modélisation Mathématique | 80 |
| 4.1 | Introduction | 80 |
| 4.2 | Définition détaillée de contribution | 80 |
| 4.3 | Description de problème | 82 |
| 4.4 | Modélisation mathématique | 83 |
| 4.4.1 | Hypothèses du travail | 83 |
| 4.4.2 | MILP model | 84 |
| 4.5 | Conclusion | 97 |
| 5 | Cas d'étude et Résultats | 99 |
| 5.1 | Introduction | 99 |
| 5.2 | Présentation de cas d'étude | 102 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.3 | Discussion et Analyse des Résultats | 106 |
| 5.3.1 | Méthode de détermination de nombre optimal $ I^{new} $ | 106 |
| 5.3.2 | Séquence de pompage | 107 |
| 5.3.3 | Planning d'ordonnancement de pipeline d' ASR | 109 |
| 5.3.4 | Gestion des réservoirs des centres | 111 |
| 5.3.5 | Distribution des demandes des clients | 112 |
| 5.3.6 | Taille de modèle | 114 |
| 5.4 | Analyse de sensibilité | 114 |
| 5.5 | conclusion | 119 |
| 6 | Conclusion générale | 121 |
| | Bibliographie | 127 |

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Consommation des produits énergétiques en USA entre les années 1845 et 1995 | 20 |
| 2.2 | Consommation d'énergie mondiale des produits énergétiques entre 1970-2020 | 21 |
| 2.3 | Chaîne d'approvisionnement pétrolier | 25 |
| 2.4 | Inflexibilités/flexibilités dans la chaîne d'approvisionnement en aval du pétrole (1) | 26 |
| 2.5 | Chaine des activités globale de pétrole (2) | 31 |
| 2.6 | Type de mode de pose de pipeline | 33 |
| 2.7 | Exemple de comparaison de mode de transport des carburants | 35 |
| 2.8 | Les types des navires de pétrole | 39 |
| 2.9 | Points stratégiques de transit des navires pétroliers dans le monde | 40 |
| 2.10 | Exemple d'un pipeline droit unidirectionnel | 42 |
| 2.11 | Exemple d'un réseau de pipelines | 42 |
| 3.1 | Processus de fonctionnement de PM | 55 |
| 3.2 | Représentation en temps discret (3) | 58 |
| 3.3 | Représentation en temps continue | 59 |
| 3.4 | Discrétisation du volume du pipeline | 65 |
| 3.5 | Principaux composants d'un modèle de simulation à événements discrets des opérations de système de pipeline (4) | 69 |
| 3.6 | Diagramme de la solution proposée par (5) | 72 |
| 3.7 | Réseau de pipelines brésilien | 75 |
| 3.8 | Système de transport par pipeline multi-produit arborescent | 76 |
| 3.9 | Diagramme de méthode proposée par (6) | 77 |
| 3.10 | Exemple de Réseau de pipelines multi-source | 78 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 4.1 | Structure physique de système étudié | 82 |
| 4.2 | Valeur de l'interface entre les produits adjacents à l'intérieur du pipeline | 89 |
| 4.3 | Exemple illustratif de contrainte 4.12 | 91 |
| 5.1 | Réseau de Transport des Hydrocarbures en Algérie dans les années 50 | 100 |
| 5.2 | Cartographie du Réseau de Transport des Hydrocarbures en Algérie en 2021 | 101 |
| 5.3 | Tracé géographique du système d' ASR | 103 |
| 5.4 | Structure physique du système de pipeline ASR/ multi-produit | 103 |
| 5.5 | Planning d'ordonnement de pipeline d'ASR | 110 |
| 5.6 | Niveaux des stocks au centre de Sidi bel Abbés | 112 |
| 5.7 | Niveaux des stocks au centre Remchi | 113 |
| 5.8 | Comparaison des séquences S_0 , S_{+5} , S_{+10} et S_{+15} | 118 |

Liste des tableaux

| | | |
|------|--|-----|
| 2.1 | Classification de CPP | 26 |
| 2.2 | Exemple de coûts de transport des carburants | 36 |
| 5.1 | Demande des centres de distribution des carburants | 104 |
| 5.2 | Capacités de stockage maximum/minimum et stock initial dans les centres en m^3 | 105 |
| 5.3 | Coûts et volumes des interfaces | 105 |
| 5.4 | Capacité des réservoirs à la raffinerie | 105 |
| 5.5 | Caractéristiques de séquence de pompage | 108 |
| 5.6 | Distribution des demandes aux clients de centre 1 | 113 |
| 5.7 | Distribution des demandes aux clients de centre 2 | 114 |
| 5.8 | Résultats de taille de modèle | 114 |
| 5.9 | Résultats de sensibilité du modèle pour le scénario (i) | 116 |
| 5.10 | Résultats de sensibilité du modèle pour le scénario (ii) | 117 |

1 Introduction générale

L'industrie pétrolière joue un rôle particulier dans l'économie mondiale et a un impact significatif sur la qualité de vie des personnes et le développement des autres industries. Depuis les années 50, cette industrie représente le premier fournisseur du marché énergétique où les produits fournis par cette industrie représentent un élément central de la vie moderne et la première source d'énergie au monde, selon l'agence internationale de l'énergie, en 2020, 40.7 % de pétrole et 15,2% de gaz ont contribué à l'énergie mondiale. De plus, le pétrole se classe en deuxième position après l'eau en tant que le produit le plus consommable au monde.

Actuellement, tous les secteurs des activités des personnes ou des industries sont concernés de près ou de loin par l'utilisation des différents types de pétrole. Au niveau des industries, une partie de ces produits sont utilisés comme une matière première entrant dans la fabrication de nombreux produits que nous utilisons dans notre vie quotidienne telle que les produits cosmétiques, les textiles des vêtements qui sont construits à base des polyesters ou nylons. De plus, 99% des produits en plastique que nous utilisons sont faits principalement de pétrole. Par ailleurs, il est un composant majeur dans les produits détergents, des médicaments, et des caoutchoucs. En outre, environ 5% de la production d'électricité mondiale sont produits par les centrales thermiques à fioul.

Les produits pétroliers sont aussi utilisés comme sources des énergies pour de nombreuses industries en particulier pour celles qui sont basées sur des machines à moteur tel que les entreprises de transports, industries automobiles et industries manufacturières et agricoles, car le pétrole répond à leurs exigences de base telles que la densité énergétique, sécurité et facilité de manipulation contrairement à d'autres sources (7).

A ce jour, une grande partie du pétrole est transformé en carburants : essences, gasoil, kérosène..etc qui sont utilisés dans le secteur du transport où il dépend presque de 98% de ces produits.

L'industrie pétrolière est énorme et ses activités s'étendent sur toutes les régions du monde. Ils sont organisés dans une chaîne s'appelle une chaîne d'approvisionnement pétrolier généralement divisée en amont et en aval chaînes. La première est réservée principalement à la production de pétrole brut et leur transformation en produits consommables et la deuxième pour le transport et la distribution des produits finis aux différents marchés nationaux et internationaux.

Le principal défi confronté par l'industrie pétrolière n'est pas la disponibilité des ressources pétrolières, mais le vrai challenge de l'industrie pétrolière est de minimiser les coûts de production et de transport des produits finis aux consommateurs (8). Une robuste gestion de la chaîne d'approvisionnement améliorera ses objectifs (9) où la mise en œuvre d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement dans l'industrie pétrolière peut aider à réduire les coûts, augmenter les bénéfices et gérer la planification des transports et distributions.

De plus, l'industrie pétrolière est considérée comme un modèle classique d'implantation des techniques de gestion de la chaîne d'approvisionnement où le challenge de SCM dans la chaîne d'approvisionnement pétrolière est de résoudre des nombreux défis causés par la nature de la chaîne, tels que la complexité, les caractéristiques inflexibles, grande distance parcourue entre les sources et les marchés des clients finaux, les capacités limitées des ressources aux différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement (10). D'autre part, la croissance continue des demandes et le développement technologique de l'industrie pétrolière ont créé une forte concurrence entre les compagnies pétrolières (11; 12; 13).

(14) confirme que la bonne gestion de la chaîne d'approvisionnement

est une capacité vitale des entreprises à obtenir des avantages concurrentiels.

Dans cette thèse, nous avons concentré à l'optimisation de chaîne d'approvisionnement en aval puisqu'elle présente un plus grand potentiel d'amélioration, de la flexibilité et de réduction des coûts (11; 15; 16).

Dans la chaîne d'approvisionnement pétrolière en aval, de grandes quantités de différents types des produits raffinés sont transportées des raffineries vers plusieurs centres de stockage et de distribution via différents modes de transport. Selon (17), l'activité du transport est la tâche de décision la plus importante dans la chaîne d'approvisionnement du pétrole. Ainsi, l'optimisation des modes de transport conduit à une meilleure gestion des demandes. Les pipelines semblent être le moyen le plus sûr et le moins coûteux de transporter de gros volumes des produits pétroliers pendant des longues distances (18; 19), permet de fonctionner de manière continue sans être affecté par les conditions météorologiques. De plus, ils protègent mieux l'environnement et évitent les problèmes de circulation causés par l'utilisation de camions-citernes.

La spécification des systèmes de transport par pipelines multi-produit ont la capacité de transporter différents types de produits pétroliers dans le même pipeline. La technique du batching est utilisée où les batches des produits sont pompés batch à batch sans aucune séparation physique entre les différents batches, ce qui produit certaines interfaces de dégradation de la qualité du produit entre les frontières des batches adjacents à l'intérieur du pipeline. Ce phénomène sont appelés interface, contaminât, trans-mix. Comme (20) l'a signalé, les interfaces représente l'inconvénient principal du pipeline multi-produit. Le volume d'une interface dépend de plusieurs paramètres tels que les débits de pompages, les structures des pipelines, la distance parcourue, la topographie et les types des produits adjacents.

Dans ce contexte, l'ordonnancement du transport à l'aide des systèmes des pipelines multi-produit est considéré comme un problème d'optimisation in-

téressant. Cependant, en raison de sa complexité, il est considéré comme un problème NP-complet (11). (21) a déclaré que l'objectif principal de l'ordonnement de pipeline est d'équilibrer les contraintes temporelles et spatiales entre la capacité d'approvisionnement de la raffinerie et la demande des consommateurs pour les différents centres de distribution qui sont localisés à des différents endroits le long du pipeline.

1.1 Contribution et Motivation de la recherche

Au niveau des compagnies pétrolières, la plupart des opérations de planification et d'ordonnement du système de pipeline sont décidées par les responsables de ces opérations sur la base de leurs expériences et l'archive. Par conséquent, l'optimalité des plans obtenue n'est pas assurée et il peut conduire à des coûts d'exploitation beaucoup plus élevés (22; 23). Cela motive les chercheurs à développer des techniques d'optimisation et des outils de calcul permet d'améliorer le processus et bien gérer les ressources qui conduisent à une augmentation du profit. En outre, les problèmes d'ordonnement du pipeline multi-produit sont classés parmi les trois problèmes d'ordonnement qu'ont reçu une attention particulière des chercheurs au cours des deux dernières décennies. Il est classé la troisième (24).

Par ailleurs, les problèmes d'ordonnement des transports par pipeline multi-produit sont classés parmi les problèmes de recherche opérationnelle complexe, Pour cela, l'utilisation d'outils d'optimisation est cruciale puisque ceux-ci peuvent fournir des procédures systématiques pour obtenir des solutions réalisables de haute qualité, Tous ça, nous a motivé à étudier ce problème qui a un grand impact au niveau national et international.

Dans ce contexte, nous avons proposé d'étudier la modélisation et l'ordonnement d'un système de transport des carburants par pipeline droit/ multi-produit qui relie une raffinerie à plusieurs centres de stockage et de distribu-

tion. La spécification de la contribution abordée dans cette thèse consiste à considérer un horizon multi-période à long terme, l'heure de fin de chaque période représente une date d'échéance de livraison des demandes des clients des centres de distribution. Les demandes pour chaque période doivent être entièrement satisfaites dans le temps souhait sans aucun transfert de demande entre les périodes avec la qualité requise et à un coût d'exploitation minimal de pipeline en respectant les contraintes de fonctionnement de raffinerie, pipeline et de gestion des réservoirs des centres de stockage et de distribution.

La modélisation mathématique à base de programmation linéaire en nombre mixte (MILP), en représentation continuée est développée pour modéliser l'ordonnancement de ce système où l'outil d'optimisation adapté à ce problème permet de présenter un moyen structuré et logique de créer un plan d'ordonnancement efficace afin de minimiser le coût de pompage et le coût des interfaces de dégradation de qualité résulte entre les bordures des batches qui circulent dans le pipeline sans aucune séparation physique.

Notre recherche a été appuyée par une étude d'un cas réel d'une compagnie pétrolière algérienne responsable d'approvisionnement des carburants pour les régions de ouest et sud-ouest de l'Algérie. Le modèle proposé a réussi de fournir un calendrier efficace qui satisfait la demande périodique tout en respectant les exigences de qualité et de coût.

Logiciel IBM ILOG CPLEX à base de solveur de CPLEX était utilisé pour le codage et l'exécution de modèle d'ordonnancement MILP.

1.2 Organisation de la Thèse

Le reste de manuscrit de thèse est organisé en cinq chapitres :

- **Chapitre 2** présente le contexte général de l'étude et définit les éléments-clés de l'industrie pétrolière qui garantit un approvisionnement continué.

Nous accordons notre attention aux activités de gestion de chaîne d'approvisionnement pétrolier spécialement la gestion de chaîne d'approvisionnement en aval où les systèmes de transport par pipeline multi-produit jouent un rôle particulier dans la satisfaction des clients finaux de la chaîne d'approvisionnement pétrolière. Elle présente aussi la réponse de question pourquoi nous avons choisi d'étudier ce sujet.

- **Chapitre 3** couvre à la fois les techniques générales d'ordonnement du transport par pipeline multi-produit et les travaux existant dans ce domaine. La première partie montre les outils et les méthodes d'optimisation utilisés pour résoudre les problèmes de planification et d'ordonnement du système de pipeline. La deuxième partie indique comment les chercheurs ont adapté ces méthodes. Dans l'état de l'art, les articles sont organisés selon la structure de pipeline, l'ordonnement de pipeline droit /multi-produit et la deuxième pour les réseaux des pipelines.
- **Chapitre 4** comprend notre contribution, leur localisation par rapport aux travaux réalisés, description détaillée du système étudié et le modèle d'ordonnement développé à base de programmation linéaire en nombres mixtes, en représentation continuée de problème (MILP-continue).
- **Chapitre 5** est consacré à la présentation du système de cas d'étude, les résultats obtenus, la discussion des résultats et l'analyse de sensibilité.
- **Chapitre 6** est réservée au conclusion générale, perspective et future recherche.

2 L'industrie Pétrolier

2.1 Introduction

À ce jour, l'industrie pétrolière est l'un des éléments les plus importants dans l'économie nationale et internationale. Elle sert à fournir des produits très essentiels de déroulement de notre vie et des différentes usines. La spécification de cette industrie est que la production est limitée dans certaines régions mais la consommation est dans le monde entier. L'absence de ces produits aux marchés locaux de consommateurs peut perturber le fonctionnement de plusieurs secteurs.

Dans ce contexte, nous avons présenté ce chapitre pour définir les éléments-clés de l'industrie pétrolière qui garantit un approvisionnement continué. Dans la section [2.2](#) nous présentons une définition de l'industrie pétrolière et brève discussion sur l'histoire de développement de cette industrie. La section [2.3](#) contient tout ce qui concerne la chaîne d'approvisionnement pétrolier. La section [2.4](#) est réservée aux systèmes des transports dans le CPP. La gestion de chaîne d'approvisionnement pétrolière est mentionnée dans la section [2.5](#) et la section [2.6](#) décrit l'optimisation de chaîne d'approvisionnement en aval. La section [2.7](#) est réservée pour conclusion et l'importance d'étudier les problèmes de SMPS.

2.2 L'industrie pétrolière

L'industrie pétrolière (en anglais 'petroleum industry' ou 'oil industry') est un ensemble de processus complexes comprenant exploration, extraction, raffinage, transport et la distribution qui sont organisés dans une chaîne qui s'appelle une chaîne d'approvisionnement pétrolier généralement divisée en amont et en aval chaînes (en anglais c'est 'upstream and downstream chains').

Le pétrole brut est la matière première de l'industrie pétrolière, Les gisements de production peuvent être trouvée soit en profondeur sous terre, soit dans des zones offshore. Les opérations d'exploration, d'extraction et de raffinage sont effectuées sur du pétrole brut dans le but principal d'extraire et transformer ce produit en produits consommables exemples l'essence, gasoil, kérosène, puis transporter et distribuer ces produits à partir de zones de production situées dans des endroits spéciaux différents consommateurs à travers le monde pour la commercialisation.

D'autre part, des nouveaux produits peuvent être extraits de pétrole brut pour l'industrie pétrochimique telle que les oléfines et les aromatiques. De plus, les usines pétrochimiques jouent un rôle particulier dans la fabrication des produits très demandés dans la vie quotidienne des personnes et des usines telles que les plastiques, les savons, les détergents et les produits de santé, les fibres synthétiques, les caoutchoucs et les peintures (15).

Dans cette industrie, le lien entre les ressources pétrolières c.à.d les champs de pétrole, raffineries et les marchés de consommateurs nécessitent un immense système d'infrastructures pour assurer la continuation d'approvisionnement des produits pétroliers. Les pipelines, les navires, les camions citernes et les centres des stockages sont les principaux composants critiques de ce système.

Depuis l'antiquité, le pétrole brut a été utilisé à de nombreuses fins, la civilisation mésopotamienne utilisait pour allumer ses lampes en guise l'huile à brûler dans les lampes. De plus, il a été utilisé dans le domaine pharmaceutique. Jusqu'au milieu du XVIIIe siècle, il n'a pas été découvert qu'il y avait la possibilité de trouver des puits de pétrole dans les profondeurs de la terre, où l'utilisation était basée sur les gisements de surface (nappes superficielles). En 1958, l'industrie pétrolière est née par invention de lampe de pétrole, la demande croissante de ces lampes avec l'émergence du moteur

à explosion a attiré l'attention de développer de nouvelles formes des huiles de haute qualité. Cela a coïncidé avec la création de la première raffinerie en Roumanie qui a fourni 1000 lampes pour l'éclairage public à Bucarest. Le 30 août 1859, Edwin Drake était le premier à extraire du pétrole en forant un puits producteur de pétrole de 20 mètres de profondeur à Titusville (Pennsylvanie). Ce dernier représente un début de naissance de l'industrie pétrolière moderne. La période entre 1870 -1913 connaissent un développement rapide de l'emplacement de l'industrie pétrolière dans le marché énergétique. John D. Rockefeller fonde la grande société de raffinage qui produit le kérosène, cette entreprise fournit le besoin de marche américain et contrôle 95% du marché mondial. Le développement de science de pétrochimie, l'invention de l'automobile et la découverte des autres gisements au Moyen-Orient ont explosé la consommation des pétroles et attirer l'attention des investisseurs où la ruée vers l'or noir touche différentes régions du monde.

La figure [2.1](#) représente la part des ressources énergétiques entre 1845-1945 dans le marché américain l'un de plus consommateur d'énergie dans le monde pendant cette période.

Entre 1930 -1945, L'Amérique est le principal producteur de pétrole en monde (plus 60% de production mondiale). La découverte des autres puits de pétrole au Moyen-Orient : Iran la première découverte à Masdjed Soleimân en 1908, Irak en 1925, Arabie Saoudite à Dammam-1938 et à Ghawa-1948, ces deux dernières représentent le plus grand champ pétrolier au monde. Ces découvertes ont conduit à l'émergence des nouveaux producteurs.

Au début, le pétrole a été découvert en nord d'Algérie, où deux champs ont été découverts, le premier gisement existé en Ain Ain Zeftdans- Tliouanet la région de Relizane (1915) contient d'huile lourde, puits de profond de -1000m et la deuxième en Oued Gueterini dans la région de Sidi Aissa (1948) contient d'huile légère, puits de profond de -700m. Les deux gisements sont des petites tailles. En janvier 1956 le pétrole a été découvert en Sahara de

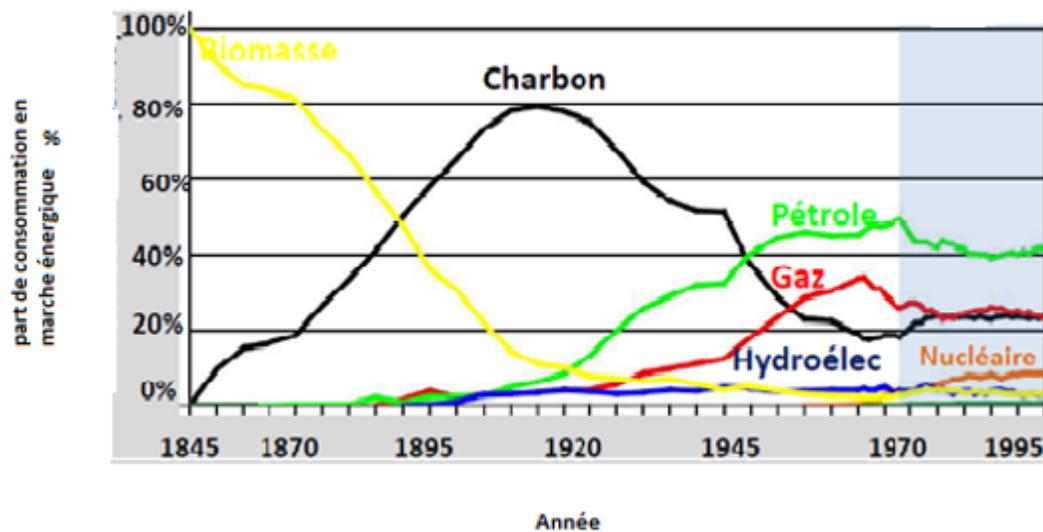


Figure 2.1 – Consommation des produits énergétiques en USA entre les années 1845 et 1995

Algérie à Edjeleh (Ain ameanas) et En juin 1956 La découverte de champs pétrolier de Hassi Messaoud qui représente le plus grand champ pétrolier en Algérie.

2.2.1 Localisation de l'industrie pétrolière dans économie mondiale

L'industrie pétrolière est l'une des composantes les plus importantes de l'économie mondiale et a un impact significatif sur la qualité de vie des personnes et le développement d'autres industries. Les produits fournis par cette industrie représentent un élément central de la vie moderne et la première source d'énergie au monde depuis le milieu des années 50. De plus, c'est le deuxième produit à être consommé après l'eau. La figure 2.2 représente la consommation d'énergie mondiale des produits énergétiques de l'année 1970 jusqu'à l'année 2020 où la consommation de pétrole est une courbe croissante occupe la première place dans la liste des produits énergétiques le plus consommable au monde.

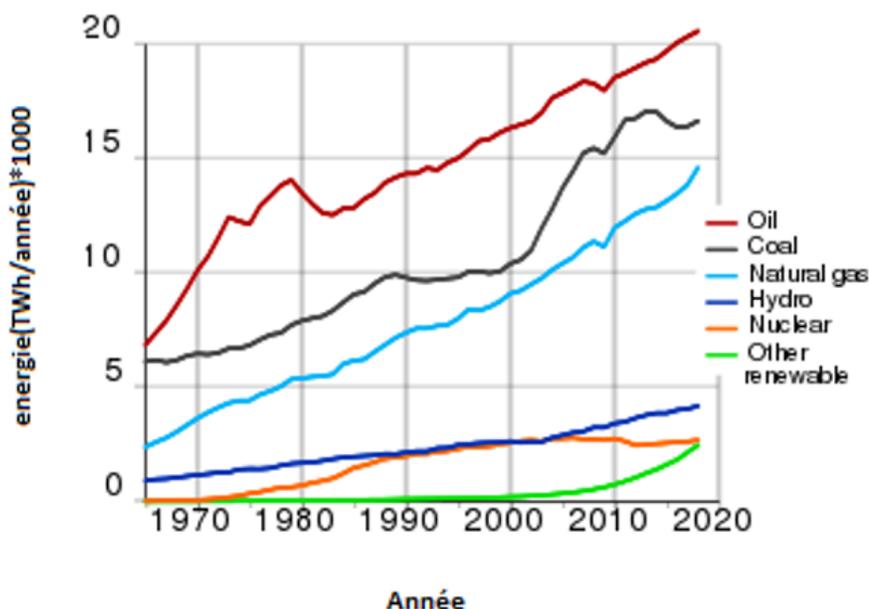


Figure 2.2 – Consommation d'énergie mondiale des produits énergétiques entre 1970-2020

Selon l'agence internationale de l'énergie, en 2020, 40.7 % de pétrole et 15,2% de gaz ont contribué à l'énergie mondiale. Les différents types des produits pétroliers soutiennent la fabrication de nombreux produits que nous utilisons dans notre vie quotidienne telle que les produits cosmétiques, les textiles des vêtements fabriqués par les nylons ou des polyesters. Et 99% des produits en plastique que nous utilisons sont à la base fabriqués de pétrole. Par ailleurs, il est composant major dans les produits des médicaments, détergents, et des caoutchoucs. En outre, environ 5% de production d'électricité mondiale sont produits par les centrales thermiques à fioul.

Les produits pétroliers sont aussi utilisés comme sources des énergies pour des nombreuses industries en particulier pour celles qui sont basées sur des machines à moteur tel que les entreprises des transports, industries automobiles, industries manufacturières et l'agriculture, car le pétrole répond à leurs exigences de base telles que la densité énergétique, sécurité et facilité de manipulation contrairement à d'autres sources (17). Une grande partie du

pétrole est transformée en carburants qui sont utilisés dans le secteur du transport où il dépend presque de 98% des produits pétroliers. Selon (17), ces produits représentent une énergie stratégique influençant l'économie internationale, nationale et la stabilité de la société, par exemple les produits raffinés représentent 12,9% de la consommation totale d'énergie de la Chine et la demande augmente de 6,3% par an.

Gasoil, essences, kérosène sont les produits carburants les plus populaires dans l'industrie pétrolière. Ils sont principalement utilisés dans le fonctionnement des transports terrestre, aérien et maritime. Ces derniers sont des éléments critiques pour faciliter la mobilité des personnes et des biens. De plus, ces moyens ont contribué positivement à relier différentes régions du monde et facilitent le commerce national et international.

D'après ce qui a été mentionné, on peut visualiser le positionnement vital de l'industrie pétrolière dans l'économie mondiale, la qualité de fonctionnement des différentes industries et le confortement de vie des personnes qui ont utilisé ces produits soient comme des matières premières ou source d'énergie, elle soutient des millions d'emplois, elle sert à fournir des coûts énergétiques raisonnables pour les consommateurs. De plus, elle garantit notre sécurité énergétique. Il est remarquable que le secteur des transports est le plus gros consommateur de produits pétroliers où une grande partie du pétrole brut est transformée aux carburants. Tout ça attire l'attention soit des pays producteurs des pétroles et des chercheurs à investir et à développer cette industrie et d'étudier comment nous pouvons utiliser des techniques d'optimisation pour résoudre les problèmes de cette complexe industrie ?

2.2.2 Challenge de l'industrie pétrolière

Le pétrole est l'un des sources non renouvelables. Selon la majorité des recherches sur la disponibilité de ces produits, il nous reste suffisamment des ressources pour maintenir les niveaux des productions actuels pendant

au minimum les 50 ans prochains. Par conséquent, le principal défi auquel est confronté l'industrie pétrolière n'est pas la disponibilité des ressources pétrolières, mais le vrai challenge de l'industrie pétrolière est mettant ces réserves en production, en transport et en distribuant les produits finaux aux consommateurs au minimum coûts.

Une robuste gestion de la chaîne d'approvisionnement améliorera ces objectifs (9) où la mise en œuvre d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement dans l'industrie pétrolière peut aider à réduire les coûts, augmenter les bénéfices et gérer la planification des transports et distributions.

(15) ont écrit que l'efficacité et le rentabilité des pratiques de chaîne d'approvisionnement de l'industrie pétrolière représentent des facteurs importants pour maintenir des approvisionnements continus en pétrole brut, la réduction des délais des transports et des coûts de distribution aux clients.

(9) a mentionné que l'industrie pétrolière est inclus dans une chaîne d'approvisionnement mondiale qui comprend le transport national et international, la visibilité, le contrôle des commandes et des stocks, la manutention des matériaux et la technologie de l'information. Ainsi, l'industrie pétrolière est un modèle classique d'implémentaient de techniques de gestion de la chaîne d'approvisionnement. En plus la gestion de la chaîne d'approvisionnement représente un outil puissant de résoudre des nombreux défis causés par la nature de chaîne d'approvisionnement pétrolière telle que leur complexité, caractéristiques inflexibles, long distance entre sources et clients c.à.d un long délai de livraison, capacités limités des ressources de distribution aux différentes étapes de la chaîne et les capacités limités des stockages (10). Les changements politiques ou économiques sont aussi l'un des événements imprévus qui ont un impact sur le prix du pétrole.

D'autres, le marché du pétrole est en croissance constante en matière de demandes et le nombre de clients cela a permis aux compagnies pétrolières

d'augmenter leur part sur le marché énergétique mondial et leur rentabilité. En plus, la facilité de la loi de commerce international et la rigidité de chaîne d'approvisionnement de l'industrie pétrolière ont rendu sa gestion très complexe et difficile nécessitent des outils puissants pour atteindre les objectifs et rester compétitive.

2.3 Chaîne d'approvisionnement pétrolière(CPP)

2.3.1 Définition de CPP

Le fonctionnement d'industrie pétrolière est inclus dans une chaîne d'approvisionnement mondiale qui comprend le transport national et international, expédition, la visibilité, commercialisation, le contrôle des stocks et des commandes. Elles comprennent aussi plusieurs éléments tels que la manutention des matériaux, les installations d'import/export, la distribution de produits énergétiques des points d'origine aux marchés de consommation et la technologie de l'information.

(25) définit la chaîne d'approvisionnement pétrolier (CPP) : est un ensemble des activités logistiques permettant aux consommateurs de disposer des carburants en stations-service. Le CPP commence par l'exploration de matières premières, la production de pétrole et leur transport, passant par les opérations de raffinage et le transport des produits raffinés aux centres de stockage et distribution pour la livraison aux clients. Le flux d'informations est aussi un axe essentiel pour le bon fonctionnement entre les différents éléments de la chaîne. La figure 2.3 représente un aperçu général de structure de chaîne d'approvisionnement.

La chaîne d'approvisionnement en pétrole est connue par sa complexité et son inflexibilité comparant à d'autres industries(11; 15). Cela est dû à plusieurs raisons, le processus complexe de CPP qui est divisé en segments amont et aval en fonction des activités avant et après l'étape de raffinage, par exemple

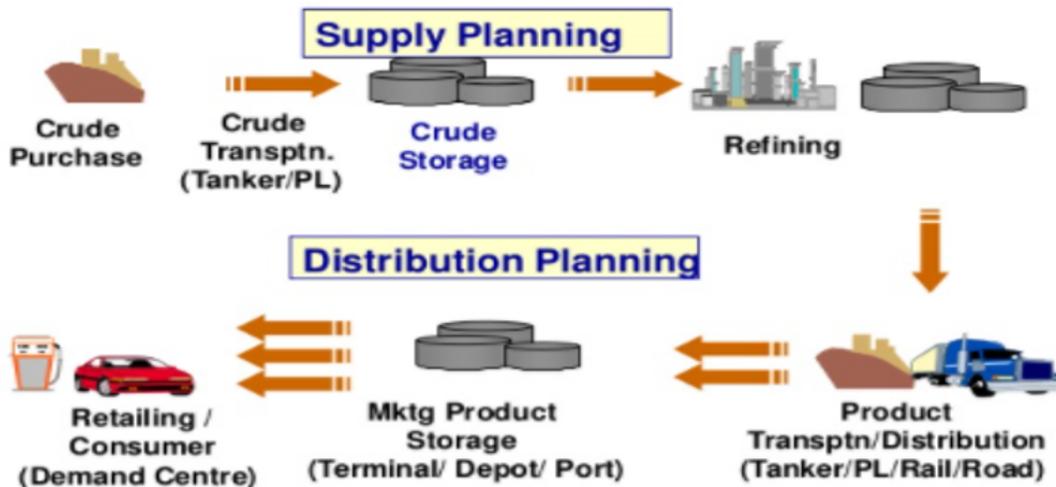


Figure 2.3 – Chaîne d’approvisionnement pétrolier

Le pétrole brut est passé par un processus de raffinage complexe et à forte intensité de capital pour le transfert en produits commerciaux (16; 26). La distance entre les champs pétroliers et les consommateurs finaux peuvent souvent être des milliers et des milliers de kilomètres (km), ce qui est la principale raison pour laquelle la chaîne d’approvisionnement en pétrole a des délais plus longs que dans d’autres industries, limitation des transports primaires a lieu avec une capacité fixe de pipelines ou a de cabotage. D’autre part, la capacité de stockage des dépôts pour la distribution secondaire était limitée (11; 26).

La figure 2.4 illustre les parties flexibles et inflexibles de la chaîne d’approvisionnement en aval.

2.3.2 Classification de CPP

L’étude bibliographique montre qu’il existe deux classifications de chaîne d’approvisionnement pétrolière (voire le tableau 2.1), cette classification est basée sur la division structurelle des composants physiques de CPP.

Selon la première classification, le CPP est divisé en deux segments en

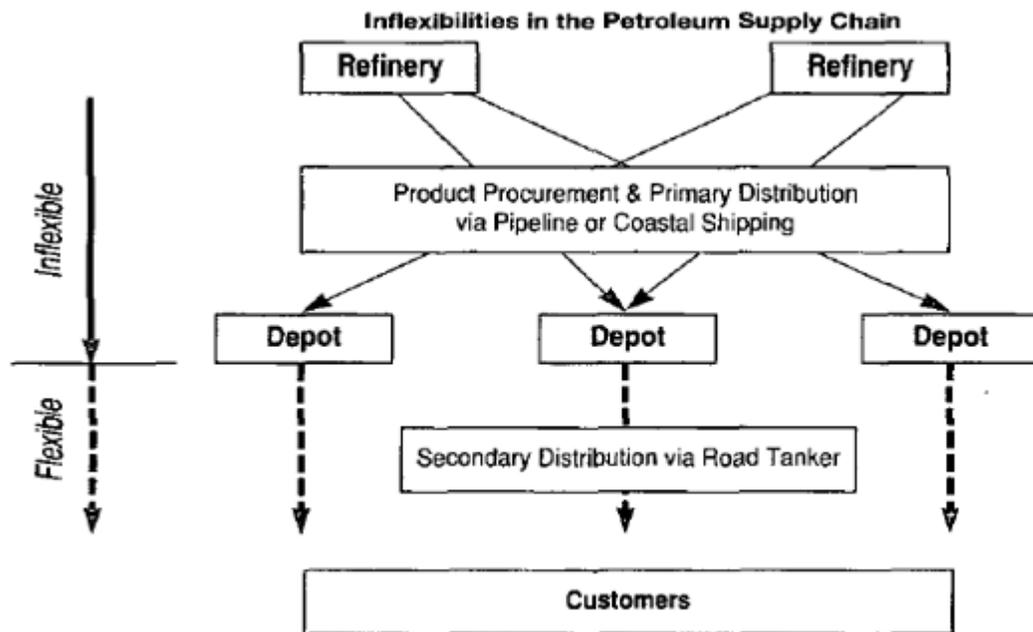


Figure 2.4 – Inflexibilit s/flexibilités dans la chaîne d’approvisionnement en aval du pétrole (1)

| | |
|--|------------------------|
| classification | auteurs |
| deux segments(en amont-en aval) | (15), (27) |
| trois segments(en amont-midstream-en aval) | (28), (29), (30), (31) |

Table 2.1 – Classification de CPP

amont et en aval. Le segment en amont est l'ensemble des entreprises qui recherchent dans le monde des réservoirs de matières premières, puis forent pour extraire cette matière. Il comprend des activités d'exploration, qui comprennent la création d'études géologiques et l'obtention de droits fonciers, et des activités de productions, qui comprennent le forage à terre et en mer.

Le deuxième segment qui est le segment en aval comprend les raffineries, les centres des stockages et distribution et les clients. Ce segment couvre la transformation du pétrole brut dans les raffineries et les usines pétrochimiques, le transport, la distribution et les activités de commercialisation des produits dérivés du pétrole.

La deuxième classification divise la chaîne d'approvisionnement à trois segments en amont, midstream et en aval. Le segment en amont couvre les mêmes opérations que la première classification qui sont principalement d'exploitation et la production. Selon la littérature, le midstream segment se réfère aux transports du pétrole brut vers les terminaux et les centres de stockages ou bien les opérations au niveau raffineries et les activités pétrochimiques (31). Le dernier segment qui est le segment en aval responsable des activités de transport et de distribution des produits finaux aux clients. De ce qui précédé, nous pouvons conclure que la différence entre les deux classifications est que dans la première, le segment midstream est inclus dans la partie de segment en aval. La classification de CPP se fait en fonction du besoin d'étude et dans les deux classifications il y'a les mêmes composants, la différence entre eux est la séparation structurelle des composants physiques de CPP.

2.3.3 Secteurs de CPP

I) Secteur en Amont :

Le secteur amont (en anglais 'upstream sector') est également connu sous le nom de secteur E&P (Exploration et Production), c'est la partie de l'industrie pétrolière chargée de trouver des gisements de pétrole brut et ainsi que de les produire, ce qui nécessite des travaux d'ingénierie

hautement qualifiés. Il se compose de complexe processus qui implique la recherche de gisements potentiels de pétrole brut souterrains ou sous-marins (partis d'exploration), Le forage de puits d'exploration, puis Le forage et l'exploitation des puits contenant du pétrole pour le récupérer et le pomper vers la surface (partie de production).

Les majors caractéristiques de ce segment sont

- Les capitaux d'investissement et niveau de risque sont élevés,
- Les opérations de l'exploration et forage prennent de temps pour l'effectuer,
- Il utilise un haut niveau de technologie,
- Il est très organisé et la politique mondiale affectant ce secteur.

Les activités du secteur en amont On peut organiser les activités de secteurs en amont en deux parties, partie d'exploration et de production.

(a) **Explorations**

La partie de l'exploration pétrolière englobe les méthodes et les processus utilisant dans la localisation de sites des gisements d'hydrocarbures pour le forage et l'extraction de pétrole brut. L'identification des indices permettant de supposer où se trouve le pétrole (définir leur géométrie) et en quel volume est l'une des premières étapes dans le processus de l'exploitation. La collaboration de géophysicien et géologue est nécessaire dans cette enquête minutieuse. L'exploration peut s'organiser en trois étapes qui sont :

La géologie pétrolière ou l'observation de la surface permet de repérer les lieux sédimentaires qui méritent d'être étudiées. Les photographies aériennes et des images satellites sont utilisées par les géologues avant d'aller au terrain pour examiner les affleurements. Après cela l'analyse d'échantillons de roche prélevés au niveau des laboratoires sont effectués dans le but de déterminer l'âge et la nature des sédiments afin de détecter les zones les plus prometteuses.

Cette étape représente 5 % du budget de la prospection.

La géophysique ou l'étude des profondeurs Le but de cette étape est de récolter un maximum d'informations pour que le forage soit réalisé avec le maximum de chances de succès. La technique de "sismique de réflexion" ou "sorte d'échographie du sous-sol" est principalement utilisée pour l'obtention des données sismiques représentées par des ondes sismiques générées par des vibreurs pneumatiques ou des canons à air qui se reflète successivement et à des différentes vitesses selon les couches rocheuses qu'elles traversent. L'analyse de ces ondes aide à constituer des images en 2D ou en 3D. Cette étape consomme environ de 15 % du budget de la prospection.

Vérification des hypothèses seul le forage peut certifier la présence de pétrole. Les profondeurs de puits de forage varient le plus souvent entre 2 000 et 4 000 m. Cette partie représente une tâche lourde en matière de temps et budget d'exploration, elle prend de 2 à 6 mois et 60 % du coût d'exploration.

(b) **Production**

Dis que l'étape d'exploration confirme l'existence et la localisation des gisements de pétrole qui contient des quantités rentables pour être exploitées, une installation pétrolière de forage est installée à cet endroit ou le processus de la production comprend l'extraction des hydrocarbures, la séparation du mélange d'hydrocarbure liquide, de gaz, d'eau et de solides, et l'élimination des constituants qui ne peuvent pas être vendus. Une technique très complexe est utilisée pour acheminer le pétrole à travers un maillage de réservoirs vers les installations de traitement situées en surface.

II) **Secteur Midstream :**

Généralement, les secteurs intermédiaires sont celles qui se concentrent sur le transport. Ils sont chargés de transporter les matières premières extraites vers les raffineries pour traiter le pétrole. D'autre part, ils comprennent le traitement, le stockage et la commercialisation du pétrole brut. Ce segment est caractérisé par un faible risque en capital, une réglementation élevée, en particulier sur l'axe de transport par pipeline et les investissements dans les actifs intermédiaires dépendent de succès de secteur en amont. D'autres, le processus de raffinage peut être aussi inclus dans ce segment.

III) Secteur en aval

Le secteur en aval représente la dernière pièce dans la chaîne d'approvisionnement pétrolier et regroupe les activités suivantes :

- (a) **Raffinage** : après l'obtention de matières premières (pétrole brut) qui n'est pas utilisé par le client final qu'après avoir été passer par une tâche de transformation en produits commerciaux tels que gazols, essences, sans plomb et en diverses autres sources d'énergie, cette tâche est effectuée au niveau de raffinerie à travers un processus complexe et bien planifié pour ajouter une valeur à cette matière qui devient consommables dans la vie quotidienne des personnes et des industries.

- (b) **Transport et Distribution** : Le transport des produits raffineries vers les dépôts qui sont localisés proches des clients nécessite un robuste management garanti que les bons produits sont distribués aux bons clients au bon moment avec des coûts minimums.

- (c) **Gestion de stock et marketing** : Cette tâche assure la bonne gestion des stocks au niveau des dépôts par le contrôle des niveaux des stocks des réservoirs et marketing de ces produits aux différents marchés au monde. Le marketing doit avoir une connaissance précise du niveau des stocks des dépôts et des activités de la raffinerie afin

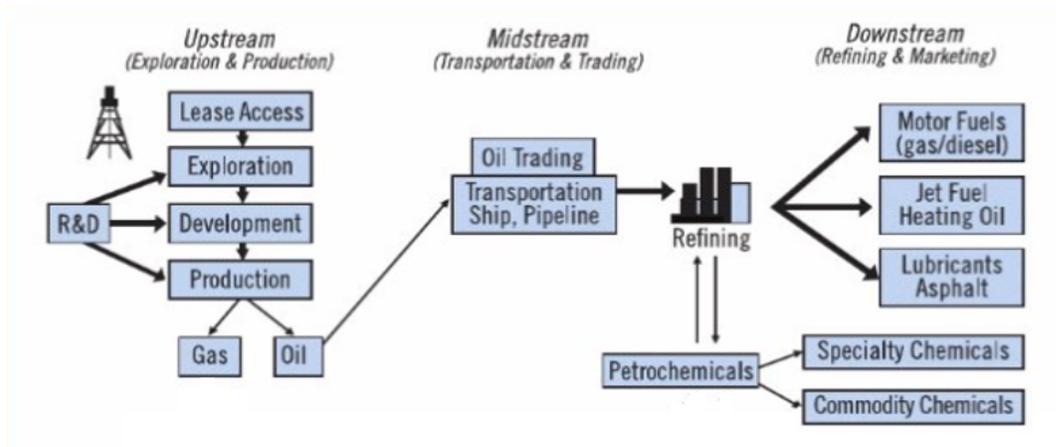


Figure 2.5 – Chaîne des activités globale de pétrole (2)

de gérer la commercialisation.

La figure 2.5 englobe les majors activités dans chaque secteur de chaîne d'approvisionnement pétrolière.

2.4 Transport dans CCP

Dans la logistique de CPP, le problème du transport s'apparaît dès que l'extraction de pétrole brut jusqu'aux raffineries puis vers les centres de stockage et de distribution localisés à des endroits proches des marchés locaux des consommateurs (c.à.d jusqu'à la livraison aux consommateurs finaux). Parmi l'une de plus importante caractéristique de CPP est que les zones de gisements de pétrole, de productions, de raffinage et de consommations sont situées dans des régions assez éloignées entre eux, ce qui rend, le transport une étape cruciale dans le bon fonctionnement de processus de CPP pour assurer la satisfaction des clients finaux en matière de temps et de qualité.

La liaison entre les différents secteurs de la chaîne, aussi les différents éléments de chaque segment et un point vital nécessitent une infrastructure

de transport adaptable avec la caractéristique des produits transportés et le type de distance parcourue. D'autre part, l'augmentation des demandes du marché national et international de pétrole a poussé les compagnies pétrolières à améliorer et utiliser les moyens du transport moderne pour faciliter la distribution des produits dans le cadre de répondre aux exigences du marché énergétique. Dans ce contexte, on peut conclure que le transport est donc nécessaire pour assurer le flux continu et abordable d'approvisionnement pétrole et ses dérivées sur lequel nous comptons tous pour alimenter nos voitures, nos maisons et améliorer la qualité de notre vie.

2.4.1 Différents modes du transport dans CPP

- i) **Camion citerne** : il représente un moyen rationnel, rentable et flexible de livrer les carburants des centres de stockage vers les stations-service, peut être aussi utilisé pour transporter du pétrole brut des champs pétrolières aux raffineries lorsque aucun autre moyen de transport n'est disponible. Parfois la citerne de camion est divisée, ce qui permet de transporter plusieurs produits en même temps. Le major inconvénient de ce mode de transport de pétrole est le plus limité en matière de capacité de stockage, ce qui en même temps représente un point positif où il y a peu de pertes en cas de fuites de produits. La capacité typique de citerne d'essence varie entre 15 et 35 m³.

- ii) **Pipelines** : le transport par pipeline ou on dit canalisation c'est un système industriel qui comprend principalement des gros tubes de diamètre variant de 42" à 66 " , des vannes, des stations de pompage et de compressions. Les pipelines utilisés dans la chaîne d'approvisionnement pétrolier s'appellent les oléoducs ou gazoducs pour le gaz. Géographiquement, politiquement et économiquement le pipeline est le mode du transport le plus préférable dans le transport terrestre.

Les caractéristiques principales d'une canalisation sont



Figure 2.6 – Type de mode de pose de pipeline

- Diamètre,
 - Le type d'acier utilisé,
 - Capacité maximale de transport,
 - La pression de service,
 - L'épaisseur,
 - Le mode de pose (aérien ou souterrain) voir figure 2.6.
- (a) **Utilisation et fonctionnement de pipeline dans CPP** : au sein de CPP, l'acheminement de pétrole brut des zones des productions vers les raffineries ensuite la distribution des produits pétroliers raffinés vers les centres de stockage localisés proche des marchés locaux de consommateurs, est assuré principalement par les pipelines. Il permet de transporter des grandes quantités sur une longue distance telle que les gasoils, les essences, kérosène, sans plomb, les fiouls domestiques, le pétrole liquéfié,..etc. La circulation de pétrole à l'intérieur de canalisation est fait à l'aide d'une station de pompage, son rôle est de comprimer les produits pétroliers et de l'élever à une certaine pression qui peut s'atteindre près de 70 bars. Le frottement de pétrole avec les parois de pipeline démunie cette pression, pour ça chaque 60 à 100 km une station de pompage est située en surface pour maintenir la pression. Le nombre et la puissance de station dépendent de propriétés chimiques des produits pétroliers

transportés tel que la densité, la viscosité et la température d'écoulement, ainsi que topographique géographique de terrain où se trouve le pipeline.

Selon la fonctionnalité économique de canalisation, on peut sélectionner deux grands types de réseaux de pipelines :

1) Les réseaux de pipeline dans les grands pays producteurs & consommateurs (exemple des États-Unis et de l'ex-U.R.S.S). La fonction principale de ces réseaux est de relier les gisements de pétrole aux raffineries.

2) Les réseaux de pipelines dans les grands pays producteurs & exportateurs sa mission est de transporter le pétrole brut de champs de gisements jusqu'aux terminaux de chargement (navires pétroliers). Le plus connu pays dans cet axe est Alaska, l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient.

Le pipeline Druzhba, qui traverse huit pays : la Russie, l'Ukraine, la Pologne, l'Allemagne, la République tchèque, la Hongrie et la Slovaquie, est le plus long pipeline du monde (5 327 km). Il sert à transporter le pétrole brut.

En ce qui concerne la canalisation des transports des produits pétroliers le plus long est installé aux États-Unis (5327 km), reliant Bâton-Rouge à Greensboro.

Au moyen-orient, il existe un réseau de canalisations de débit le plus important au monde qu'est peut s'atteindre 120 mt/an tel que le réseau de pipeline de Suez-Méditerranée (Sumed).

- (b) **Avantage de transport par pipeline** : Les compagnies pétrolières préfèrent de transporter leurs produits par pipelines pour plusieurs raisons parmi eux :

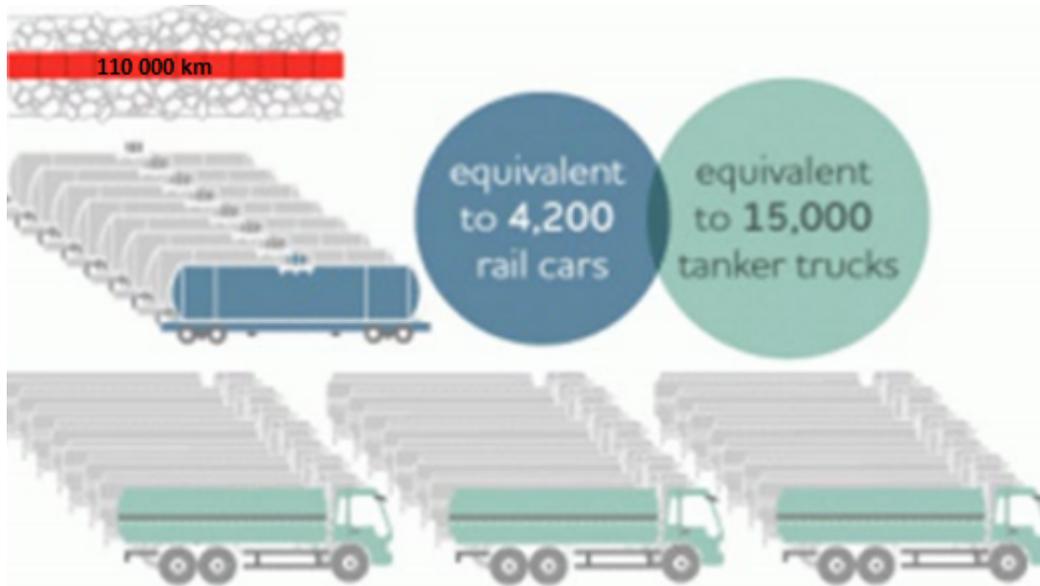


Figure 2.7 – Exemple de comparaison de mode de transport des carburants

- En matière de coût, le pipeline est le mode de transport le moins coûteux dans le transport des grandes quantités en moyenne et longue distance (tableau 2.2). En réseau de canalisation, la consommation d'énergie est limitée à celle de mouvement des produits transportés où les produits circulaient sans besoin des conducteurs, wagon ou des camions. L'acheminement de produits est contrôlé automatiquement et ne nécessite pas d'opération de manutention. Un pipeline de longueur de 110000km est équivalent presque de 15000 camions-citernes ou 4200 wagons (CEPA, 2016, voir la figure 2.7). Cette dernière avantage de capacité de pipeline, ils nous aide à éviter une consommation excessive de carburants.
- Il assure un moyen d'approvisionnement direct entre les zones de production et de raffinage ensuite de raffineries vers les villes des consommateurs. Selon (32) les clients de pétrole brut et

| mode | coût (10tonne*100km) |
|--------------------|----------------------|
| pipeline | [1.8,2.1] |
| train (2000 tonne) | 2.7 |
| camion (38 tonne) | 4.1 |

Table 2.2 – Exemple de coûts de transport des carburants

des produits pétroliers finis reçoivent leurs demandes transportées par pipeline par un pourcentage de 99.99%. Il permet de travail *7jr/24h* dans les quatre saisons. Les tubes de canalisation sont enterrés et la distance entre les stations de pompage est de plusieurs dizaines de kilomètres, ce que diminuaient les risques routiers, rend le fonctionnement de pipeline silencieux et fiable.

— En matière de sécurité humanitaire et environnementale, les risques générés par pipeline sont extrêmement faibles. Il ne dégage pas de carbones qui influent négativement sur la qualité d'air. De plus, les canalisations traversent des zones moins peuplées, ce qui rend les conséquences des accidents beaucoup moins catastrophiques pour les zones touchées. Fréquemment, le pipeline est inspecté et contrôlé afin de détecter les fuites et défaillance métallurgique.

(c) **Surveillance et Contrôle de pipeline** : au niveau de construction de réseaux de pipeline, une haute technologie de matériaux est utilisée, des tubes en acier recouverts de matériaux goudronneux, pour éviter la corrosion et parfois emballer d'une couche de plastique ou de laine minérale.

Des méthodes et des techniques avancées sont toutes regroupées afin de bien surveiller les opérations et infrastructures le long du réseau de pipeline. Les contrôles à distance par des salles de com-

mandes et de terrain sont les modes utilisés pour la surveillance de pipeline.

Salle de commande

Le système de transport par canalisation possède une salle de commande centrale permet de surveiller et contrôler les stations de pompage, les vannes, le mouvement de fluide, etc. Un ensemble de capteurs sont placés le long de canalisation telle que les télédéTECTEURS, sa mission est de détecter la variation de débit, pression et température. Parfois, imageurs hyperspectraux qui ont des vidéos caméras de surveillance, comprennent des capteurs hydrocarbures et des capteurs de température capables de détecter les fuites. Un système d'acquisition et de contrôle des données comme SCADA est installé dans la salle de commandes.

Inspections depuis l'intérieur de canalisation

Le but de cette surveillance est de mesurer l'épaisseur de tube afin de détecter les pertes de métal. Généralement, racleurs intelligents sont l'outil d'inspection interne chargé de cette mission. Elles se déplacent à l'intérieur de pipeline et baillaient les parois à une vitesse de trois mètres par seconde, ce qui permet de détecter les corrosions de matériaux ou petites fissures.

Nettoyage de pipeline

L'une des activités qui permet d'augmenter la durée de vie et la fiabilité de pipeline est le nettoyage de pipeline, un pipeline propre facilite la circulation de fluide et réserve sa qualité par l'élimination des traces cumulatives de sable, d'eau et des produits. En plus, le nettoyage permet d'empêcher la corrosion. Un racleur intelligent équipé de large brosse métallique tournante est l'outil chargé de

faire le nettoyage interne de pipeline. Des inhibiteurs de corrosion peuvent aussi utiliser durant ce processus afin d'offrir une protection supplémentaire.

- (d) **Navires pétrolières** : Les navires pétrolières (en anglais 'oil tankers' ou 'supertankers') sont des moyennes de transport maritime international des grands volumes de pétrole. Le type de produit transporter (pétrole brut ou fini) et la capacité de navire pétrolier sont les principaux facteurs qui détermine le nom de navire. La figure 2.8 contient les différents navires de pétrole. En 2013, 30 % du tonnage marine marchande en mondiale est des produits pétroliers.

Transport par voie maritime assure principalement une liaison entre les pays exportateurs de pétrole brut et et différents consommateurs dans le monde pour le traiter dans leurs raffineries. Dès qu'il n'y a pas des possibilités d'installer de réseau de pipeline dû à localisation géographique ou politique, ce mode est utilisé. En point de vue de sécurité environnementale et d'approvisionnement, il est moins faible. Les risques nautiques, chavirage, collision, Les déformations des citernes, L'explosion, La piraterie et les conditions météorologiques mener à ne pas livrer au bon moment. D'autre part, les capacités des navires pétroliers sont assez élevées. Les déversements de pétrole se répandent largement dans les écosystèmes marins et il plus catastrophique que dans environnement terrestre. Dans ces situations, les compagnies pétrolières paient des amendes et des frais d'enlèvement et de nettoyage du pétrole.

Les passages stratégiques d'approvisionnement de pétrole par voie maritime

- En Afrique le détroit de Bab El-Mandeb qui associe la mer Rouge au golfe d'Aden et le canal de Suez.



Figure 2.8 – Les types des navires de pétrole

- En Amérique : le canal de Panama.
- Au Moyen-Orient et en Asie : le détroit d'Ormuz dans le golfe Persique, représente un point noir de trafic de pétrole au monde. Le détroit de Malacca entre Singapour et l'Indonésie alimente les pays de l'Asie : Chine, Corée du Sud, Japon et Inde.
- En Europe : le détroit du Bosphore entre la mer Noire et la Méditerranée qui est utilisée pour transporter le pétrole originaire de la mer Caspienne ou de Russie.

La figure 2.9 montre les points stratégiques de transit des navires pétroliers dans le monde.

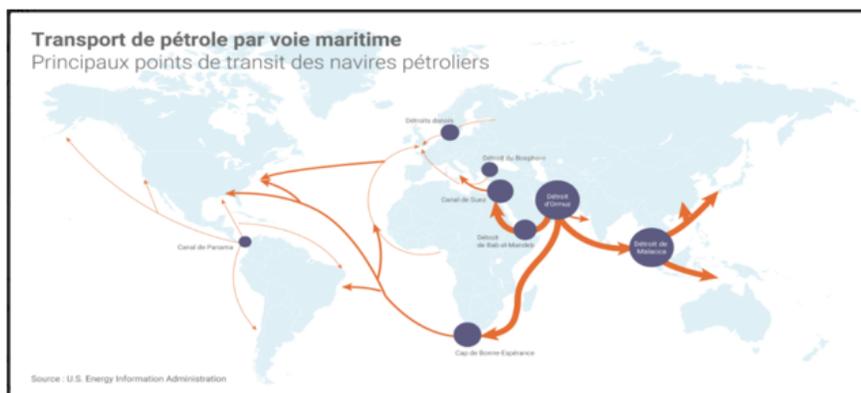


Figure 2.9 – Points stratégiques de transit des navires pétroliers dans le monde

2.4.2 Transport par pipeline multi-produit

Définition et fonctionnement de pipeline multi-produit

Le besoin croissant des consommateurs des produits pétroliers a poussé les compagnies pétrolières à trouver des techniques telles que l'utilisation de transport multi-produit par pipeline qui permet d'atteindre mieux les demandes clients. Principalement, ce système est trouvé dans la partie en aval de la chaîne d'approvisionnement pétrolière entre les raffineries et les centres de stockage et distribution, il permet de transporter dans la même ligne différentes familles et qualités d'hydrocarbures exemple essences, gasoil, carburacteur, fioul domestique, naphta.

La technique de batching est utilisée pour injecter différents lots de produits séquentiellement dans un ordre bien défini de la raffinerie vers plusieurs centres localisés le long du pipeline. Cette technique permet d'améliorer la flexibilité et optimiser l'exploitation de pipeline. Les opérations d'injection et réception font simultanément tout en maintenant le pipeline est toujours pleine.

L'ajout de l'option multi-produit dans le transport des hydrocarbures par pipelines permet de servir différents clients dans différents endroits en même temps, réduisant ainsi le coût du transport individuel pour chaque produit et

assurant la satisfaction des clients au bon moment.

Gestion des interfaces

Les batches des différents produits sont circulés dans le pipeline sans aucune séparation physique, qui conduit à un certain mélange entre les limites de chaque deux lots consécutifs. Interface /contaminât sont les noms les plus populaire de ces zones de mélange.

La structure physique de pipeline, le débit d'injection des batches, la distance parcourue, la topographie et les types de produits adjacents sont les principaux paramètres qui affectent le volume d'interface. La bonne localisation des produits dans les batches de séquence de pompage permet de diminuer le volume d'interface et éviter la pire dégradation de qualité des produits.

Généralement dans le système de pipeline, les contaminâtes sont réceptionnés uniquement par le dernier dépôt où il y a des réservoirs spéciaux pour le stocker. Les mélanges compatibles qui résultent entre les mêmes types des produits, qualités différentes. Ces derniers sont injectés dans l'un des réservoirs de produits purs près de lui en termes de caractéristiques chimiques. Lorsque l'injection est impossible, les interfaces sont retournées aux raffineries pour le retraité dans un processus spéciales.

Structure de réseau pipeline multi-produit

La forme de pipeline, direction de flux d'acheminement des produits, le nombre des raffineries et dépôts sont les éléments qui déterminent la structure de système, on peut le regrouper en deux groupes.

1.Multi-produit pipelines droits unidirectionnels et bi-directionnels :

Dans ce système, il y a un seul pipeline droit relie une ou plusieurs raffi-

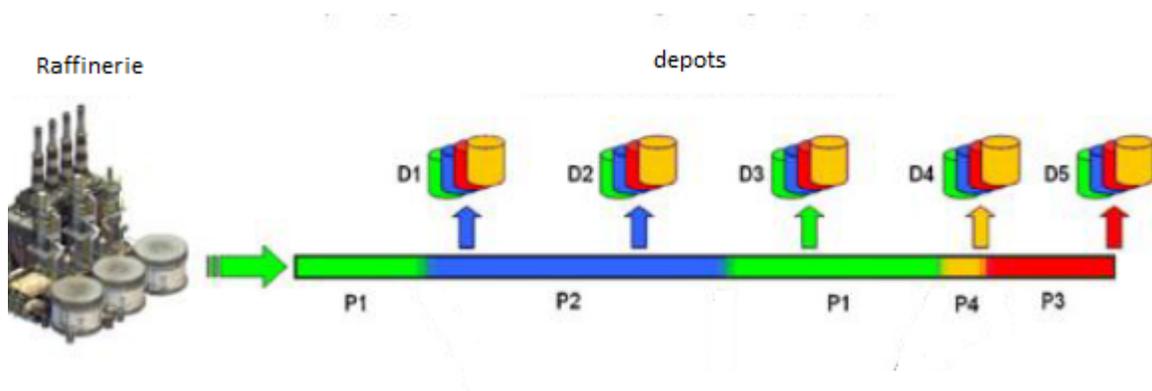


Figure 2.10 – Exemple d'un pipeline droit unidirectionnel

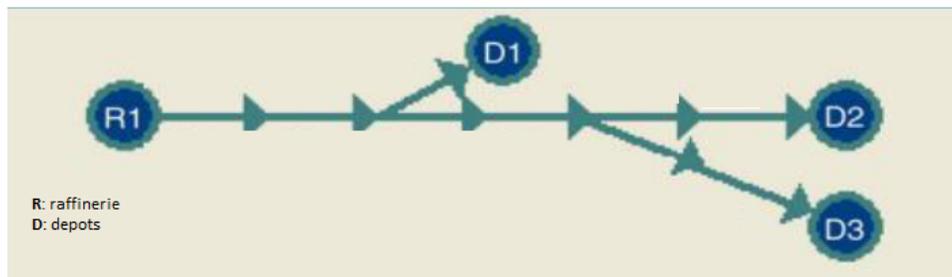


Figure 2.11 – Exemple d'un réseau de pipelines

neries à des dépôts (voire figure [2.10](#)). Les produits circulent à l'intérieur de pipeline dans un seul sens de gauche à droite s'appelant des pipelines unidirectionnels. Si le flux des produits est en deux sens (raffinerie- dépôts- raffinerie) on dit un système de pipeline bi-directionnel ou le dépôt peut à la fois recevoir et envoyer vers et depuis le pipeline.

2. Réseau de pipeline multi-produit

Le système contient plus d'un pipeline où ils prendra la forme d'un arbre, dans chaque branche qui s'appelle segment se localise un dépôt de réception et parfois une source d'injection (figure [2.11](#)).

2.5 Gestion de chaîne d'approvisionnement pétrolière

2.5.1 SCM dans l'industrie pétrolière

Le problème de la gestion de la chaîne d'approvisionnement est très populaire, essentiellement dans l'industrie pétrolière. Le challenge de SCM dans la chaîne d'approvisionnement pétrolière est de résoudre de nombreux défis causés par la nature de la chaîne, tels que les caractéristiques inflexibles, la complexité, les longs délais, les capacités limitées des ressources aux différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement (10). D'autre part, la croissance continue de la demande de marché énergétique, l'assouplissement des barrières commerciales et le développement technologique de l'industrie pétrolière ont créé une forte concurrence entre les compagnies pétrolières (11; 12; 13). (14) confirme que le bon management de la chaîne d'approvisionnement est une capacité vitale des entreprises à obtenir des avantages concurrentiels.

(33) définissent le SCM comme un réseau ou une chaîne d'installations et techniques de transport et de distribution qui exécutent le processus d'obtention de produits, de la matière première aux produits finis et le transport puis la distribution des produits finis aux clients.

En point de vue de (34), le SCM est un ensemble d'approches pour intégrer intelligemment les entités afin de manager toutes les activités impliquées dans l'exécution des commandes dans les bonnes quantités, aux bons endroits et à temps au minimum coûts, tout en respectant les contraintes de fonctionnement de chaque service de chaîne d'approvisionnement.

(35) mentionne que la gestion de la chaîne d'approvisionnement se concentre sur la planification et l'examen du réseau au sein de la chaîne d'approvisionnement afin d'économiser les coûts et fournir un meilleur service client.

Selon (9), la gestion de la chaîne d'approvisionnement dans une industrie pétrolière est la configuration, la coordination et l'amélioration continue des opérations organisées séquentiellement impliquées en amont (upstream), à mi-chemin (midstream) et en aval (downstream) secteurs.

2.5.2 Nécessité de SCM dans industrie pétrolière

L'objectif principal de la gestion de la chaîne d'approvisionnement dans les entreprises qui visent à la fin de la chaîne pour distribuer des produits aux clients est de fournir un meilleur service client au coût le plus bas possible. Dans l'article de (9) l'auteur écrit que l'efficacité et la rentabilité des pratiques de chaîne d'approvisionnement dans l'industrie pétrolière représentent des facteurs importants pour maintenir un approvisionnement continu en pétrole brut, la réduction des délais et des coûts de transport. On peut conclure que la mise en œuvre de la gestion de la chaîne d'approvisionnement dans l'industrie pétrolière peut aider à réduire les coûts, à augmenter les bénéfices de l'entreprise dans la gestion de l'approvisionnement et à gérer la planification des transport et livraisons.

Werner Paratorius, président de la division pétrochimie de BASF a dit : " Management de la chaîne d'approvisionnement est la colonne vertébrale d'une entreprise où les coûts logistiques peuvent être supérieurs aux coûts de production."

La logistique est utilisée pour désigner la science de la planification des transports, sa gestion et son contrôle, il comprend également le stockage dans les dépôts et tous les types d'opérations immatérielles et matérielles qui ont lieu avant la livraison de bien aux points souhaités. Au sein de chaînes d'approvisionnement diverses opérations logistiques liées à la gestion de l'entrepôt, des stocks, du transport, du personnel sont réalisées. En effet, la logistique est nécessaire pour gérer efficacement les différents flux des matières. Dans la gestion de chaîne d'approvisionnement, les facteurs clés qui permet de mi-

minimiser les coûts sont :

- Gestion de la demande,
- Planification et ordonnancement des transports des produits pétroliers,
- Distribution efficace des produits pétroliers entre les clients,
- Gestion des centres de stockage,
- Utilisation des techniques d'optimisation,
- Automatisation de SMP.

2.5.3 Optimisation de chaîne d'approvisionnement pétrolière

(15) déclare que l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement est essentiellement une pratique dans laquelle les ressources sont utilisées intelligemment pour répondre aux demandes des clients, tout en tenant compte des contraintes et des limites de l'utilisation et du flux de ces ressources à travers le réseau d'entreprises.

(36) définissent l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement pétrolière comme la mise en œuvre et l'application des modèles d'optimisation afin de gérer la chaîne d'approvisionnement et les réseaux des pipelines ou des membres du canal de la chaîne d'approvisionnement.

L'optimisation de la chaîne d'approvisionnement en pétrole est en ligne comme un élément stratégique de la chaîne d'approvisionnement qui vise à réduire considérablement leurs coûts, d'améliorer leurs performances, la satisfaction de leurs clients finaux et de prendre les bonnes décisions aux bons moments.

(37) affirme que l'optimisation est aussi une opportunité de création de valeurs pour les compagnies pétrolières ainsi que pour l'obtention d'un avantage concurrentiel. Dans ce contexte, trouver des options pour l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement du pétrole est importante en termes d'économie des coûts. C'est ce qui place l'optimisation au centre de l'attention dans la chaîne d'approvisionnement pétrolière.

(15) ont mentionné dans leur article que malgré l'importance économique et la complexité de la gestion de la chaîne d'approvisionnement dans l'industrie pétrolière, l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement du pétrole est encore au début de son développement.

2.6 Optimisations dans la chaîne d'approvisionnement en aval

La gestion de la chaîne d'approvisionnement en aval est un composant essentiel au succès d'une entreprise, elle se concentre sur les processus et les systèmes liés aux planifications, aux modes de transport, à la logistique et à l'ordonnancement de distribution des produits pétroliers raffinés. L'optimisation de cette chaîne permet d'augmenter la satisfaction des clients finaux de CPP avec un moindre coût d'exploitation. L'un des moyens utilisés pour s'adapter à ces besoins est l'automatisation et la numérotation des systèmes de transport et de distribution de la chaîne d'approvisionnement.

2.6.1 Composants d'optimisation en DSC

L'optimisation du système de transport et de distribution de pétrole raffiné est liée à plusieurs composants qui fonctionnent de manière cohérente pour garantir que le bon produit est livré au bon moment. Ces composants comprennent :

- **Logistique** : La logistique de transport est une tâche complexe qui comprend non seulement la nécessité de regrouper les commandes et de maximiser le retour sur les dépenses de transport mais vous devez également prévoir la demande et les volumes d'expédition pour planifier efficacement le transport du produit.
- **Transport** : Le transport des produits énergétiques tel que les produits raffinés qui circulent de la raffinerie aux plusieurs dépôts localisés à différents endroits représente un point vital où 80% de coût d'exploitation

est relié au coût de transport. C'est pourquoi il est essentiel de s'assurer que le système de transport fonctionne efficacement.

- **Gestion d'entrepôt et d'inventaire** : La gestion des entrepôts implique le traitement de tous les mouvements de flux des produits entrants et sortants des centres de stockage et distribution et management de leurs réservoirs de stocks. En outre, la gestion d'inventaire consiste à déterminer l'emplacement du stock, le stock commandé, reçu et réservé ainsi que le contrôle qualité.
- **Développement** : Les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement en aval sont chargés de planifier, de prévoir et de s'assurer que les produits/stocks sont expédiés et transportés à temps. Ils doivent avoir les compétences et les outils nécessaires pour gérer efficacement ces activités. La bonne coopération de ces derniers permet d'optimiser la distribution, le transport et la livraison des produits. C'est pourquoi il est important de développer la chaîne d'approvisionnement ou l'utilisation de techniques d'optimisation permettant de créer une visibilité totale sur les opérations de chaîne d'approvisionnement. Cette visibilité aide les opportunités d'amélioration, d'atténuer les risques et d'augmenter la productivité.

2.6.2 Les avantages d'optimisation de DSC

D'après ce qui a été mentionné, on peut noter l'importance de l'inclusion d'optimisation dans DSC, elle assure que tous les systèmes de management liés aux transports, à la logistique, aux gestions des entrepôts et d'inventaire fonctionnent efficacement. De plus, de nombreux avantages peuvent être obtenus, parmi lesquels les suivants

Réduction des coûts et amélioration de la rentabilité

L'optimisation de la chaîne d'approvisionnement permet d'identifier les opportunités d'économies et de traiter de manière proactive les problèmes coûteux qui peuvent survenir, ce qui a un impact sur la rentabilité.

Meilleure efficacité et flexibilité

Lorsque tous les composants de la chaîne d'approvisionnement en aval sont connectés et fonctionnent comme ils le devraient, les planificateurs seront capables de traiter et distribuer les commandes, améliorer la flexibilité et répondre en délais aux exigences des clients.

Meilleure visibilité et contrôle

Une visibilité globale et un strict contrôle permettent de détecter si un problème survient dans un composant, évaluer le problème de manière préventive, gérer ce composant et chacun des autres composants afin qu'ils ne soient pas affectés négativement le fonctionnement du système.

Continuation en marché

Le client est le roi dans toutes les compagnies, la satisfaction du client et la prestation de services sont les points vitaux du succès d'une entreprise, l'implémentation d'optimisation aide de satisfaire les exigences des clients, assurent la concurrence et la continuation des entreprises pétrolières en marché.

2.6.3 Activités d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement pétrolières en aval

La planification, l'ordonnancement, exécution, le contrôle et l'ajustement sont les activités-clés qui peuvent servir de colonne vertébrale pour améliorer la chaîne d'approvisionnement pétrolière en aval.

Planification

Selon (38), la planification peut être définie comme "l'acte de pré-penser ou de prendre des décisions sur ce que vous devriez ou devriez accomplir". L'objectif de la planification consiste à décider à l'avance ce qui doit être fait, quand, comment et par qui cela doit être fait et comment les résultats doivent

être évalués. De plus, (39) a mentionné que la planification est importante car elle offre aux planificateurs une procédure pour prendre des décisions fondées sur des connaissances et des informations qu'a un influence à long terme, permettent d'économiser du temps et de l'argent.

Ordonnements

Dès que les directeurs approuvés le plan de planification les activités d'ordonnement intervient pour gérer les activités opérationnelles. Le terme ordonnancement fait référence à l'allocation de ressources dans une période de temps spécifique pour exécuter ou effectuer certaines tâches ou opérations.

Exécution

L'exécution de la chaîne d'approvisionnement présente deux avantages principaux : elle garantit que les opérations au sein de la chaîne d'approvisionnement sont organisées conformément aux plans, et il également assure que les plans de planification et ordonnancement sont réalisables.

Suivie

Le suivi concerne essentiellement la mesure des performances, pour ça (37) a souligné que les objectifs doivent être déterminés et qu'ils doivent être mesurables au début d'optimisation. Cette activité permet de voir si l'optimisation est réussie lorsque les experts analysent le résultat et que le plan obtenu atteint le retour sur investissement attendu.

Ajustement

Ré-planification / Ré-ordonnement sont fortement liés aux surveillances. Les besoins des clients sont de plus en plus variés, les entreprises doivent ajuster rapidement leurs chaînes d'approvisionnement pour répondre aux exigences des clients, aux conditions non programmé. cette activité permet d'assurée une concurrentielle plus durable.

2.7 Conclusion et l'importance d'étudier les problèmes de SMPS

L'industrie pétrolière est un secteur très complexe, la chaîne d'approvisionnement représente l'élément critique de cette industrie. L'implémentation des méthodes et des outils d'optimisation permet d'améliorer le CPP et d'assurer la satisfaction de leurs clients finaux en termes de qualité et temps de livraison aux minimum coûts.

Dans cette thèse, nous avons concentré sur l'optimisation de chaîne d'approvisionnement en aval puisqu'elle se présente un plus grand potentiel d'amélioration, de la flexibilité et de réduction des coûts (11; 15; 16). La fonction principale de DSC est de transporter et de distribuer des produits raffinés aux différents dépôts localiser proche des consommateurs. Le coût final de produit dépend de son coût de transport, faisant de l'optimisation du système du transport un problème d'une extrême pertinence.

Les compagnies pétrolières préfèrent de transporter leurs produits par pipeline grâce à son efficacité de transporter des grandes quantités aux moyennes et à longue distance d'une manière continue où les conditions météorologiques et les problèmes de trafics n'affectent pas leur fonctionnement. De plus, dans ce système seulement les produits déplacés sans besoin des maintenances des transports tel que les conteneurs et les conducteurs ce que rendre le coût d'exploitation de pipeline minimal. En outre, en terme environnemental le pipeline est le mode le moins dégagent de CO_2 et le plus sécurisé. La spécification de pipeline utilisant permet de transporter plusieurs produits aux mêmes lignes et servir différent clients dans des différents endroits au même temps. Dans ce contexte, le transport est une activité-clé de CPP et l'utilisation efficace de ces ressources peut contribuer de manière significative à réduire les coûts opérationnels dans un marché qu'il se caractérise par une concurrence et un scénario de demande croissante.

Au niveau des compagnies pétrolières, la plupart des opérations de plani-

fication et d'ordonnement du système de pipeline sont décidées par les responsables des opérations sur la base de leurs expériences, archive, et sur la base de calculs ad hoc. Par conséquent, l'optimalité des plans obtenus n'est pas assurée ce qui peut conduire à des coûts d'exploitation beaucoup plus élevés (22; 23). Cela motive les chercheurs à développer des techniques d'optimisation et des outils de calcul permettant d'améliorer le processus et de bien gérer les ressources qui conduisent à une augmentation du profit.

En outre, les problèmes d'ordonnement du pipeline multi-produit sont classés parmi les trois problèmes d'ordonnement qu'ont reçus une attention particulière des chercheurs au cours des deux dernières décennies. Ils sont classés en troisième position après l'ordonnement à court terme des problèmes de traitements par lots et le problème de tournée de véhicules (24). Le SMPS est un problème de recherche opérationnelle complexe et dans de nombreux cas, il a peu de solutions possibles. L'utilisation d'outils d'optimisation est cruciale puisque ceux-ci peuvent fournir des procédures systématiques pour obtenir des solutions réalisables de haute qualité. Tout ça, nous a motivé à étudier ce problème qui a un grand impact aux niveaux national et international afin de présenter des outils d'aide de décision à base des techniques d'optimisation pour présenter des plans d'ordonnements optimaux et réalisables au niveau des compagnies pétrolières.

3 Etat de l'art

3.1 Introduction

Ce chapitre couvre à la fois les techniques générales d'ordonnancement de transport par pipeline multi-produit et les travaux existants. on peut diviser le processus de résolution des problèmes d'ordonnancement en trois étapes principales qui sont :

- Définition de contexte de problème étudié : représenté par des questions métier qui consistent à définir les décisions, objectifs, conditions et limites.
- présentation du problème dans un cadre d'optimisation qui capture les questions métier.
- Sélection des solutions techniques et d'algorithmes pour résoudre les problèmes d'optimisation.

En raison de la complexité des problèmes d'ordonnancement de transport par pipeline multi-produit, il est considéré comme un problème de NP-complet (1). Tailles et complexité des réseaux pipelines, capacité limitée des réservoirs des stockages, les conditions d'injection au niveau des sources(raffineries), des réceptions des dépôts et de fonctionnement de pipeline, les interfaces et leurs influence sur la localisation des produits dans les batches circulent dans le pipeline qui détermine les séquences autorisées et non autorisées, longueur de l'horizon d'ordonnancement, existence de plusieurs dates de livraison aux différentes clientes dans des endroits différents sont des contraintes qui rendre le problème d'ordonnancement difficile à résoudre.

Section 3.2 couvre les caractéristiques qui distinguent les problèmes de SMPS et les solutions techniques utilisées pour résoudre les problèmes de SMPS.

Section 3.3 présente une revue de la littérature relative au problème d'ordonnement de transport des produits raffinés via des systèmes des canalisations multi-produit. Les principaux points tirés de l'analyse des travaux publiés dans la littérature sont donnés dans la section 3.4 . Section 3.5 est réservée au conclusion.

3.2 problème d'ordonnement de transport multi-produit par pipeline(SMPSP)

Selon la littérature, les caractéristiques les plus importantes du problème SMPS sont :

3.2.1 Structures des systèmes des pipelines

L'une des premiers choses à sélectionner dans les problèmes des SMPS est la structure physique du système étudié qui a une grande influence sur les choix des autres caractéristiques telles que la complexité du problème et la structure du modèle choisit pour la modélisation de SMPS. Il existe des nombreux types de structure des systèmes des pipelines où la forme de pipeline est un déterminant majeur de type de structure du système. Il peut être arrangé comme suit :

- Structure de pipeline droit : Un seul pipeline droit qui relie un ensemble des centres à une seule source (40; 41) ou bien à multiple sources (42). D'autre part, il 'y a aussi la possibilité que les centres intermédiaires sont capables à la fois d'injecter des produits dans le pipeline et de recevoir du produit (43).
- Structure de pipeline arborescent : Le multi-batches des produits sont circulés dans des pipelines qui prennent la forme d'un arbre (44; 45). Cette structure comprend une seule raffinerie localisée au racine de l'arbre et à la fin de chaque branche de l'arbre il y'a un dépôt.
- Structure de réseau de pipelines : cette structure est plus complexe que pipeline arborescent où elle contient plusieurs sources d'injection le long

du réseau (46).

3.2.2 Cadre d'optimisation

(A) Type de modélisation

1. Programmation Mathématique

La programmation mathématique (PM) est l'un des axes fondamentaux de la recherche opérationnelle. Elle est l'une des techniques les plus importantes disponibles pour la prise de décision quantitative. En plus, la programmation mathématique représente un outil théorique des sciences de management et de l'économie dans lequel les opérations de management sont décrites par un modèle mathématique qui décrit le problème d'intérêt.

Généralement, PM est une description mathématique d'un problème d'optimisation. Il se compose d'un ensemble des équations d'égalité /inégalités appelées contraintes et un critère à optimiser est établi telle que le coût, le temps et le profit ce qu'on appelle une fonction objectif. Les variables de décisions continues et binaires sont utilisées pour représenter les inconnues de problème où les contraintes sont responsables à déterminer les relations entre ces variables et indiquant ce qui est autorisé en terme de limite d'espace de recherche. La fonction objectif indique ce qui est le mieux en termes de variables.

Le challenge de MP est l'identification des variables, contraintes pertinentes et l'homogénéité entre les contraintes et la fonction objectif, ce qui nécessite des compétences, un bagage mathématique et un certain entraînement. Le schéma descriptif de processus principal de fonctionnement de MP est présenté dans la figure 3.1 où le bon fonctionnement de MP est relié au choix de type de modèle MP et par une meilleure coopération du modèle mathématique et l'outil informatique pour présenter une solution optimale.

La question principale de PM est "**Quel est le meilleur ?**" plutôt que "**Et qu'est-ce qui se passerait si ?**" (simulation), "**Qu'est-il arrivé ?**" (sta-

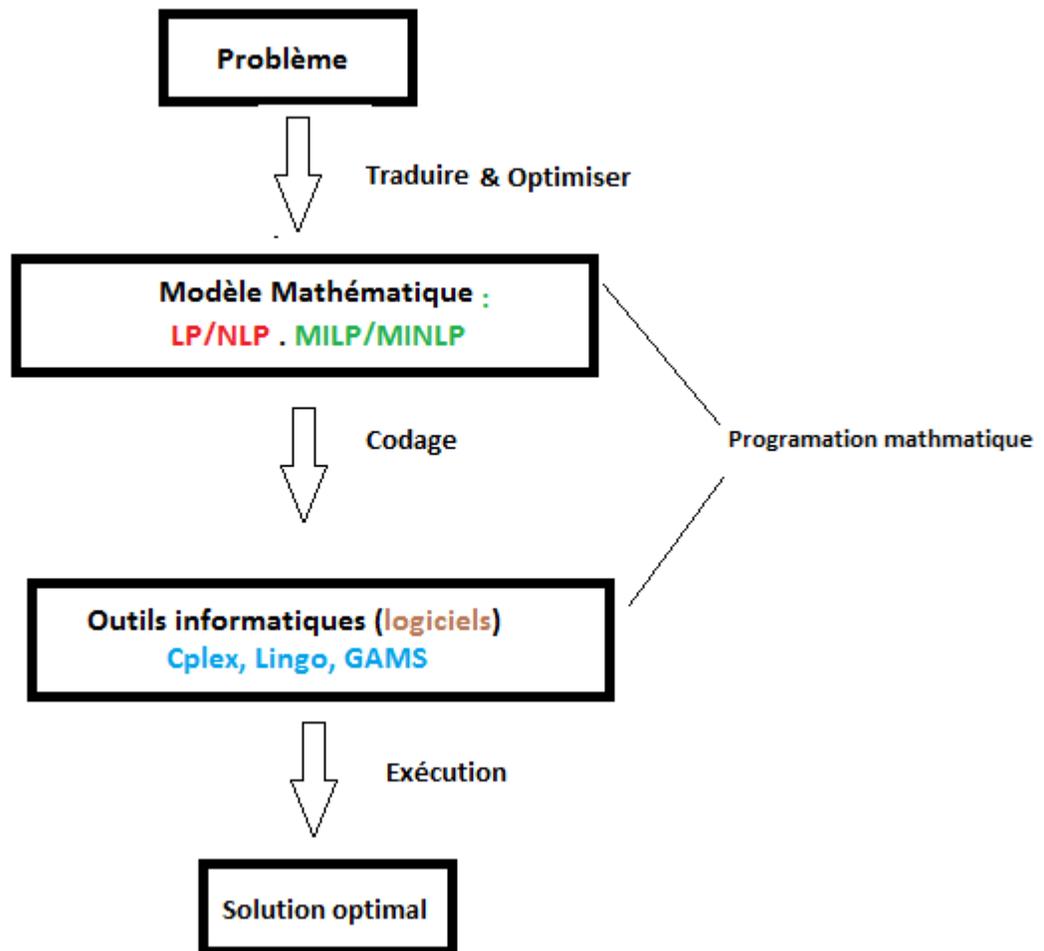


Figure 3.1 – Processus de fonctionnement de PM

tistiques) et "Que va-t-il se passer?" (prévision) (extrait du site de l'Université eudoxus systèmes LTd).

Le PM est utilisé pour résoudre des nombreux problèmes tels que des problèmes de décision, planification, les calendriers de production, ordonnancement des transports, dans la logistique militaire et dans le calcul de la croissance économique. L'exécution de modèle mathématique construit est faite à l'aide d'un logiciel comme **IBM ILOG CPLEX, LINGO, GURBI, GAMS** qui ont basé des algorithmes standards d'optimisation où le choix de logiciel est relié au type de PM.

La formulation de PM est basée sur l'algèbre et peut être classée en conséquence :

- Programmation linéaire (LP) : les équations de modèle d'optimisation sont tous linéaires. L'addition des équations non linéaire à la formulation de LP rend la programmation non linéaire (NLP). De nombreux domaines utilisent cette modélisation pour résoudre les problèmes d'optimisation des cas réels tels que les secteurs de l'alimentation et de l'agriculture, de l'ingénierie, des transports, de la fabrication et de l'énergie. pour rendre leurs processus plus efficaces.
- Programmation linéaire(ou non linéaire) au nombre mixtes (MILP / MINLP) sont couramment utilisés pour l'analyse et l'optimisation des systèmes en raison de leurs puissantes et flexibilité de résoudre des complexes problèmes tels que le problème d'ordonnancement de transport des carburants par pipeline la spécification de cette formulation est que certaines variables de décisions sont contraintes d'être des nombres entiers.

2. Programmation par contraintes (CP)

(47) a défini le CP : est un paradigme de programmation, au début de son apparition, il a été développé pour résoudre les problèmes de faisabilité dans les applications d'intelligence artificielle. Ensuite, il a été utilisé dans

Les problèmes d'optimisation d'ordonnancement(problème de séquençement), problèmes de planification. Il peut aussi résoudre le problèmes d'allocation qui ont une convergence lente par la construction de modèle CP alternative de programmation mathématique (www.ibm.com).

(48) a souligné que le terme de programmation est un élément commun entre le MP et le CP mais ils sont référés à différents types de programmation. La programmation par contraintes fait référence à La programmation informatique et décrit un moyen de le résoudre, alors que la programmation mathématique fait référence à l'élaboration d'un plan.

(B) Représentation de Problème SMPS

La représentation du temps est un axe essentiel dans les problèmes d'ordonnancement du système de transport des carburants par pipeline multi-produit il existe deux types : les représentations en temps discret et en temps continu peuvent être résumées comme suit :

I) Représentation Discret

L'horizon temporel de l'ordonnancement est divisé en certain nombre d'intervalles de durées uniformes ou non uniformes, les batches ne peuvent commencer et se terminer qu'à ces moments-là. La figure 3.2 explique cette représentation. Selon (21) les variables des décisions principales dans cette présentation sont :

$W_{i,j,t} \in 0, 1$: variable binaire : indique si le batch i démarré sur la machine j à l'instant t .

$B_{i,j,t} \geq 0$: représente taille de batch i qui démarre sur machine j à l'instant t .

$S_{s,t} \geq 0$: indique le niveau de stock s à l'instant t .

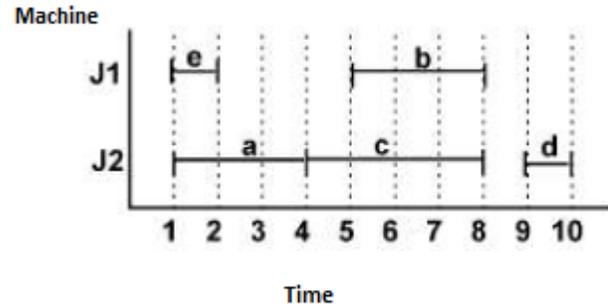


Figure 3.2 – Représentation en temps discret (3)

Le meilleur avantage de cette représentation est sa simplicité car elle utilise des points de référence fixes c'est-à-dire une grille de temps de référence pour toutes les tâches en compétitif pour des ressources partagées (49).

L'inconvénient majeur de cette représentation est que pour l'obtention des résultats précis il faut une grille de temps dense, et puisque le nombre de points dans cette grille est lié au nombre des variables de décisions binaires ce qui augmente le temps d'exécution et rend la résolution très difficile spécialement dans les problèmes de grand taille ce qui réduit l'applicabilité de cette représentation.

II) Représentation Continue

L'idée clé de représentation en temps continue est de permettre aux événements potentiels de se démarrer à n'importe où sur l'horizon temporel (figure 3.3), le modèle d'optimisation détermine les valeurs temporelles de ces points. Une variable de décision supplémentaire est ajoutée dans cette représentation comparant en représentation discrète qui est T_t . Les principales variables de décisions sont

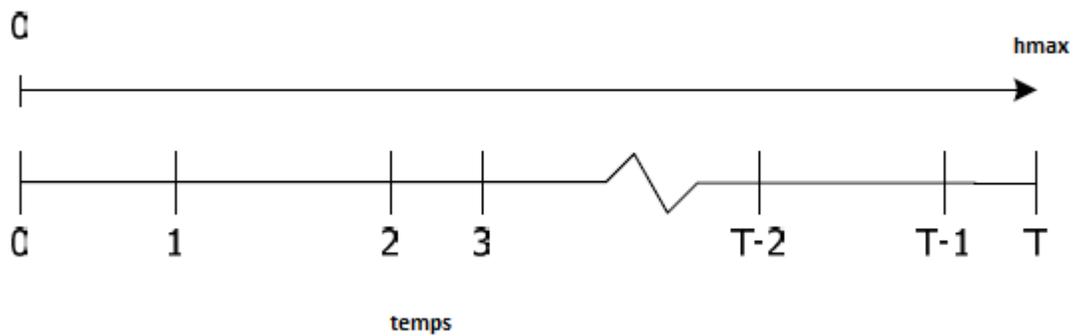


Figure 3.3 – Représentation en temps continue

$W_{i,j,t} \in 0, 1$: variable binaire : indique si le batch i démarrée sur la machine j à l'instant t .

$B_{i,j,t} \geq 0$: représente taille de batch i qui démarre sur machine j à l'instant t .

$S_{s,t} \geq 0$: indique le niveau de stock s à l'instant t .

$T_t \geq T_{t-1} \geq 0$: Valeur temporelle de l'instant t .

(3) affirment que les principaux avantages des représentations en temps continu sont la précision et la taille de représentation de problème. En autre terme, il utilise moins de variables binaires par rapport à la modélisation en temps discret. Par conséquent, cette représentation nécessite un petit nombre des points temporels avec une synchronisation très précise et un temps d'exécution plus rapide. De plus, elle est flexible, le variable de traitement de temps est ajouté facilement dans le modèle de base. Dans les cas d'ordonnancement de pipeline multi-produit, le lecteur remarque que la représentation continue est le plus utilisable puisque elle représente les contraintes de fonctionnement de système de

manière directe et similaire de ce que ce passe en monde réel.

La difficulté de représentation en temps continu est le choix du nombre d'intervalles ayant un impact significatif sur la qualité de la solution. En effet, si le nombre d'intervalles diminue ou augmente, la fonction objectif obtenue sera dégradée en termes de qualité et de durée d'exécution (CPU temps) (3).

3.2.3 Solution Technique

Les techniques d'optimisation ont reçu une attention considérable au cours des dernières années dans les domaines académiques et industriels. Il existe différentes méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement, la sélection de méthodes dépend de taille et la complexité de problème. À notre connaissance, quatre méthodes ont été développées pour le problème SMPS qui est :

(A) Méthode Exacte

La modélisation mathématique à base de programmation linéaire /mixte des problèmes de SMPS est généralement résolue par une méthode exacte telle que "Branch & bound" et "branch & cut". Elles cherchent de trouver une solution optimale par l'utilisation des algorithmes de recherche arborescente et la technique d'énumération partielle de l'espace de solutions. Ils ont mentionné dans son article (50), que le nombre des solutions de formulation MILP augmente de façon exponentielle avec le nombre de variables binaires ce que rend la résolution de problèmes de SMPS très lents et les méthodes exactes ne peuvent pas être évaluées efficacement ces solutions pour les grandes instances. Il existe des logiciels commerciaux tels que IBM ILOG CPLEX où leur solveur est basé sur ces algorithmes exacts.

(B) Méthode de Décomposition

Les méthodes de décompositions sont des techniques d'optimisation qu'aident à résoudre les problèmes volumineux que nous ne pouvons pas résoudre de manière monolithique. L'idée principale est de diviser le problème original en parties plus petites qui sont plus faciles à résoudre. Dans le cas des problèmes de SMPS, les décompositions hiérarchiques et temporelles sont appliquées.

1. La décomposition hiérarchique

Consiste à diviser le modèle original de problème en modèle principal appelé Master problème et sous modèles. Le master problème est une version simplifiée ou agrégée du modèle d'origine. Le sous-modèle est résolu pour obtenir une solution complète. Généralement, le modèle mathématique d'optimisation de SMPS est divisé en deux sous-modèles, le premier consiste à trouver la séquence d'injection et la deuxième responsable à déterminer les séquences de réceptions des dépôts où les solutions de première ont été utilisées comme des entrées pour la deuxième.

2. Décomposition Temporelle

En décomposition temporelle, l'horizon d'étude est divisé en sous-horizon où le problème est résolu de manière récursive. Un algorithme qui dépend d'un horizon roulant est utilisé. Dans chaque itération le problème est exécuté dans un horizon limité, la solution obtenue représente des données pour l'itération suivante et l'horizon est décalé. L'inconvénient majeur de la méthode de décomposition, elle ne garantit pas que la solution trouvée représente la solution optimale, on peut tomber dans une solution voisine de l'optimal.

(C) Méthodes Approchées

Dans certains problèmes d'optimisation les méthodes exactes sont incapables de trouver une solution optimale à cause de la taille ou de la complexité de

problèmes, le développement d'outils d'optimisation a conduit à l'émergence de méthodes approchées telles que les heuristiques et les métaheuristiques qui aident à trouver des solutions voisines d'optimales dans un temps d'exécution raisonnable. Les algorithmes génétiques, recherche tabou sont des méthodes utilisées pour résoudre les problèmes de SMPS surtout dans les structures complexes de pipelines.

(D) Outil de Simulations

(51) a mentionné que le principe de simulation est de développer un modèle qui représente le monde réel afin d'évaluer les performances et le comportement du système dans des conditions bien définies. Les outils de simulation ont la capacité de traiter des problèmes de chaîne d'approvisionnement à grande échelle, dynamiques et incertains.

Selon (2), il existe deux stratégies de simulation qui sont "couplage simulation-optimisation" et "approches basées sur les agents".

Le premier fait partie de l'interaction entre un modèle déterministe, tel que MILP, et une approche stochastique pour faire face aux incertitudes dans la chaîne d'approvisionnement. Les approches basées sur les agents intègrent des approches hétérogènes par l'utilisation des agents intelligents qui simulent la chaîne d'approvisionnement.

3.3 Travaux Réalisés des problèmes SMPS

Depuis l'année 1974, plusieurs travaux de recherche ont été publiés dans la planification et l'ordonnement des transports des produits raffinés via un système de pipeline multi-produit. Généralement, ils se concentrent sur le développement d'outils d'optimisation capable de fournir des plans optimaux basés sur des modèles de transport réalistes des compagnies pétrolières. À première vue, la première question posée par le lecteur est

il signifie quoi l'ordonnement du transport par pipeline multi-produit

(SMPS) ?

Le SMPS est un problème du niveau de décision opérationnelle de la planification consiste à trouver un plan détaillé des opérations des transports pétroliers de la raffinerie vers les dépôts localisés le long du pipeline, il se comprend un ensemble de programmes d'injection, de réception, de stockages et de livraison qui sont préparés en fonction de l'offre des raffineries, de la demande des centres de stockages et de distributions, la capacité de transport des pipelines et leurs conditions de fonctionnement, les performances des pompes, les limites des stockages aux différents points de système et les propriétés chimiques des produits transportés. L'objectif du problème SMPS est d'atteindre un équilibre spatial et temporel entre les capacités des fournisseurs représentés par les raffineries et les demandes des clients situés à différents endroits (21). Par conséquent, résoudre ce problème nécessite de trouver principalement la meilleure séquence de pompage qui permet d'atteindre mieux les demandes des clients des centres des distributions afin de minimiser le coût d'exploitation de pipeline ou maximiser leurs profits respectant un nombre assez grand des complexes contraintes. Détermination de taille, durée et type de produit localiser dans chaque batch de séquence de pompage. De plus, durée de réception et volume réception pour chaque centre active sont les principales variables de décisions.

Dans le cadre d'optimisation, résoudre le problème de SMPS traduit par la question :

Comment pouvons-nous résoudre le problème d'ordonnement du transport par pipeline multi-produit en utilisant les outils d'optimisation ?

Cette question peut être divisée en quatre sous-questions :

1. Quel type de modélisation est le plus approprié au problème SMPS ?
2. Quelle représentation du problème est la plus adaptée pour le problème de SMPS ?
3. Comment insérer le coût opérationnel dans le problème d'optimisation

de SMPS ?

4. Quel est l'effet des différentes méthodes de résolution sur la qualité de résultats et le temps calculé ?

Dans la littérature, les papiers publiés dans l'ordonnement des systèmes de transport par pipelines multi-produit sont généralement classés en fonction de leur topologie, de la manière dont les sources et les destinations sont organisées. Dans ce contexte, nous avons organisé notre bibliographie en deux parties, la première partie comprend les articles traitant d'ordonnement de pipeline droit et la deuxième pour l'ordonnement d'un réseau de pipeline.

3.3.1 Ordonnement de transport multi-produit par pipeline droit

(52) ont été les premiers qui introduisent un modèle simplifié utilisant des papiers pour l'ordonnement d'un pipeline multi-produit afin de minimiser le volume d'interface résulte entre les frontières des produits adjacents dans le pipeline.

(53) ont étudié le problème abordé dans (52) en utilisant la formulation MILP à temps discret pour modéliser le problème du séquençage. Les auteurs ont divisé le pipeline en segments, le nombre de segments égale au nombre de dépôts. Chaque segment est divisé en petits packs contenant chacune un seul produit (ce processus est présenté en figure 3.4). Ils ont supposé que le débit d'injection de la source au pipeline est fixe . La méthode de décomposition est appliquée dans le but de diviser le problème principal en sous-problèmes faciles à résoudre par l'algorithme de branch and bound afin de minimiser les coûts de maintenance et de pompage.

(54) ont utilisé une recherche heuristique basée sur les connaissances de fonctionnement du système pour générer un calendrier de pompage à long terme pour un système de pipeline reliant une raffinerie à multiple destinations afin de minimiser le coût du pompage et des interfaces en tenant compte des contraintes de séquençage des produits, la capacité limitée des réservoirs

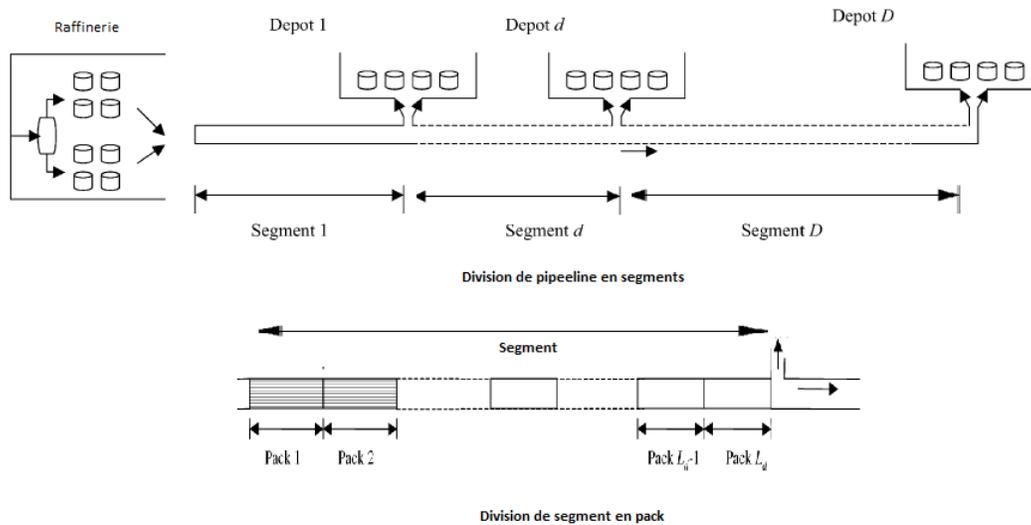


Figure 3.4 – Discrétisation du volume du pipeline

et de la livraison.

(55) ont développé un modèle direct à base de MILP en représentation discret de temps pour l'ordonnancement à court terme ($hmax = 3jours$). Leur fonction objectif vise à minimiser le coût d'exploitation qui inclut le pompage, le stock et d'interface en tenant compte des contraintes pour s'assurer que le pipeline est toujours plein, de pompage et condition de réception du lot au niveau de dépôts. L'inconvénient de cette méthode est l'impossibilité de modéliser une réception simultanée dans les centres et elle peut conduire à générer des problèmes de calcul infaisables.

Les mêmes auteurs de (55) ont étendu leur modèle et proposé un modèle MILP amélioré pour être plus flexible et efficace. Ils ont ajouté des contraintes supplémentaires liées à la contamination des produits capables de diminuer la valeur de la fonction objectif en matière de quantité de l'interface. Les auteurs ont introduit un ensemble de coupes entières pour obtenir des solutions dans un temps de calcul raisonnable (56).

(57) ont présenté le problème étudié par (55) par un nouveau type de modéli-

sation utilisant un modèle MILP en représentation continue. La représentation continue proposée de supprimer les contraintes de modélisation liées à la discrétisation temporelle et de pipeline. L'implémentations de cette représentation dans le modèle d'ordonnancement MILP a conduit à une réduction significative du nombre de variables binaires et du temps de calcul. De plus, ils ont pris en compte dans leur modèle d'ordonnancement les contraintes des heures des pointes de consommation d'énergie électrique.

(51) Ont présenté un plan d'ordonnancement à moyen terme ($hmax = 150h$) pour un pipeline qui reliait une raffinerie à un seul dépôt. Le problème est résolu à l'aide d'une méthode de décomposition hiérarchique qu'a été basée en deux discretS MILP modèle. La fonction objectif consiste à minimiser les coûts d'interfaces et de changement entre les produits pompés. Un an après, (58) ont proposé une approche intégrée combine les modèles CLP et MILP afin de générer une bonne solution pour le même problème traité dans (51).

(59) sont les premiers qui ont étudiés la combinaison entre les opérations d'ordonnancement du pipeline et la gestion des stocks dans les dépôts répartis le long du pipeline, à proximité des marchés locaux des consommateurs. La modélisation de problème est fait à l'aide d'un MILP en représentation continue pour un horizon d'un mois divisé en multi-période, l'heure de fin de chaque période représente une date d'échéance de livraison les produits de dépôt aux clients. La fonction objectif consiste à maximiser l'utilisation de pipeline en tenant compte de contrainte de contrôle de qualité des batches réceptionnées par les dépôts. Le modèle a été testé pour une étude de cas réel d'une société portugaise de distribution de pétrole (CLC). Les mêmes auteurs ont étendu leur modèle précédent en supposant un débit variable et en ajoutant des contraintes de l'arrêt du pipeline. De plus, ils ont proposé un algorithme de méthodologies de ré-ordonnancement pour faire face aux différents scénarios, en particulier des scénarios inattendus pouvant survenir dans le système comme l'arrêt du pipeline (60).

(40) ont développé un nouveau modèle MILP en temps continu pour l'ordonnancement dynamique sur un horizon glissant à plusieurs périodes. Ils ont appliqué un processus de la mise à jour périodique des données à la fin de chaque période. Le modèle à une fonction objectif consiste à minimiser le coût total d'exploitation présenté par le coût de retraitement du volume de l'interface entre les lots consécutifs, le coût du stock en raffinerie et en dépôt, le coût de non-satisfaction des demandes périodiques et le coût de non-utilisation de la capacité maximale du pipeline.

(61) ont résolu le même problème étudié par (56), MINLP modèle en représentation continue de temps était proposé en considérant le pipeline fonctionnait par intermittence. Le point ajouté dans cet article était le coût du pompage est en fonction des taux de rendement des stations de surpression. Les résultats obtenus sont améliorés en termes de valeur de fonction objectif et de temps d'exécution.

(62) ont amélioré les performances de modèle MILP proposés par (59) en termes de taille et de temps d'exécution. La fonction objectif a été définie pour minimiser le coût d'interface, le coût de pénalité des demandes non satisfaites et le coût de la capacité inutilisée du pipeline.

Une heuristique est proposée par (41) pour modéliser l'ordonnancement d'un pipeline simple qui relie une raffinerie à un seul dépôt pour un horizon d'un mois.

(63) ont développé le modèle MILP en représentation continue présenté par (57) pour être capable de modéliser l'ordonnancement d'un pipeline qui contient multi-source d'injection. Ils ont supposé à chaque instance qu'une seule source peut être injectée à l'intérieur de pipeline, leur but principal est de déterminer les séquences d'injections et de réceptions qui minimise le coût de pompage et le coût de retraitement des interfaces contaminées.

(44) ont développé un modèle de simulation à événements discrets à l'aide de logiciel Arena. Le but de cet article est de simuler le plan opérationnel d'un système de pipeline reliant une raffinerie à plusieurs dépôts générés par la formulation mathématique de (40). La structure du modèle de simulation du système de transport par pipeline comprend trois blocs principaux qui sont la station d'entrée (raffinerie), les terminaux de réception(dépôts) et les segments de pipeline (voire la figure 3.5).

Le modèle de simulation à événements discrets permet de

- Valider le plan global proposé en élaborant un échéancier détaillé et réalisable,
- Une interface d'animation est disponible permet de visualiser les opérations du pipeline et illustre la dynamique du système de pipeline au fil du temps.

(64) ont généralisé le modèle MILP proposé par (57) par la considération de multi-période au lieu d'une seule période de planification. Ils ont aussi intégré le plan de planification de la production dans le processus de décision. Une formulation MINLP- continue est présentée pour la modélisation de problème de planification et ordonnancement de système de transport d'une raffinerie reliée à plusieurs dépôts par une seule canalisation dans un horizon à court terme.

(65) ont proposé un modèle MILP en représentation continue pour trouver un plan d'ordonnancement d'un pipeline qui relie une raffinerie à plusieurs centres. Ils ont considéré différents aspects tels que les dates d'échéance de la demande quotidienne, les périodes de contrôle qualité, et les dates prédéfinies de maintenance préventive de pipeline. Le modèle est construit dans un cadre de minimiser les coûts d'interface, de non satisfaction de demande en temps et non utilisation de capacité de pipeline. Une heuristique est utilisée pour adapter aux complexités de calcul pour les grandes instances.

(4) ont utilisé le modèle MILP-continue pour minimiser le nombre de redémarrages de pipelines et de commutations entre les produits pompés dans

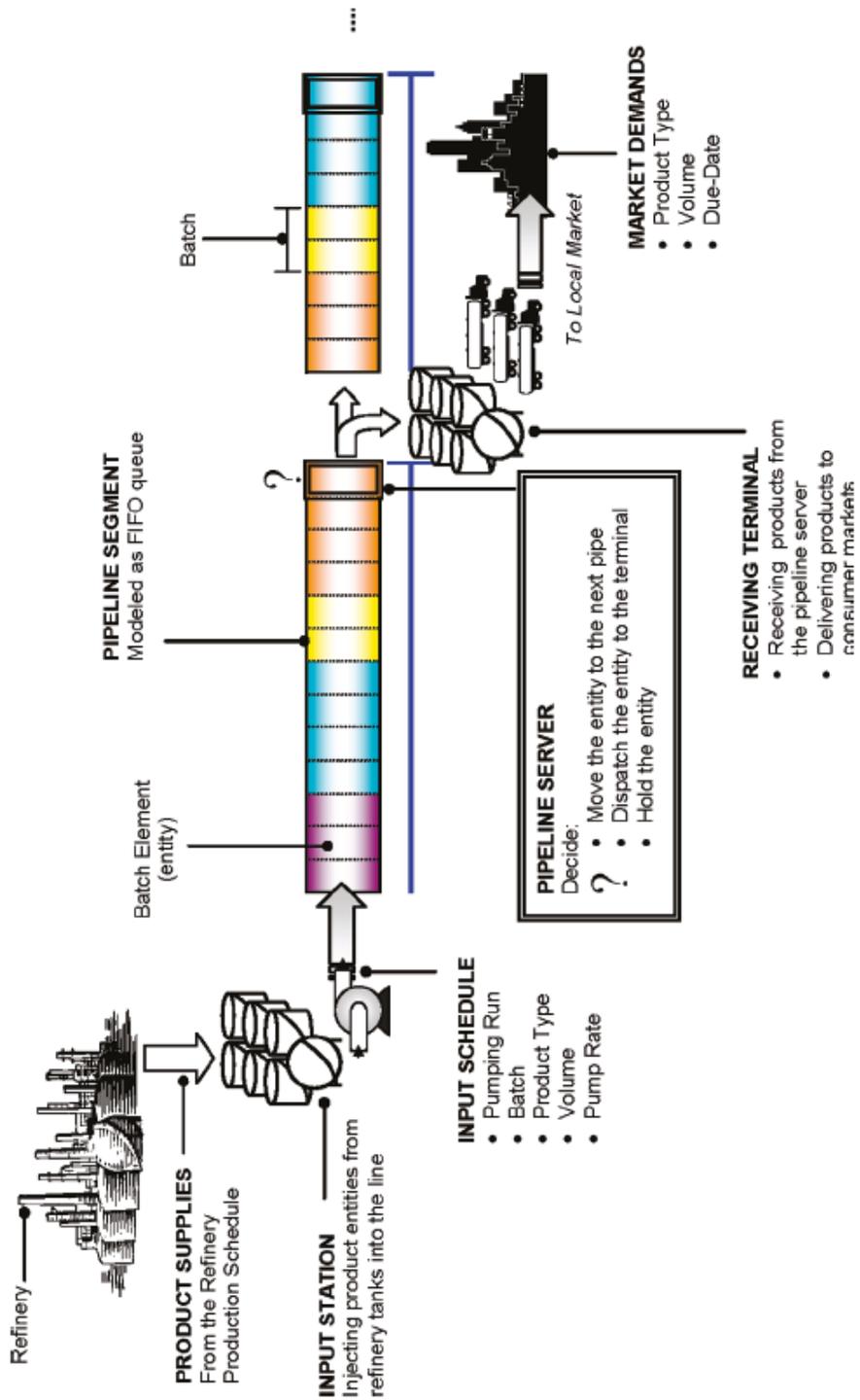


Figure 3.5 – Principaux composants d'un modèle de simulation à événements discrets des opérations de système de pipeline (4)

un horizon de planification à long terme. Une décomposition hiérarchique a été appliquée pour diviser le modèle MILP en deux niveaux. Le premier niveau consiste à trouver la séquence d'entrée et le second niveau détermine les séquences de réception. Une année après, ils ont amélioré leur modèle précédent où les centres sont capables de faire une réception simultanée où plusieurs centres peuvent recevoir un seul lot en même temps (66).

(67) ont développé deux modèles MILP alternatifs pour intégrer l'ordonnement de transport des produits pétroliers et la gestion des inventaires au niveau du centre via un pipeline qui relie une source à un seul centre. Selon les auteurs, l'approche proposée permet la possibilité d'obtenir des solutions de planification à moyen terme dans une durée d'exécution rapide et efficace en évitant la méthode de décomposition.

(42) ont proposé un modèle amélioré pour le papier de (68) où une formulation MILP à base de représentation continue est utilisée pour modéliser l'ordonnement d'un pipeline unidirectionnel où les dépôts intermédiaires peuvent injecter et réceptionner des produits simultanément. L'implémentation de cette méthode permet de calculer avec précision le coût de l'interface et réduire la durée d'exécution.

(69) ont proposé une méthode directe à base d'un seul MILP en représentation continue pour résoudre le travail de (66) qui ont utilisé une méthode de décomposition hiérarchique qui divise le modèle en deux niveaux. L'ordonnement était proposé dans un cadre de minimiser les coûts de pompage et de maintenance de pipeline sur un horizon d'un mois divisé en quatre périodes hebdomadaires, la fin de chaque période représente la date d'échéance de livraison des demandes clients.

(70) ont introduit des équations non linéaires au modèle de (66) pour calculer et suivre rigoureusement la consommation d'énergie. L'algorithme GAMS-DICOPT a été utilisé pour résoudre la formulation MINLP- continue afin

de minimiser le coût de la consommation d'énergie, et le coût de redémarrage/arrêt du flux de pipeline pour un problème d'ordonnancement dans un cas réel dans un horizon $h_{max} = 660h$.

(71) ont développé le modèle proposé par (69) en considérant la possibilité de recevoir plusieurs lots en même temps dans chaque centre actif lors de chaque nouvelle injection. Le modèle MILP minimise le coût d'exploitation qu'incluent les coûts de pompage, contaminâtes, no satisfaction des demandes client à la fin d'horizon de planification et redémarrage/arrêt du flux de pipeline.

(72) ont étudié l'ordonnancement stochastique. Ils ont pris en compte les demandes aléatoires et ont proposé un modèle MILP à temps discret pour minimiser le coût de pompage et le coût de contaminât. Il ont appliqué l'approche Γ -robustness pour traiter les données stochastiques. Le système étudié se compose d'une seule source, un seul dépôt et un pipeline droit.

(17) ont proposé une formulation MILP en représentation discrète de temps pour modéliser le problème d'intégration d'ordonnancement de pipeline avec la gestion des réservoirs de raffinerie et des dépôts visant à minimiser les coûts de stockages, pompage, non-utilisation de capacité maximale de pipeline et de contaminât. Le modèle est exécuté pour un horizon de sept jours divisant en sept périodes, la fin de chaque période représente une date d'échéance de livraison de produits aux clients.

(73) a formulé le système de pipeline multi-produit comme un problème économique d'ordonnancement des lots. La séparation physique entre les lots est utilisée. Le problème a été résolu par une procédure heuristique pour trouver une séquence de pompage minimisant les coûts de stockage et d'installation.

Une méthode de décomposition structurelle basée en deux modules été développée par (5) (voir le figure 3.6). Le module d'allocation et de séquençage

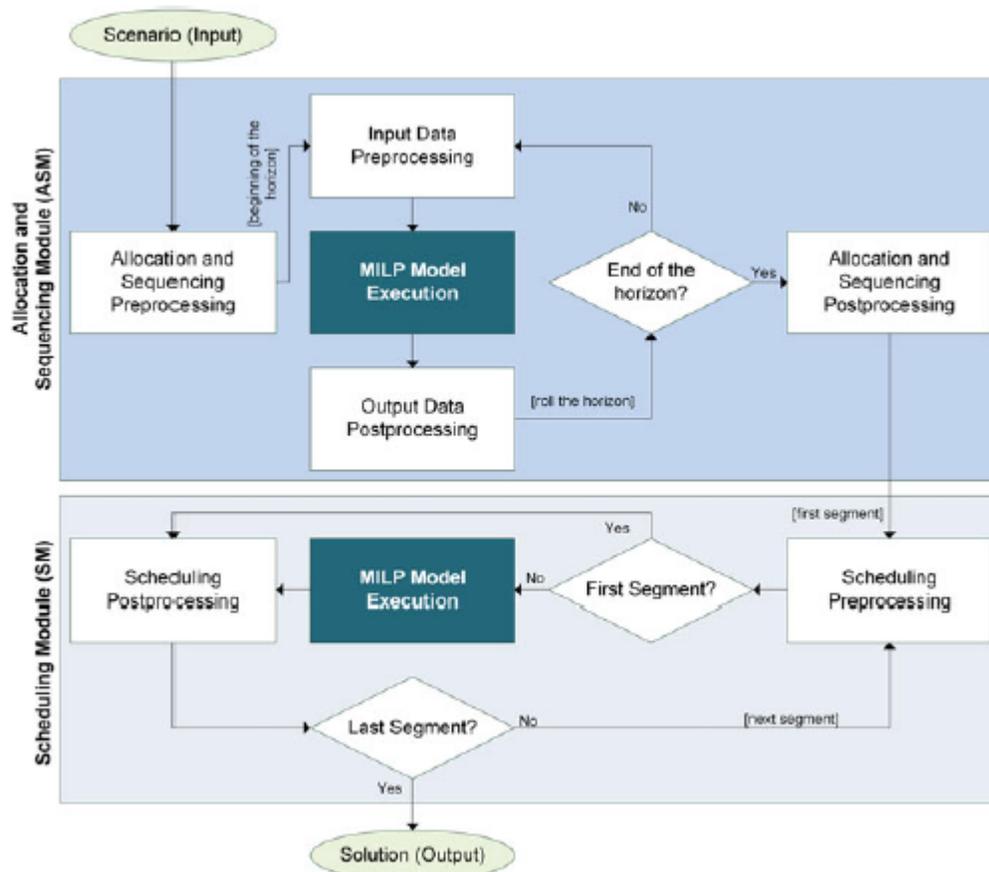


Figure 3.6 – Diagramme de la solution proposée par (15)

(ASM) représente le premier module, responsable de déterminer la séquence d'injection de la raffinerie au pipeline. Le deuxième module (SM) qui est le module de planification détaillé des opérations de réceptions de dépôts pendant l'horizon de l'ordonnancement. La figure montre que la méthode d'ordonnancement utilisée est basée en formulation MILP et une heuristique. Dans ASM module une décomposition temporelle a été appliquée où la technique d'horizon glissant est appliquée. Une décomposition stratégique été envisagée, traitant les opérations de livraison segment par segment.

(74) ont proposé une formulation MILP en représentation continue pour ordonnancer un pipeline unidirectionnel dans un multi-période horizon à moyen

terme, ils se sont concentrés à trouver la séquence d'injection qui minimise le volume des interfaces résultant entre les batches adjacents à l'intérieur du pipeline.

(75) ont développé une heuristique basée sur la décomposition qui est appliquée pour résoudre le modèle proposé par (65), qu'il considère comme un modèle de base avec l'objectif de minimiser les coûts de pompage et d'interfaces. Rapportée aux auteurs l'utilisation de cette méthode est basée sur la connaissance de la structure problématique sous-jacente qui aide à évaluer la qualité de la solution et de réduire le temps de calcul pour les cas à grand échelle.

(76) ont mis en œuvre un modèle de programmation en nombres entiers mixtes (MIP) axé sur une solution pour un réseau réel appartenant à la compagnie pétrolière chilienne qui est composée d'un pipeline unidirectionnel une seule entrée et plusieurs sorties. Des séquences fixes d'injections ont été définies en fonction de l'expérience des ingénieurs de compagnie. Le modèle MIP a pris en compte le suivi des stocks à chaque dépôt le long de l'horizon de planification. Dans le cas où le stock minimum de sécurité n'est pas respecté, une pénalité sera imposée, cela pour prémunir contre les aléas de la demande.

(77) ont présenté un modèle MILP holistique en temps continu pour planifier le transport par pipeline multi-produit unidirectionnel et la gestion des stocks des centres. Dans ce système, les centres peuvent être à la fois des points d'injections et de réceptions. La fonction objective minimise le coût total qui comprend les coûts de pompage, de redémarrage de pompe et de makespan respectant les contraintes des séquences interdites.

Une approche hybride basée sur la formulation MILP qu'est utilisé comme un post-optimisation et une heuristique pour trouver la séquence de pompage. Le coût total à minimiser incluait les coûts d'inventaire, d'arrêt du pipeline, d'interface et de non-satisfaction de demandes au temps (78).

(79) ont proposé une méthodologie intégrée pour l'analyse de la fiabilité de l'approvisionnement par le système de transport par pipeline en cas de panne de pompe. Le processus de Markov à temps discret et la méthode de Monte Carlo ont été utilisés pour décrire la défaillance stochastique de la pompe.

3.3.2 Ordonnancement de transport multi-produit par un réseau des pipelines

(80) ont présenté un modèle d'optimisation à base de formulation MILP en représentation discrète pour un problème d'ordonnancement d'un cas réel. Le système étudié se compose d'une raffinerie, d'un pipeline multi-produit, multi-branche et multi-dépôt. L'objectif de modèle MILP est de minimiser le nombre d'interfaces afin de trouver la bonne séquence de pompage des produits. L'approche utilisée peut générer des difficultés de calcul en fonction de la distinction des niveaux adoptés.

(81) ont développé une approche hybride qui est basée sur une méthode de décomposition hiérarchique intégrant un modèle MILP en représentation continue et une heuristique pour résoudre un problème d'ordonnancement d'un réseau de pipeline brésilien composé de quatre raffineries, trente pipelines, deux ports, six dépôts et deux marchés finals, unidirectionnels (figure 3.7). L'approche utilisée comprend cinq blocs : la planification, l'affectation, le séquençage, la simulation et le timing.

- Bloc de planification consiste à déterminer le volume global transporté à l'aide de formulation MILP-continue.
- Bloc d'affectation a appliqué une heuristique afin de déterminer les séquences initiales, volumes, durées des batches pompés et la contenance des pipelines.
- Bloc de séquençage, son rôle est d'améliorer un algorithme génétique améliorant les séquences initiales obtenues dans le bloc d'affectation.

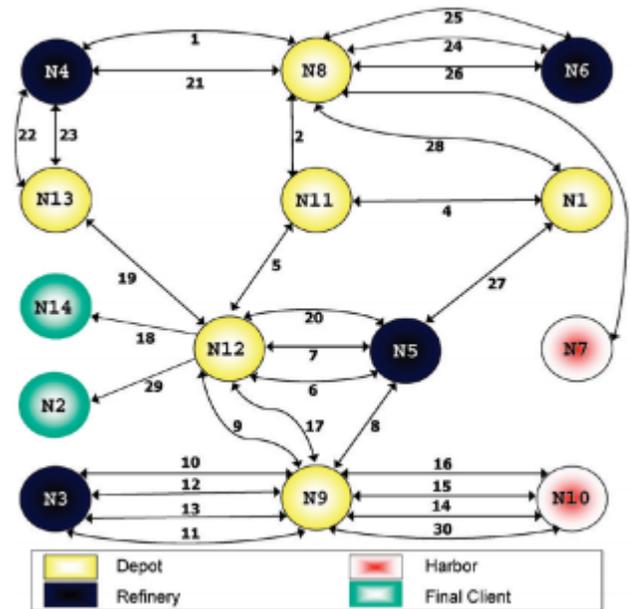


Figure 3.7 – Réseau de pipelines brésilien

- Bloc de simulation détermine les bordures min/max des débits de pompes.
- Bloc de timing résoudre un problème de synchronisation utilisant la formulation MILP pour obtenir les temps détails de planning.

(21) a dit que que la méthode proposée par (81) cherche à trouver une solution faisable qui est n'est pas optimale. De plus, lorsque des in-faisabilités surviennent il n'est pas clair que doit être fait pour résoudre cette situation.

(44) ont développé une formulation MILP-continue pour l'ordonnancement à court terme d'un pipeline arborescent à sources multiples (voir la figure 3.8). L'approche de Ressource- Task- Network est utilisée.

(6) ont étudié le même problème de (81) par l'utilisation d'une méthode de programmation par contraintes. Elle se focalise à décomposer le problème en deux parties : planification et ordonnancement.

- **Phase de planification** : une heuristique de création aléatoire décrivent

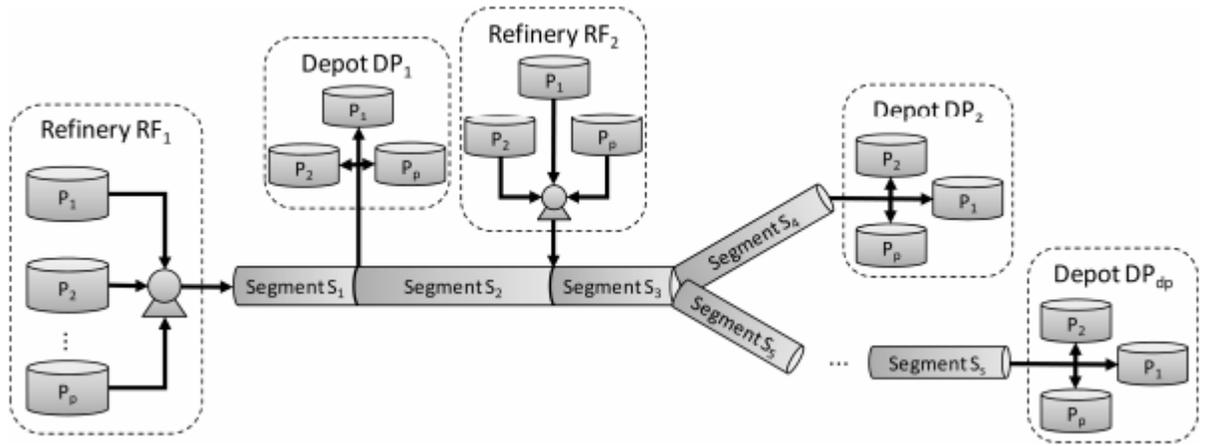


Figure 3.8 – Système de transport par pipeline multi-produit arborescent

comment les volumes de produits doivent être transmis entre les dépôts ? c.à.d sélectionner le trajet de pipeline à suivre et décider le volume transporté entre deux dépôts afin de minimiser le trafic et les interfaces.

- **Phase d'ordonnement** : dans cette partie les résultats obtenus dans la première partie (appelé "delivery order") sont utilisés pour déterminer les séquences et les durées des pompes dans chaque pipeline. La programmation par contrainte était utilisée. Cette partie représente le processus décisionnel de base de problème.

Le diagramme principal d'exécution de méthode proposée par (6) est schématisé sur la figure 3.9. Une boucle est utilisée pour traiter les cas d'in-faisabilité de solutions.

(82) ont proposé une formulation mathématique à base de MINLP en représentation discrète de temps pour déterminer le calendrier opérationnel de la structure du réseau de pipelines reliant plusieurs raffineries à plusieurs centres (figure 3.10). Le modèle a été résolu par un algorithme heuristique pour obtenir des séquences d'injection optimisées qui minimisent les coûts opérationnels du redémarrage des pompes, de la consommation d'électricité et de la gestion de la contamination.

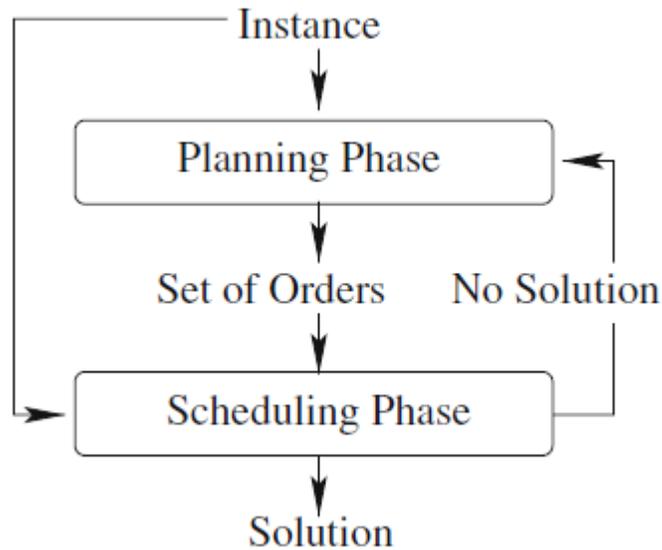


Figure 3.9 – Diagramme de méthode proposée par (6)

3.4 Résultats d'analyse de littérature

Une étude approfondie de la littérature permet de conclure les points suivants :

- La modélisation mathématique à base de programmation linéaire (non-linéaire) en nombre mixtes (MILP/MINLP) est largement utilisée dans les papiers qui étudient les problèmes de SMPS. Elle permet de modéliser efficacement les contraintes de fonctionnement du monde réel et elle est très adaptable aux différents types de structures de pipeline.
- L'un des points critiques de développement d'optimisation de SMPS par le modèle MILP /MINLP repose sur la représentation du temps et du volume utilisés pour exprimer les migrations des batches. Généralement, elle est classée en deux types : représentation discrète ou continue. La représentation continue est le mode le plus préférable par les au-

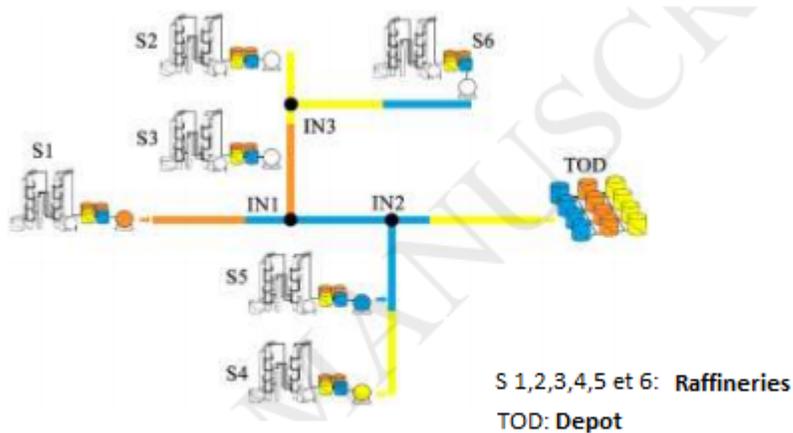


Figure 3.10 – Exemple de Réseau de pipelines multi-source

teurs puisque elle représente mieux les contraintes de fonctionnement de monde réel, le nombre de variables, la taille du modèle et le temps CPU sont moindres qu'en représentation discret.

- La fonction objectif peut être opérationnelle (maximiser l'utilisation du réseau de canalisations) ou économique (minimiser le coût total d'exploitation du réseau de canalisations). La plupart des articles s'intéressent à l'orientation économique où différents coûts sont minimisés tels que les coûts de pompage, de contaminât, non satisfaction des demandes, stockage, etc. La sélection des coûts dépend de l'objectif d'étude.
- La plupart des articles de la littérature appliquent les modèles suggérés à des études de cas du monde réel. La résolution est obtenue à l'aide des méthodes exactes par l'utilisation des logiciels commerciaux comme IBM ILOG CPLEX, GURROBI qui permet de retourner une solution optimale. Dans certains cas des heuristiques et méthode de décomposition sont appelées pour s'adapter au problème qui prend une durée de calcul élevée, l'inconvénient de ces méthodes, elle ne garantit pas l'optimalité.
- L'ordonnancement d'un réseau de pipeline sera juste une extension des travaux proposés dans la structure de base de pipeline. Le développement

ou la proposition des nouvelles méthodes pour les problèmes de SMPS sont fait pour les systèmes de transport d'un pipeline droit.

- Récemment, les problèmes de SMPS sont intéressés aux horizons multi-période au lieu mono période. L'heure de fin de chaque période représente une date d'échéance de livraison des demandes des clients des dépôts.
- La gestion des réservoirs des centres des stockages et distributions est une tâche complexe pour être décrite par des contraintes pour cela on voit qu'un peu des chercheurs ont étudié l'intégration de gestion de stock des centres des stockages et des distributions avec ordonnancement des opérations du pipeline multi-produit.
- Le meilleur objectif des papiers publiés est d'ordonnancer un pipeline multi-produit capable non seulement de déterminer la séquence optimale de pompage des baches avec tous les détails d'injection, mais également de surveiller l'emplacement des lots dans le pipeline et de stockage aux différents centres de stockage et de distribution. En particulier, les enjeux de répondre à la demande périodique avec un délai et des coûts minimums et en respectant les contraintes d'exploitation réelles.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les outils d'optimisation utilisant pour résoudre les problèmes d'ordonnancement de transport par pipeline et comment les auteurs sont adaptés afin de développer une méthode générique et rapide pour créer des calendriers faisables et bons pour les oléoducs multi-produit. Un état de l'art détaillé était étudiée qui couvre les points critiques des articles publiés, ce qui nous permettons de localiser notre contribution qui sera mentionnée dans chapitre [4](#).

4 Modélisation Mathématique

4.1 Introduction

La technique de batching est très utilisée dans la planification et l'ordonnancement du transport des carburants par pipeline. Elle signifie qu'un seul pipeline est utilisé pour déplacer différentes familles et/ou qualités des produits énergétiques liquides. Le mot "batch" signifie un "lot". Les problèmes d'ordonnancement par batch dans un pipeline cherchent à déterminer l'ordre de mouvement des batches et le calendrier détaillé qui comprend le déroulement des opérations d'injections, de réception afin d'optimiser les performances du système.

Dans ce chapitre, la contribution que nous proposons dans notre thèse concernant la modélisation et l'ordonnancement du transport d'un pipeline droit multi-produit est présentée dans la Section [4.2](#). Une description détaillée de la structure de système étudié est décrite dans la Section [4.3](#). La Section [4.4](#) comprend les hypothèses d'étude et la modélisation mathématique à base de formulation MILP en représentation continue qui était développée pour ordonnancer les systèmes de transport par pipeline multi-produit. La section [4.5](#) est réservée à la conclusion.

4.2 Définition détaillée de contribution

Une analyse approfondie de la littérature présentée au chapitre [4](#) révèle que les recherches existantes traitant des problèmes d'ordonnancement de transport par pipeline **multi-produit** dans un horizon **multi-période** supposaient que toutes les demandes des clients des centres qui n'étaient pas satisfaites au cours de la période t devaient être reportées à la période $t + 1$. L'hypothèse d'accepter de retarder une demande peut ne pas être applicable

dans toutes les situations, en particulier dans le contexte économique actuel où les demandes continues des clients doivent être satisfaites au moment souhaité et avec une haute qualité.

(75) ont souligné la nécessité de définir un plan d'ordonnancement sans aucun retard et l'ont considéré comme un point d'étude critique.

Dans le secteur du transport des carburants, l'absence de ces produits au niveau des stations de service à cause de retard de livraison peut bloquer d'autres services sensibles comme, le transport, les hôpitaux, en outre, les personnes peuvent rater des rendez-vous non renouvelables tels que les examens, date de voyage, etc.

Pour faire face à de telles situations, on a proposé cette contribution qui vise à minimiser le coût total d'exploitation du pipeline, y compris les coûts de pompage et de dégradation de qualité des produits transportés par un système de pipeline droit multi-produit en considérant de nouvelles hypothèses visant à améliorer la planification d'une case d'étude Algérienne :

1. Les demandes pour chaque période t doivent être entièrement satisfaites au temps souhaité avec la qualité requise et à un coût d'exploitation minimal de pipeline.
2. On considère également les contraintes suivantes :
 - Contraintes relatives à une nouvelle séquence de produits pompés dans le pipeline ;
 - Contraintes de mise à jour du contenu de pipeline ;
 - contraintes de réception de centres de stockage et de distributions ;
 - Contraintes de gestion de stocks au niveau des centres ;
 - Contraintes de livraison des demandes des clients des centres ;
 - Contraintes des limites des sources de systèmes.

À notre connaissance, aucun ouvrage de la littérature ne considère simultanément toutes les hypothèses et les contraintes citées. L'ordonnancement opérationnel du système étudié est modélisé par la formulation mathématique de MILP en représentation continue et résolu par un algorithme de branch and cut pour un horizon à long terme multi-période.

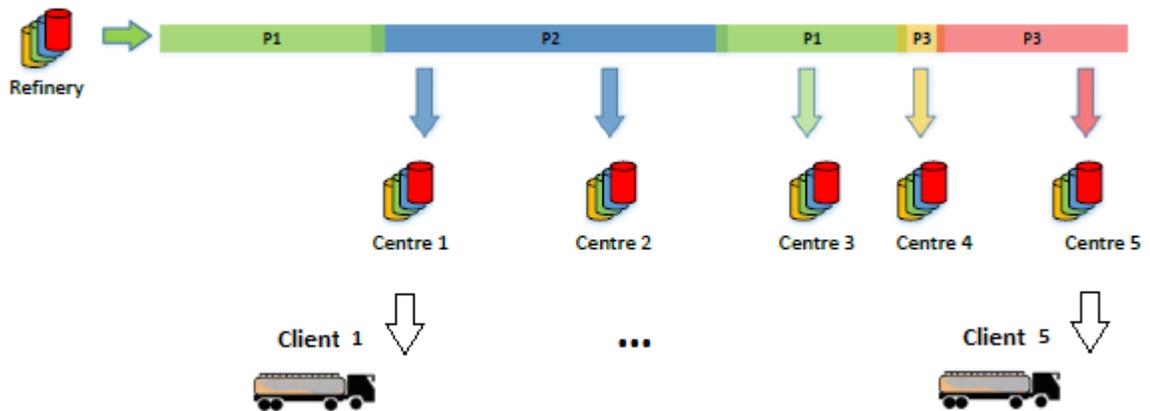


Figure 4.1 – Structure physique de système étudié

4.3 Description de problème

Le système de transport par un pipeline multi-produit relie une raffinerie à plusieurs centres de stockage et de distribution des carburants localisés à différents endroits le long du pipeline, représente la structure physique que nous intéressons à étudier (voir le figure 4.1). Les centres remplissent leurs réservoirs depuis le pipeline, pour cela la raffinerie injecte différents batches des produits dans le pipeline pour les acheminer directement vers les centres. Ces batches sont injectés lots à lots dans le pipeline, sans aucune séparation physique entre eux, ce qui crée une zone de contamination entre les frontières des produits adjacents à l'intérieur du pipeline.

Les centres sont localisés proche des marchés locaux des consommateurs, chaque centre a sa propre demande des clients. L'horizon temporel d'ordonnement est divisé en plusieurs périodes, l'heure de fin de chaque période représente une date d'échéance de livraison des produits de centres vers le client, les centres doivent répondre aux demandes des clients pour chaque période.

L'objectif de l'approche proposée est de présenter un plan d'ordonnement

opérationnel qui assure la satisfaction des demandes des clients des centres aux périodes souhaitées, avec la qualité demandée tout en minimisant le coût d'exploitation du pipeline. Nous considérons plusieurs contraintes liées à la capacité limitée des ressources, telles que la capacité maximale du réservoir, le débit maximal d'injection et le débit de réception aux centres, et les conditions de séquençage des produits.

La résolution de ce problème nécessite de répondre aux questions principales suivantes :

- Quel produit à injecter dans le pipeline et lequel doit être reçu dans les centres ?
- Quel ordre de produits minimise la quantité d'interface, c'est-à-dire augmente la qualité du produit transporté à l'intérieur du pipeline ?
- Quand doit-on pomper les produits dans le pipeline pour un accès rapide dans les centres ?
- Quelles sont les quantités de produits qui doivent être injectées et reçues dans chaque centre pour atteindre notre objectif ?

4.4 Modélisation mathématique

4.4.1 Hypothèses du travail

La construction du modèle proposé dans ce travail repose sur les hypothèses suivantes :

- Selon la structure physique du système d'étude, nous ne pouvons injecter qu'un seul produit à la fois, la direction d'écoulement des produits est unidirectionnel de gauche à droite et une réception simultanée des centres est possible ;
- Nous considérons que l'état initial du pipeline est connu y compris le volume, l'emplacement et le contenu des batches dans le pipeline. Généralement, l'état final du plan précédent d'ordonnancement de pipeline représente l'état initial de plan suivant ;

- Les produits sont injectés dans le pipeline sans aucune séparation physique ;
- Les volumes acceptables des interfaces des contaminations sont déterminés par les ingénieurs de l'entreprise sur la base de données historiques. Le seuil dépend du type de produit adjacent ;
- La notion de séquences interdites est utilisée pour éviter une grande dégradation de la qualité du produit c'est-à-dire que certains produits ne peuvent pas être adjacents à l'intérieur du pipeline ;
- Le pipeline doit être toujours plein pour assurer une pression stable dans le pipeline qui est responsable de sa fonctionnalité ;
- Le débit d'injection et le débit de réception peuvent varier dans la plage autorisée ;
- La capacité des réservoirs de raffinerie et des centres sont prise en considération ;
- Les réservoirs de chaque type produit dans chaque centre sont représentés par un réservoir dont la capacité est égale à la capacité totale des réservoirs de ce type de produit.

4.4.2 MILP model

Nous choisissons la programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP), en représentation continuée pour modéliser le problème d'ordonnement opérationnel du transport des carburants par pipeline multi-produit.

Le modèle mathématique proposé est formulé sur la base des notations présentées dans les tableaux 4.1 et 4.2.

Nomenclature Description

Ensembles

I Ensemble de tous les batches comprend $I^{old} \cup I^{new}$

| | |
|-------------------|--|
| I^{old} | Ensemble des batches à l'intérieur du pipeline à l'état initial $\{1, \dots, nbo\}$, où nbo est le nombre total des batches existant dans le pipeline à $t = 0h$ |
| I^{new} | Ensemble de nouveaux batches à injecter dans le pipeline $\{nbo + 1, \dots, I \}$ |
| J | Ensemble des centres |
| P | Ensemble des produits |
| T | Ensemble des périodes |
| Paramètres | |
| $C1_{a,b}$ | Coût unitaire de dégradation de la qualité du produit entre les frontières de produits a et b à l'intérieur du pipeline |
| $C2_a$ | Coût unitaire d'injection d'un mètre cube de produit a de la raffinerie au pipeline |
| $MIX(a, b)$ | Volume d'interface résulte entre les batches i et $i + 1$ contenant respectivement le produit a et b |
| $FB_{a,b}$ | Matrice booléenne représentant les séquences possibles et interdites entre les produits a et b dans le pipeline. Si $FB_{a,b} = 1$ indique le produit b peut suivre le produit a |
| v_{min}/v_{max} | Débit minimum/maximum d'injection de la raffinerie vers le pipeline (m^3/h) |
| $q0_h$ | Le volume du batch h qui est à l'intérieur du pipeline à l'état initial, c'est-à-dire les volumes des anciens batches en m^3 à $t = 0$ |
| tv | la capacité totale de pipeline en (m^3) |
| vd_j | Coordonnée volumétrique du centre j mesurée par le volume total entre la raffinerie (origine) et le centre j (m^3) |
| $F_{h,0}$ | La coordonnée volumétrique supérieure du lot h à l'intérieure du pipeline à l'état initial $t = 0$ |
| $VMIN_j/VMAX_j$ | Le débit minimum/maximum de réception de pipeline vers le centre j (m^3/h) |
| $CAPR_a$ | La capacité maximale du réservoir de produit a dans la raffinerie en (m^3/h) |

| | |
|-----------------------------|---|
| M | Un grand nombre en (m^3) |
| $vzero_{a,j}$ | Le stock initial de produit a au centre j |
| $dp_{a,j,t}$ | La demande du client pour le produit a au centre j à la période t |
| h_{max} | Horizon temporel de la planification (heure) |
| dd_t | L'heure de fin de période t |
| $capmin_{a,j}/capmax_{a,j}$ | capacité minimum/maximum de réservoir de produit a dans le centre j |

Variables Continuo

| | |
|-----------------|---|
| $INV_{i,a,b}$ | Volume d'interface entre les batches i et $(i + 1)$, contenant respectivement les produits a et b |
| $volume_{i,a}$ | Le volume initial d'un nouveau batch i du type a qui sera injecté à l'intérieur du pipeline |
| S_i | Heure de début de l'injection du nouveau lot i de la raffinerie au pipeline |
| L_i | La durée d'injection du nouveau batch i |
| Q_i | Le volume initial du nouveau batch i |
| $qantd_{h,j,i}$ | Le volume de batch h à transférer du pipeline vers le centre j lors de l'injection du nouveau batch i |
| $w_{h,i}$ | Volume du batch h à l'intérieur du pipeline à la fin de l'injection du nouveau batch i (c'est-à-dire au temps $S_i + L_i$) |
| $F_{h,i}$ | La borne supérieure de batch h à l'intérieur du pipeline à l'heure de fin de l'injection du nouveau lot i |
| $QPD_{h,a,j,i}$ | Le volume de batch h contenant le produit a qui sera transféré du pipeline au centre j lors de l'injection du nouveau batch i |
| $nvs_{a,j,i}$ | Niveau de stock du produit a au centre j à la fin de l'injection du nouveau batch i |

| | |
|---------------|--|
| $VOC_{a,j,i}$ | Le volume du produit a transféré de centre vers Le marché de consommation pendant la période de pompage du nouveau lot i |
| $DR_{h,j,i}$ | Durée de réception de batch h au centre j pendant le pompage de batch i |

Variables binaires

| | |
|-------------|---|
| $y_{i,a}$ | Variable binaire égale à 1 si le nouveau batch i contient le produit a sinon $y_{i,a} = 0$ |
| $x_{h,j,i}$ | Variable binaire égale à 1 si une partie du lot h peut être reçue au centre j sinon $x_{h,j,i} = 0$ |
| $ww_{i,t}$ | Variable binaire égale à 1 si l'injection du batch i est terminée pendant la période t sinon $ww_{i,t} = 0$ |

(A) Fonction objectif

Le modèle proposé à une fonction objective d'orientation économique qui cherche à minimiser le coût total d'exploitation du pipeline, l'équation (4.1) modélise cette fonction. Le coût d'exploitation comprend le coût de dégradation de qualité entre les produits consécutifs à l'intérieur du pipeline (premier terme) et les coûts de pompage (deuxième terme) :

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{a \in P(a \neq b)} \sum_{b \in P} C1_{a,b} * INV_{i,a,b} + \sum_{i \in I^{new}} \sum_{a \in P} C2_a * volume_{i,a} \quad (4.1)$$

$C1_{a,b}$ est le coût unitaire de dégradation de la qualité du produit entre le produit consécutif a et b . Et $C2_a$ représente le coût unitaire d'injection du produit a à l'intérieur du pipeline par mètre cube.

(B) Contraintes

Nous organisons les contraintes en six parties chacune représente une tâche à modéliser dans le système de transport.

1. Contraintes de séquençage

Cet ensemble de contraintes permet de définir toutes les caractéristiques de la nouvelle séquence à injecter dans la canalisation, y compris les différents volumes initiaux à pomper, l'heure de début et la durée de chaque nouvelle injection, et allocation des produits dans les batches de la séquence.

a) Allocation des produits par batch

La contrainte (4.2) indique que chaque nouveau batch pompé dans le pipeline ne peut contenir qu'un seul produit, où les variables binaires $y_{i,a}$ sont mises à 1 si le produit a se localisait dans le batch i ($y_{i,a} = 1$) sinon $y_{i,a} = 0$.

$$\sum_{a \in P} y_{i,a} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (4.2)$$

Au début de la programmation, nous ne connaissons pas exactement le nombre des batches à injecter pour satisfaire les différentes demandes. Pour cela le programmeur donne un nombre maximum de batches qui peuvent être injectés. Parmi ces lots, il peut y avoir des lots vides où un lot vide ne peut pas être pompé. Par conséquent, le batch i ne peut être injecté que si le batch $i - 1$ a été injecté. La contrainte (4.3) représente cette dépendance entre deux lots consécutifs.

$$\sum_{a \in P} y_{i,a} \leq \sum_{a \in P} y_{i-1,a} \quad \forall i \in I^{new} \quad (4.3)$$

b) L'heure de départ de pompage

La contrainte (4.4) impose que l'injection du nouveau batch i ne puisse pas être démarrée que avant d'avoir terminé l'injection de batch $i - 1$, où S_i et L_i représentent l'heure de début et la durée de l'injection de batch i .

$$S_i \geq S_{i-1} + L_{i-1}; \forall i \in I^{new} (i > nbo + 1) \quad (4.4)$$

La condition initiale donnée par l'équation (4.5) représente l'heure de



Figure 4.2 – Valeur de l'interface entre les produits adjacents à l'intérieur du pipeline

début de la première injection.

$$S_i = 0 \quad \text{where } (i = nbo + 1) \quad (4.5)$$

c) Volume d'interface entre batches adjacents

La contrainte (4.6) indique que si deux produits a et b sont successifs (voir Figure 4.2) c'est-à-dire que le batch i contient le produit a et le batch $i + 1$ comprend le produit b . Ainsi, $y_{i,a} = 1$ et $y_{i+1,b} = 1$ tous ça implique qu'il existe une interface ($INV_{i,a,b}$) entre eux et le volume de ce dernier est égal à $MIX_{a,b}$, qui est censé être connu, dépend de type des produits adjacents a et b .

$$INV_{i,a,b} \geq MIX_{a,b} * (y_{i,a} + y_{i+1,b} - 1) \quad \forall i \in I(i < |I|), a, b \in P \quad (4.6)$$

d) Séquence possibles et interdits

Les opérations non autorisées et autorisées sont représentées dans la contrainte (4.7), où la matrice booléenne prédéfinie $BF_{a,b}$ fournit les séquences possibles et les séquences interdites, si le produit b peut suivre le produit a alors $BF_{a,b} = 1$, sinon $BF_{a,b} = 0$.

$$y_{i,a} + y_{i+1,b} \leq 1 + BF_{a,b} \quad \forall i \in I^{new}, a, b \in P(a \neq b) \quad (4.7)$$

e) Durée de l'injection de nouveau batch

La contrainte (4.8) exige que la durée L_i d'injection d'un nouveau batch doit varier dans la plage autorisée, où Q_i est le volume batch i pompée au pipeline et v_{max} et v_{min} sont les débits maximum et minimum du

volume des batches pompées.

$$\frac{Q_i}{v_{max}} \leq L_i \leq \frac{Q_i}{v_{min}} \quad \forall i \in I^{new} \quad (4.8)$$

f) Taille des lots injectés

Les contraintes suivantes relient le volume initial d'un nouveau batch Q_i au type de produit a existant dans ce batch i , représenté par la variable continue $volume_{i,a}$. Cette variable précise le coût de pompage de chaque produit sans dépasser la capacité de stockage des réservoirs de la raffinerie ($CAPR_a$).

$$volume_{i,a} \leq M * Y_{i,a} \quad \forall i \in I^{new}, a \in P \quad (4.9)$$

$$Q_i = \sum_{a \in P} volume_{i,a} \quad \forall i \in I^{new} \quad (4.10)$$

$$volume_{i,a} \leq CAPR_a \quad \forall i \in I^{new}, a \in P \quad (4.11)$$

2. Contraintes d'exploitation du pipeline

La condition principale du fonctionnement du pipeline est qu'à chaque nouvelle injection, le volume de batch pompé au pipeline doit être égal au volume total réceptionné par les centres actifs. Cette condition est représentée par l'équation (4.12) : qui assure que le pipeline est toujours plein où la quantité entrée égale à la quantité sortante. $qantd_{h,j,i}$ représente le volume de batch h reçu dans les centres de stockage et de distribution des carburants j pendant l'injection du nouveau batch i .

$$Q_i = \sum_{h \in I(h \leq i)} \sum_{j \in J} qantd_{h,j,i} \quad \forall i \in I^{new} \quad (4.12)$$

Cette contrainte est illustrée dans l'exemple 1 et la figure 4.3.

Exemple 1

Pour le pompage d'un nouveau batch 3, l'heure de début est $t = t_0$, la durée de pompage est $t_1 - t_0$ et leur volume égale à $Q_3 = 545m^3$.

Selon la contrainte de fonctionnement de pipeline (4.12), à chaque nouvelle injection, la quantité d'entrée ($Q_3 = 545m^3$) doit être égale

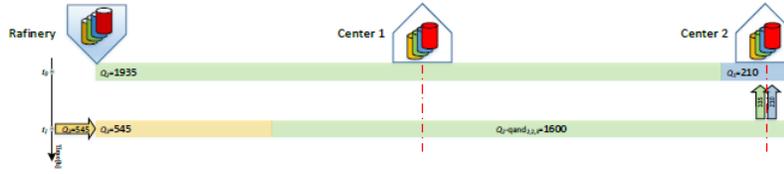


Figure 4.3 – Exemple illustratif de contrainte [4.12](#)

à la quantité de sortie de la canalisation . Dans cet exemple, on a un seul centre actif qui reçoit des quantités à travers deux batches : $Q_r = qantd_{1,2,3} + qantd_{2,2,3} = (210m^3 + 335m^3) = 545 = Q_3$ lors du pompage de batch 3 (voir Figure [4.3](#)).

3. Mise à jour du pipeline

Le pipeline est soumis à un flux continu avec des injections et des réceptions de produits simultanés, ce qui affecte la localisation et la quantité des bâches existant dans le pipeline .Dans ce contexte, La mise à jour du contenu de pipeline est nécessaire. Le modèle proposé permet de déterminé le volume et la localisation de chaque batch existe dans le pipeline à l'heure de stabilisation de flux de pipeline.

a) Taille de batch h dans le pipeline

La variable continue $w_{h,i}$ dans l'équation [\(4.13\)](#) représente le volume de batch h qui est à l'intérieur du pipeline à l'heure de fin de pompage de nouveau batch i . Il est égal au volume de batch h à l'heure de début de l'injection du nouveau batch i c.à.d à $t = S_i$ moins le volume total transféré de batch h aux centres actifs j pendant la période autorisée pour l'injection de batch i : qui est $[S_i, S_i + L_i]$.

$$w_{h,i+1} = w_{h,i} - \sum_{j \in J} qantd_{h,j,i+1} \quad \forall i \in I^{new} (i < |I|), h \in I (h \leq i) \quad (4.13)$$

L'équation suivante représente le calcul de volume de batch contenu au pipeline à l'heure de fin du premier pompage où $q0_h$ indique le volume

initial des batchs existant dans le pipeline à $t = 0$.

$$w_{h,i} = q_0 h - \sum_{j \in J} q_{ant} d_{h,j,i} \quad \forall i \in I^{new} (i = nbo + 1), h \in I^{old} (h \leq i) \quad (4.14)$$

L'équation (4.15) indique que le volume de nouveau batch i pompé au pipeline égal à la quantité initiale de ce batch (Q_i) moins la quantité transférée aux différents centres actifs lors de l'injection de ce batch.

$$w_{i,i} = Q_i - \sum_{j \in J} q_{ant} d_{i,j,i} \quad \forall i \in I^{new} \quad (4.15)$$

b) Localisation des batchs au pipeline

Dès qu'on injecte un nouveau batch i à l'entrée de pipeline, il y a en parallèle des batchs qui sortent vers les centres, par conséquent, les emplacements des batchs dans le pipeline changeront. Notre modèle doit pouvoir mettre à jour l'emplacement de ces batchs à la fin de chaque nouvelle injection, c'est-à-dire au temps $t = S_i + L_i$. La localisation de batch est représenté par la variable continue $F_{h,i}$, qui indique la coordonnée volumétrique supérieure du lot h à l'instant $S_i + L_i$. Cette mise à jour d'emplacement est représenté par l'équation (4.16).

$$F_{h,i} = tv - \sum_{l \in I, l \leq h-1} w_{l,i} \quad \forall h \in I; i \in I^{new} \quad (4.16)$$

4. Contraintes de réception des batchs par Les centres

Le centre j peut recevoir une quantité de batch h qui est à l'intérieur du pipeline lors de l'injection du nouveau batch i si et seulement si deux conditions sont remplies :

La première condition est la coordonnée volumétrique supérieure de batch h reçu par le centre doit être égale ou supérieure de la coordonnée volumétrique de centre de réception vd_j à l'heure de fin d'injection de batch i c.à.d à $t = S_i + L_i$. et la deuxième condition nécessite que la borne inférieur de batch h doit être inférieur au égale au localisation de centre j au début d'injection de batch i . La modélisation mathématique de ces deux conditions de réception est la suivante :

a) La première condition de réception

- **Réception pour le centre final** : L'équation (4.17) représente la première condition où la variable binaire $x_{h,j,i}$ prend la valeur 1 qui signifie que une partie de batch h peut être reçue au dépôt j c.à.d $F_{h,i} \geq vd_j$, sinon $x_{h,j,i} = 0$ donc le centre ne peut pas recevoir le batch h .

$$F_{h,i} \geq vd_j * x_{h,j,i} \quad \forall h \in I(h \leq i), i \in I^{new}, j \in J(j = |j|) \quad (4.17)$$

- **Réception pour les centres intermédiaires** Le centre intermédiaire ($j < |J|$) ne reçoit que les parties nettes des batches des produits sans contamination, donc si le batch h peut être reçu par le centre j (c.à.d $x_{h,j,i} = 1$), la coordonnée supérieure de ce batch moins la quantité de contamination (partie gauche d'équation (4.18)) doit être supérieur ou égal au coordonnée volumétrique du centre j (partie droit d'équation (4.18)).

$$F_{h,i} - \sum_{\substack{a \in P \\ a \neq b}} \sum_{b \in P} INV_{h-1,a,b} \geq vd_j * x_{h,j,i} \\ \forall h \in I(1 < h \leq i), i \in I^{new}, j \in J(j < |j|) \quad (4.18)$$

c) La deuxième condition de réception

La deuxième condition de réception est commune pour tous les centres du système. Au début de l'injection de batch i , la coordonnée volumétrique inférieure de ce batch h qui représente également la coordonnée volumétrique supérieure de batch $h+1$ ($F_{h+1,i-1}$) (partie gauche d'équation (4.19)). Elle doit être inférieure à la coordonnée volumétrique du centre j lorsque j reçoit une partie de batch h (c'est-à-dire $x_{h,j,i} = 1$) moins la quantité totale de batch h reçue dans les centres pendant la durée de l'injection de batch i (partie droite de l'équation (4.19)).

$$F_{h+1,i-1} \leq vd_j + tv * (1 - x_{h,j,i}) - \sum_{k \in J} qantd_{h,k,i} \\ \forall h \in I(h \leq i), i \in I^{new}; j \in J \quad (4.19)$$

L'équation (4.20) est réservée à la modélisation de la condition initiale de réception pour la première injection.

$$F_{h,0} + \sum_{k \in J} qant_{h,k,i} \leq vd_j + tv * (1 - x_{h,j,i})$$

$$\forall h \in I^{old}(h \leq i), i \in I^{new}(i = nbo + 1); j \in J \quad (4.20)$$

5. Gestion des stocks aux centres

Au niveau de chaque centre, il y a un ensemble des réservoirs des produits. Chaque réservoir soumis à un flux d'entrée et de sortie des quantités de produits ce qui conduit au changement de niveau de stock. Ce dernier doit varier dans un intervalle précis. Le modèle proposé tenant en compte la gestion de ces réservoirs.

a) Niveau de stock de réservoirs des centres

Notre modèle permet de donner le niveau de stock de produit a au centre j à l'heure de fin de l'injection de nouveau batch i qui représente le moment de stabilisation de niveau de stock. Il est représenté par la variable continue $nvs_{a,j,i}$. Celui-ci est égal au niveau du stock de ce produit à l'heure de fin de l'injection précédente $i - 1$, plus la somme du volume de produit a transféré au dépôt j lors de l'injection de batch i moins la quantité livrée aux clients pendant le temps de pompage de ce batch i . (Voir équation (4.21)).

$$nvs_{a,j,i} = nvs_{a,j,i-1} + \sum_{\substack{h \in I \\ h \leq i}} QPD_{h,a,j,i} - VOC_{a,j,i}$$

$$\forall a \in P, j \in J, i \in I^{new} \quad (4.21)$$

L'équation (4.22) représente la condition initiale pour la première injection.

$$nvs_{a,j,i} = vzero_{a,j} + \sum_{\substack{h \in I \\ h \leq i}} QPD_{h,a,j,i} - VOC_{a,j,i} \\ \forall a \in P, j \in J, i \in I^{new} (i = nbo + 1) \quad (4.22)$$

b) Variation autorisée du niveau de stock

Comme on a déjà dit, la variation du niveau de stock est limitée. Cette dernière est modélisée dans l'équation (4.23) qui indique que le niveau de stock du produit a dans le centre j doit être inférieure à la capacité maximale de stockage de produit a au centre j et supérieur au niveau du stock de sécurité.

$$capmin_{a,j} \leq nvs_{a,j,i} \leq capmax_{a,j} \quad \forall a \in P, j \in J \quad (4.23)$$

Les contraintes suivantes (4.24) et (4.25) définissent le type de produit a reçu au centre j à partir de batch h .

$$QPD_{h,a,j,i} \leq M * y_{h,a} \quad \forall h \in I (h \leq i), i \in I^{new}, a \in P, j \in J \quad (4.24)$$

$$\sum_{a \in P} QPD_{h,a,j,i} = qantd_{h,j,i} \quad \forall h \in I (h \leq i), i \in I^{new}, j \in J \quad (4.25)$$

c) Durée de réception des centres

Les équations (4.26) et (4.27) représentent les limites de variation des durées de réceptions pour chaque batch h réceptionné par le centre j pendant la durée de pompage de batch i .

$$DR_{h,j,i} \geq \frac{qantd_{h,j,i}}{VMAX_j} \quad \forall h \in I (h \leq i), i \in I^{new}, j \in J \quad (4.26)$$

$$DR_{h,j,i} \leq \frac{qantd_{h,j,i}}{VMIN_j} \quad \forall h \in I (h \leq i), i \in I^{new}, j \in J \quad (4.27)$$

d) Relation entre les durées des réception et d'injection

À chaque nouvelle injection, la durée d'injection L_i est supérieure ou

égale à la durée maximale de réception dans les centres actifs (équation 4.28).

$$L_i \geq \text{Max} \left(\sum_{\substack{h \in I \\ h \leq i}} DR_{h,j,i}, \sum_{\substack{h \in I \\ h \leq i}} DR_{h,j',i} \right) \quad \forall i \in I, (j, j') \in J \quad (4.28)$$

6. Contraintes de livraison des clients des centres

Nous avons divisé l'horizon de planification h_{max} en plusieurs périodes t . dd_t représente la dernière heure de la période t . À chaque période, les demandes des centres doivent être satisfaites dans la période désirée et permutation des demandes entre les périodes est inacceptable

a) Date de livraison

Notre objectif est de satisfaire la demande pour chaque produit a à chaque centre j dans la période souhaitée t . La satisfaction de ce contrainte impose que au mois un batch est pompé dans chaque période qui implique que les centres sont reçue des batches dans ce période L'équation (4.29))

$$\sum_{i \in I^{new}} ww_{i,t} \geq 1 \quad \forall t \in T \quad (4.29)$$

De plus, lorsque le pompage de batch i est terminé dans la période t , le temps d'achèvement $S_i + L_i$ doit prendre une valeur dans l'intervalle de temps $dd_{t-1} \leq S_i + L_i \leq dd_t$ comme indiqué dans les contraintes (4.30) et (4.31).

$$S_i + L_i \geq dd_{t-1} * ww_{i,t} \quad \forall i \in I^{new}, t \in T \quad (4.30)$$

$$S_i + L_i \leq dd_t + (1 - ww_{i,t}) * h_{max} \quad \forall i \in I^{new}, t \in T \quad (4.31)$$

L'équation auxiliaire (4.32) détermine la valeur de variable binaire qui indique si une nouvelle injection de i est terminée dans la période t (c'est-à-dire $w_{i,t} = 1$), sinon $ww_{i,t} = 0$.

$$\sum_{t \in T} w_{i,t} = \sum_{a \in P} y_{i,a} \quad \forall i \in I^{new} \quad (4.32)$$

b) contraintes de quantité de livraison

La contrainte (4.33) garantit que toutes les demandes de durée $[0, dd_t]$ (c'est-à-dire de période t) seront satisfaits. De plus, la demande totale de produit a au centre j de l'horizon de planification h_{max} doit être complètement satisfaite (voir équation (4.34)). La coordination entre ces contraintes assure la satisfaction totale de clients.

$$\sum_{\substack{l \in I^{new} \\ l \leq i}} VOC_{a,j,l} \geq \sum_{\substack{tt \in T \\ tt \leq t}} dp_{a,j,tt} * (ww_{i,t} + ww_{i+1,t})$$
$$\forall a \in P, i \in I^{new}, j \in J, t \in T \quad (4.33)$$

$$\sum_{i \in I^{new}} VOC_{a,j,i} = \sum_{t \in T} dp_{a,j,t} \quad \forall a \in P, j \in J \quad (4.34)$$

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode développée pour la modélisation des opérations d'ordonnancement des transports par pipeline multi-produit. La formulation mathématique à base de programmation linéaire en nombres mixtes, en représentation continue est utilisée.

La spécification de ce travail est que nous avons considéré un horizon à long terme composant de plusieurs périodes, l'heure fin de chaque période représente une date d'échéance de livraison de demandes des centres vers les marchés locaux de consommateurs. Notre modèle exige que les demandes des clients pour chaque période t doivent être entièrement satisfaites au temps souhaité avec la qualité requise et à un coût d'exploitation minimal de pipeline inclue le coût de contaminâtes et le coût de pompages tous en respectant les capacités limites des ressources du système. De plus, la gestion des réservoirs au niveau des centres de stockage et de distribution est aussi intégrée.

Dans la partie de modélisation nous avons essayé de construire le modèle proposé à base d'hypothèse qui existe en monde réel afin de détecter leur

efficacité de résoudre les problèmes de terrain des compagnies pétrolières.

5 Cas d'étude et Résultats

5.1 Introduction

L'Algérie est considérée parmi les pays dont l'économie dépend du secteur de l'énergie, les hydrocarbures représentant 60 % des revenus financiers et 98 % des recettes d'exportation. En 2019, L'Algérie est classée respectivement les 16^e et 10^e parmi les pays producteurs de pétrole et de gaz naturel au monde. De plus, elle a classée en 7^e position dans l'exportation de gaz naturel au monde.

Les activités de transport des carburants font partie des points importants du complexe Sonatrach qui est une entreprise algérienne représente le premier responsable de toutes les activités de chaîne d'approvisionnement pétrolières et la commercialisation des produits énergétiques aux niveaux national et international.

De 1950 à nos jours, un important réseau de transport d'hydrocarbures par pipeline est mise en place en Algérie . Selon le document de " DESCRIPTION DU RESEAU DE TRANSPORT PAR CANALISATION DES HYDROCARBURES & TARIFS DE TRANSPORT " publié par le site officiel de compagnie Sonatrach, au niveau du territoire national, il y a une canalisation de longueur totale égale à 20705 km composée de 22 systèmes pour le transport de pétrole brut et leur dérivés, gaz Naturel et gaz liquéfié.

La figure [5.1](#) représente le réseau de transport d'hydrocarbures en Algérie dans les années 50 et la figure [5.2](#) indique le développement de ce réseau en année de 2021 utilisant les systèmes des pipelines.

Dans ce chapitre, nous testons notre modèle d'ordonnancement dans une

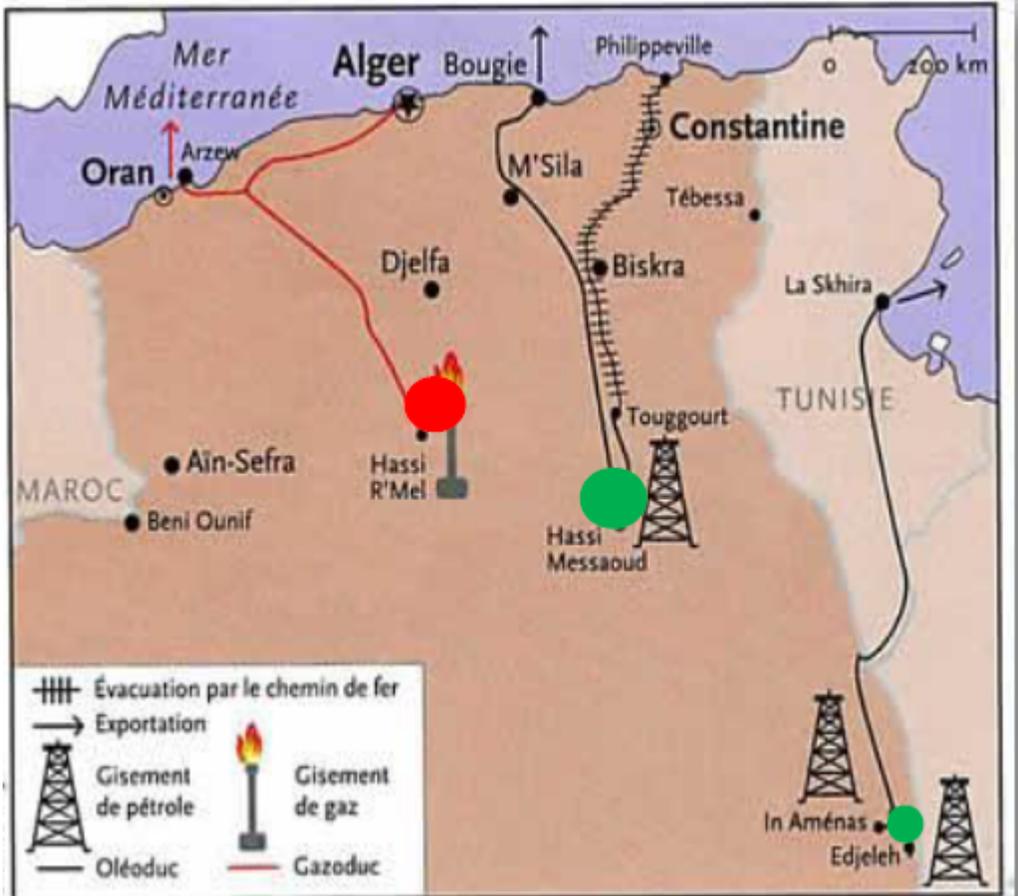


Figure 5.1 – Réseau de Transport des Hydrocarbures en Algérie dans Les années 50

compagnie pétrolière algérienne sa mission principale est de transporter des carburants par pipeline multi-produit ensuite de le stocker dans des centres de stockage afin de le distribuer aux marchés de ouest et de sud-ouest de l'Algérie. La Section 5.2 comprend une présentation détaillée de structure physique du système étudié et les données utilisées pour manipuler le modèle. La discussion et l'analyse de résultats sont mentionnées dans la Section 5.3. La section 5.4 est réservée aux analyses de sensibilité. Et la Section 5.5 pour la conclusion.

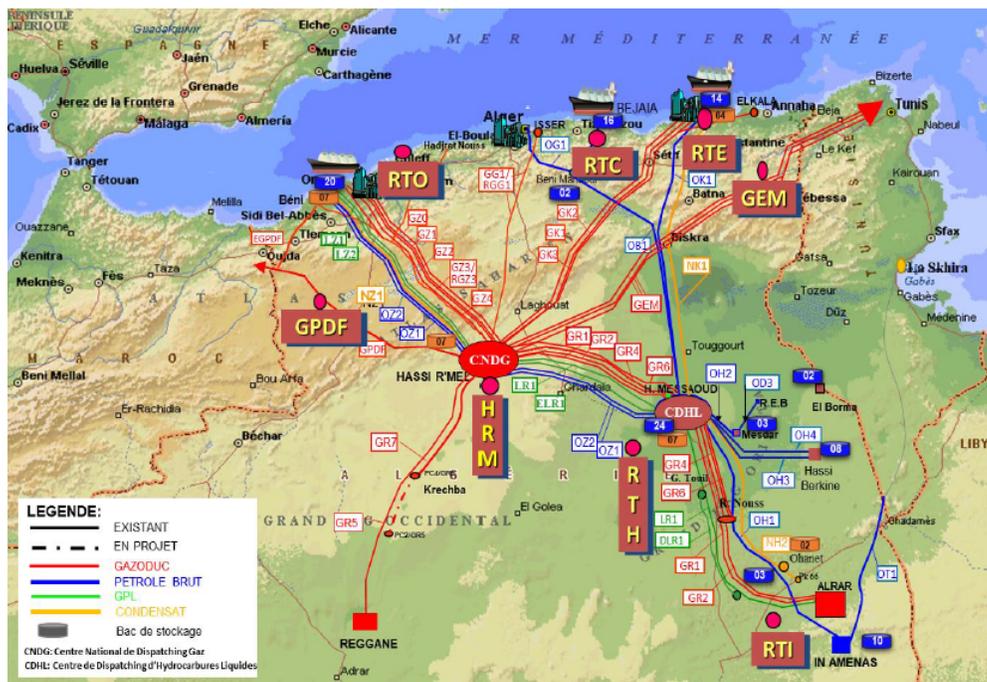


Figure 5.2 – Cartographie du Réseau de Transport des Hydrocarbures en Algérie en 2021

5.2 Présentation de cas d'étude

Une ligne nationale d'approvisionnement des carburants affiliés de compagnie Sonatrach, existant au nord de l'Algérie, nommée pipeline multi-produit ASR (abréviation de : Arzew-Sidi Bel Abbès-Remchi) représente le terrain d'essai pour le modèle MILP -continue qu'est proposé dans le chapitre 4. Le ASR pipeline multi-produit assure l'approvisionnement des stations-service des régions ouest et sud-ouest de l'Algérie.

Ce système comprend un pipeline qui s'étend sur une longueur de 166km et d'une capacité de $10\,000\text{ m}^3$, il relie la raffinerie d'Arzew située dans la ville d'Oran à deux centres de stockage et de distribution localisés le long du pipeline, le premier en ville de Sidi Bel Abbès et le deuxième à Tlemcen-Remchi. La figure 5.3 montre le tracé du pipeline d'ASR / multi- produit sur la carte géographique.

Les emplacements de la raffinerie et les centres sont mesurés par les coordonnées volumétriques qui indiquent la capacité du pipeline entre la raffinerie et le centre, où 0m^3 , $vd_1 = 6.100\text{m}^3$ et $vd_2 = 10,000\text{m}^3$ représentent respectivement les coordonnées volumétriques de la raffinerie, centre 1, et centre 2 le long du pipeline (figure 5.4).

Il peut distribuer quatre types des produits de la raffinerie aux centres (P1 : Gasoil (**GO**), P2 : Essence super(**SCA**), P3 :Essence normale (**CA**) et P4 : Essence sans plomb (**SP**)). Ces dernières circulent dans le pipeline sans aucune séparation physique entre eux, ce qui conduit à l'émergence des certaines interfaces entre les frontières des batches, ces volumes représentent une dégradation de qualité des produits adjacents dans les batches qui seront pompés dans le pipeline.

Dans le pipeline ASR , la raffinerie est la seule à pouvoir pomper des produits dans le pipeline, les centres ont la capacité de juste reçus à partir de

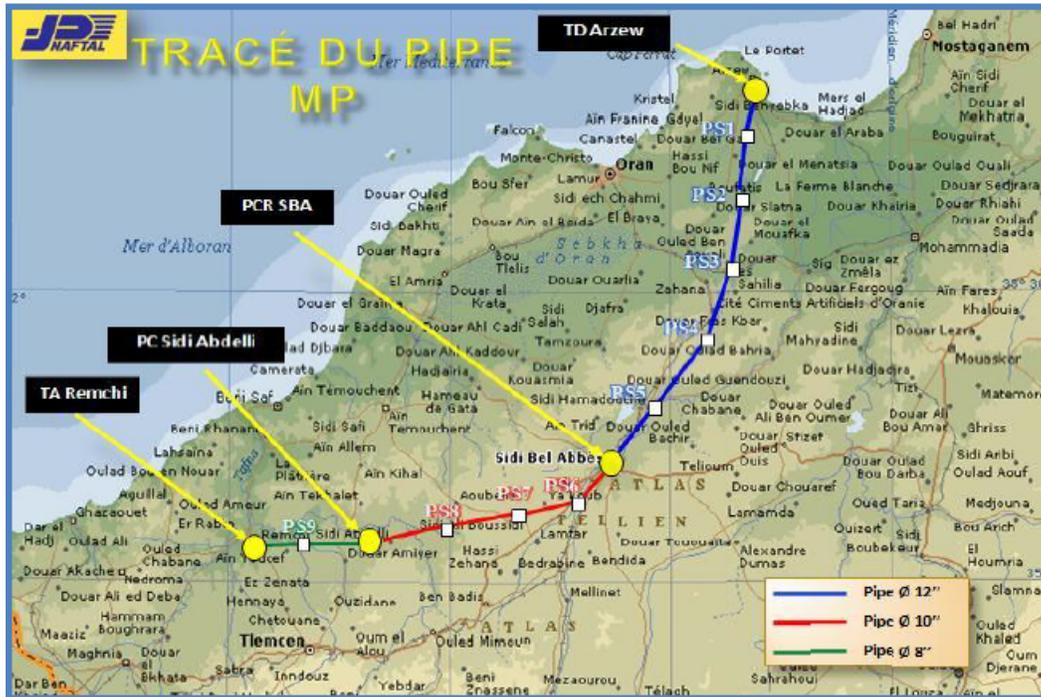


Figure 5.3 – Tracé géographique du système d' ASR

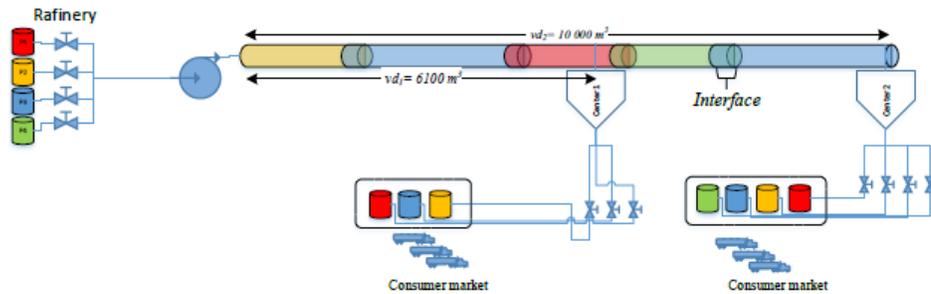


Figure 5.4 – Structure physique du système de pipeline ASR/ multi-produit

pipeline. Chaque centre a ses propres demandes pour satisfaire son marché de consommation.

Data utilisée

Nous nous sommes intéressés d'étudier l'ordonnancement opérationnel à long terme, Le h_{max} représente la durée de l'horizon de planification. Pour notre cas $h_{max} = 672h$, il se divise en quatre périodes t_1 à t_4 , l'heure de fin de chaque période représente une date d'échéance de livraison des demandes des clients des centres.

Le tableau 5.1 montre les demandes du marché de consommation dans chaque centre (centre 1 et centre 2) et pour les périodes t_1 à t_4 .

Le tableau 5.2 représente les capacités maximum/minimum et le stock ini-

| | centre1 | | | | Centre2 | | | |
|-------|---------|-------|-------|-------|---------|--------|--------|--------|
| | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 |
| P_1 | 6300 | 8820 | 8820 | 8820 | 22050 | 22050 | 22050 | 22050 |
| P_2 | 1113 | 2940 | 1260 | 2940 | 5880 | 5880 | 5880 | 5880 |
| P_3 | 63 | 273 | 273 | 273 | 1107.5 | 1107.5 | 1107.5 | 1107.5 |
| P_4 | - | - | - | - | 1107.5 | 1107.5 | 1107.5 | 1107.5 |

Table 5.1 – Demande des centres de distribution des carburants

tial des réservoirs des produits dans chaque centre. Le centre 1 peut stocker trois types de produits (P_1 , P_2 et P_3) et le centre 2 reçoit les quatre types de produits (P_1 , P_2 , P_3 et P_4), chaque produit P_x , $x \in \{1, 2, 3, 4\}$ a son réservoir spécifique.

Le tableau 5.3 montre les coûts unitaires [$U.C/m^3$] et les volumes [m^3] de contaminâtes résultés entre les frontières de deux produits adjacents à l'intérieur du pipeline. "X" indique quelle séquence peut ne pas être autorisée.

| | Centre1 | | | Centre2 | | |
|-------|---------|------|---------|---------|------|---------|
| | Max | Min | Initial | Max | Min | Initial |
| P_1 | 5700 | 540 | 4400 | 20900 | 1980 | 16600 |
| P_2 | 1615 | 153 | 1006 | 9025 | 855 | 5510 |
| P_3 | 428 | 40.5 | 281 | 950 | 90 | 680 |
| P_4 | - | - | - | 4750 | 450 | 3900 |

Table 5.2 – Capacités de stockage maximum/minimum et stock initial dans les centres en m^3

Les capacités des réservoirs dans la raffinerie pour chaque type de produite

| | coût d'interface [$unitcot/m^3$] / Volume [m^3] | | | |
|-------|---|--------|--------|-------|
| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 |
| P_1 | - | 1.6/28 | 1.8/30 | X |
| P_2 | 1.6/28 | - | X | 0 |
| P_3 | 1.8/30 | X | - | X |
| P_4 | 1.8/30 | X | X | - |

Table 5.3 – Coûts et volumes des interfaces

sont représentés dans le tableau [5.4](#).

Les débits des pompes d'injection et de réception peuvent varier dans la plage autorisée : 0 à $300m^3/h$ et 0 à $300m^3/h$ respectivement. Le coût d'injection des produits dans le pipeline est fixé à $2,5U.C/m^3$.

| | Réservoirs [m^3] |
|-------|----------------------|
| P_1 | 15000 |
| P_2 | 10000 |
| P_3 | 3000 |
| P_4 | 3000 |

Table 5.4 – Capacité des réservoirs à la raffinerie

5.3 Discussion et Analyse des Résultats

Logiciel IBM ILOG CPLEX Optimisation Studio version 12.9. est utilisé pour le codage et l'exécution de modèle d'ordonnancement à base de formulation MILP dans le cas d'étude de pipeline ASR /multi-produit. Concernant le matériel, Un ordinateur équipé d'un processeur Intel(R) Xeon(R) X5680 @ 3,33 GHz, 3325 Mhz est utilisé.

IBM ILOG CPLEX Optimisation Studio est un outil informatique commercial permet de développer des solutions optimales des différents problèmes académiques et industriels, fréquemment utilisé pour résoudre les modèles des gestions de chaîne d'approvisionnement, de transport et pour présenter des plans d'ordonnancement,..etc. Il est classé parmi les meilleures solveurs grâce à sa flexibilité et hautes performances d'optimisation de programmation mathématique qu'est basée sur la programmation linéaire (LP), la programmation lineare en nombres mixtes (MILP) et la programmation par contraintes (CP). Il permet de produire des décisions précises et logiques.

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio permet d'intégrer facilement avec différents types des logiciels tel que Gurbbi, C++, Phython. Le langage de modélisation OPL (abréviation : Optimization Programming Language) est utilisé comme un langage de modélisation. Deux solveurs sont associés à ce logiciel, Le premier est **IBM ILOG CPLEX**, il est spécifié de résolution de programmes linéaires en nombres entiers ou mixtes et de programmation quadratiques. La deuxième est **IBM ILOG CP** pour la programmation par contraintes.

5.3.1 Méthode de détermination de nombre optimal $|I^{new}|$

Initialement, le planificateur ne connaissait pas exactement le nombre optimal des nouveaux batches à pomper par la raffinerie dans le pipeline pour

atteindre les objectifs d'ordonnancement. Au début, nous supposons que le nombre des batches est égal au nombre des produits pétroliers circulant dans le réseau de pipeline (dans notre cas d'étude on commence avec $|I^{new}| = 4$). Après avoir exécuté notre modèle MILP, le $|I^{new}|$ augmente de un et le MILP est relancé. Ces deux étapes sont répétées tant que la fonction objective s'améliore. Lorsque la fonction objective ne s'améliore plus ou que des batches vides sont générés, on arrête l'algorithme et on garde la dernière valeur du nombre de batches $|I^{new}|$, cette dernière représente le nombre optimal des batches de séquence d'injection.

La méthode proposée garantit que la séquence optimale obtenue ne contient aucun batch vide et satisfait les exigences des clients des centres de stockage et la distribution de carburant en temps désiré avec la qualité voulue et un coût d'exploitation minimum.

5.3.2 Séquene de pompage

L'application de cette méthode pour le pipeline d'ASR a généré une séquence contient 17 batches (c.à.d, $|I^{new}| = 17$), la localisation des produits dans les batches de cette séquence est comme suit :

$$P_3^{(i1)} - P_1^{(i2)} - P_2^{(i3)} - P_1^{(i4)} - P_2^{(i5)} - P_1^{(i6)} - P_3^{(i7)} - P_1^{(i8)} - P_2^{(i9)} - P_1^{(i10)} - P_2^{(i11)} - P_1^{(i12)} - P_2^{(i13)} - P_4^{(i14)} - P_1^{(i15)} - P_2^{(i16)} - P_4^{(i17)} .$$

Cette séquence sera pompée pour répondre aux besoins des clients du système de transport par canalisation ASR/ multi-produit pour un horizon d'un mois. Elle respecte tous les conditions qu'on a posé tel que les séquences interdites, taille des batches autorisés,..etc. Les caractéristiques de cette séquence sont mentionnées dans le tableau [5.5](#).

| batch | quantité [m^3] | durée d'injection (heur) | |
|-------------------|--------------------|--------------------------|--------|
| | | Début | Fin |
| batch <i>i</i> 1 | 3000 | 0 | 10 |
| batch <i>i</i> 2 | 15000 | 10 | 60 |
| batch <i>i</i> 3 | 6636.3 | 60 | 82.121 |
| batch <i>i</i> 4 | 15000 | 82.121 | 132.12 |
| batch <i>i</i> 5 | 9253.7 | 132.12 | 172.73 |
| batch <i>i</i> 6 | 1500 | 172.72 | 222.73 |
| batch <i>i</i> 7 | 1481.5 | 222.73 | 227.67 |
| batch <i>i</i> 8 | 1500 | 227.67 | 277.67 |
| batch <i>i</i> 9 | 1643 | 277.67 | 283.15 |
| batch <i>i</i> 10 | 1500 | 283.15 | 333.15 |
| batch <i>i</i> 11 | 855 | 333.15 | 386.37 |
| batch <i>i</i> 12 | 15000 | 386.37 | 436.37 |
| batch <i>i</i> 13 | 7877 | 436.37 | 462.62 |
| batch <i>i</i> 14 | 3000 | 462.62 | 472.62 |
| batch <i>i</i> 15 | 9413.3 | 472.62 | 504 |
| batch <i>i</i> 16 | 500 | 504 | 505.67 |
| batch <i>i</i> 17 | 5467 | 505.67 | 507.5 |

Table 5.5 – Caractéristiques de séquence de pompage

5.3.3 Planning d'ordonnement de pipeline d' ASR

Les valeurs des variables de décisions obtenues sont toutes combinées pour la construction du plan d'ordonnement qui contient les informations détaillées des opérations au niveau de la raffinerie d'Arzew, de pipeline et les deux centres (voir la figure 5.5). La représentation des variables des décisions par cette manière facilite la communication avec les gérants au niveau de compagnies pétrolières.

La figure 5.5 représente le planning optimal d'ordonnement opérationnel du système de transport de pipeline ASR sur un horizon d'un mois ($h_{max} = 672h$). L'état initial de pipeline avec lequel nous avons commencé est représenté dans la première ligne du plan où le pipeline contient deux anciens batches h_1 (batch 1) et h_2 (batch 2), les produits P_4 et P_1 localisés respectivement dans ces batches. Les volumes initiaux de ces batches sont $q_{0h_1} = 520m^3$, $q_{0h_2} = 9480m^3$, et leurs coordonnées volumétriques (rappelons que les coordonnées volumétriques d'un batch représentent par la borne supérieure de ce batch) sont $F_{h_1,0} = 10000m^3$ et $F_{h_2,0} = 9480m^3$.

Ce planning fournit toutes les informations nécessaires au responsable de la compagnie pétrolière, la partie gauche de la figure 5.5 contient toutes les informations concernant la nouvelle séquence de pompage de la raffinerie d'Arzew vers le pipeline :

les heures de début, de fin de pompage, la taille et le type de produit situé dans les nouveaux batches de la séquence d'injection. De plus, le débit d'injection.

Le pipeline est soumis à un flux continu de mouvement des produits pour cela une mise à jour de pipeline est nécessaire. La partie intermédiaire de la figure 5.5 représente le contenu du pipeline, à l'heure de fin de chaque nouveau pompage. Dans cette partie les volumes, localisation des batches existant en pipeline sont déterminés sont oublier le type de produit localisé dans chaque batch.

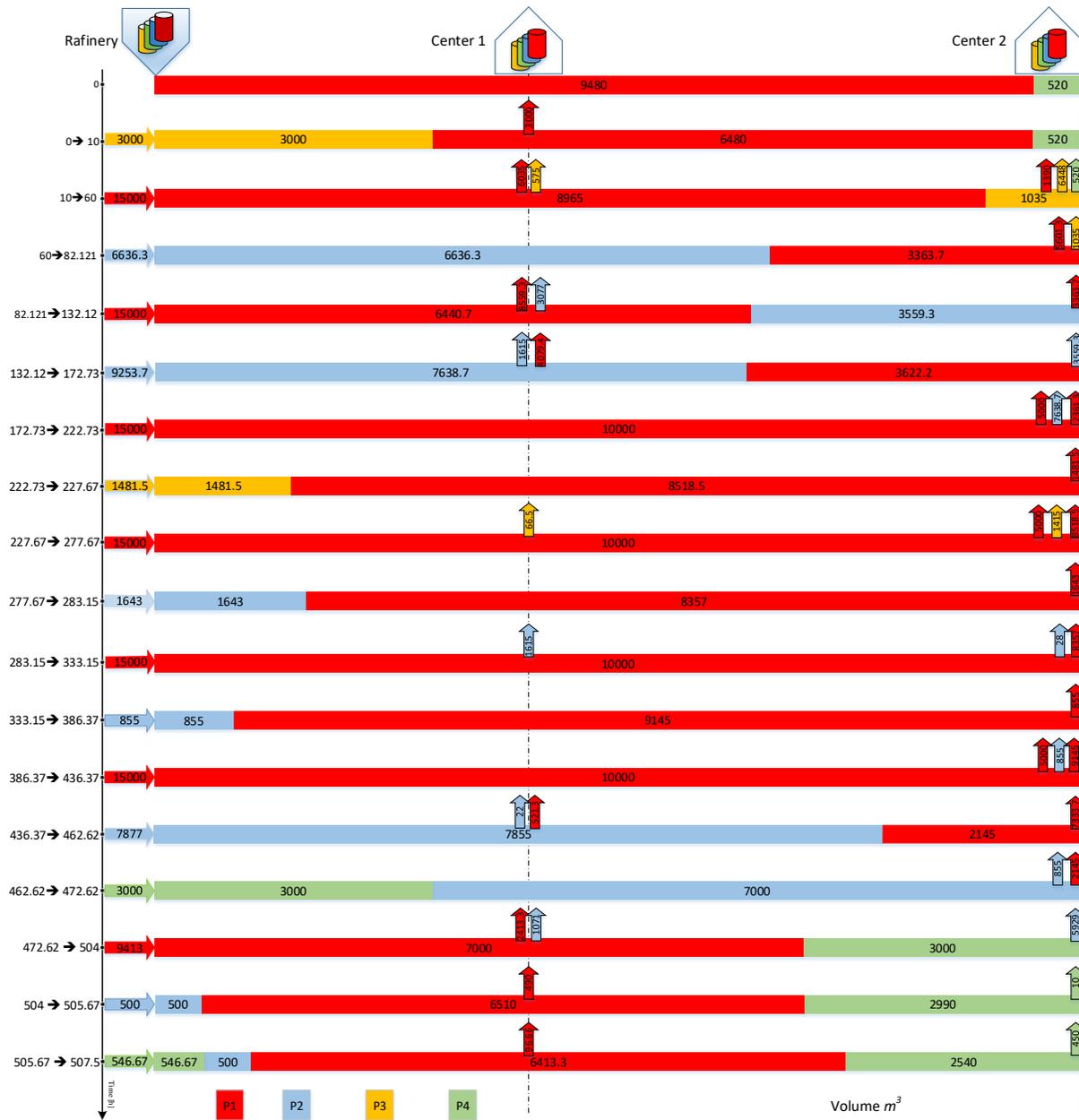


Figure 5.5 – Planning d’ordonnement de pipeline d’ASR

Le plan obtenu permet aussi de montrer les séquences de réception aux niveaux des centres de Sidi bel abbés et Remchi où à chaque nouvelle entrée au pipeline nous permettons de connaître les quantités réceptionnées pour chaque centre. Comme vous voyez dans la figure 5.5 dans la plupart des nouvelles injections il y a des réceptions simultanées dans les centres, où chaque centre de stockage active peut faire une réception multi- batch.

Ce plan a été créé dans un cadre de minimiser le coût total d'exploitation de pipeline tout en satisfaisant les demandes de chaque période t_1 à t_4 en respectant le temps, la qualité de livraison des produits et toutes les contraintes opérationnelles du système de transport de pipeline ASR / multi-produit. Il permet d'éviter les pénalités d'insatisfaction des clients des centres qui servent à augmenter le coût global d'exploitation du pipeline.

5.3.4 Gestion des réservoirs des centres

La variation des niveaux des stocks des réservoirs des centres de Sidi Bel Abbés et Remchi pendant l'horizon de planification est montré respectivement dans les figures 5.6 et 5.7. Chaque point de la courbe représente le niveau de stock de produit p dans le centre j à la fin de la période d'injection de nouveau batch (c'est-à-dire au temps $t = S_i + L_i$).

La variation du niveau de stock dépend du type d'opération qui se déroule au centre. La montée d'une courbe de niveau de stock indique que le réservoir reçoit un certain volume de produit p tandis que sa diminution signifie qu'il y a une livraison d'un certain volume de produit p au client de ce centre de distribution.

Il est remarquable que le modèle d'ordonnement proposé respecte les contraintes des capacités de stockage des réservoirs où le changement des ni-

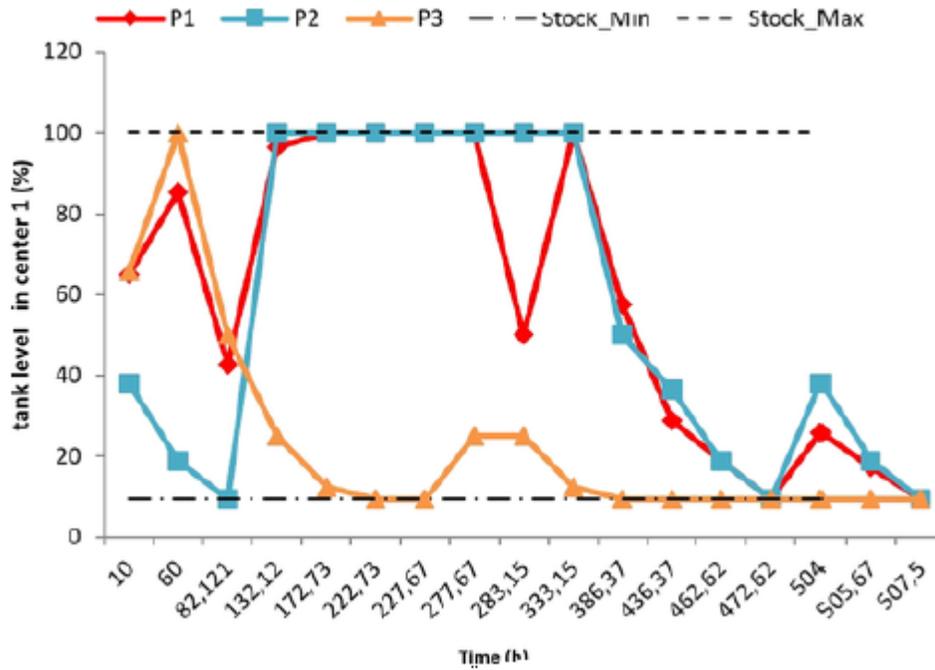


Figure 5.6 – Niveaux des stocks au centre de Sidi beL Abbés

veaux des stocke sont entre les bornes des capacités maximales et minimales.

5.3.5 Distribution des demandes des clients

L'horizon d'ordonnancement est divisé en multi-période. L'heure de fin de chaque période représente une date d'échéance de livraison des demandes de produit p de centre j vers leurs clients. Le challenge est de présenter un plan d'ordonnancement qui n'accepte pas le retard de livraison.

Dans cette étude, l'horizon comprend quatre périodes, la durée de chaque période est une semaine ($7\text{ jour} = 168\text{ h}$).

Les tableaux 5.6 et 5.7 montrent les volumes des produits transféré des centres vers leurs clients au cours de chaque période t $[0, dd_t]$. Ces tableaux confirment que les différentes demandes pour chaque type de produit p au

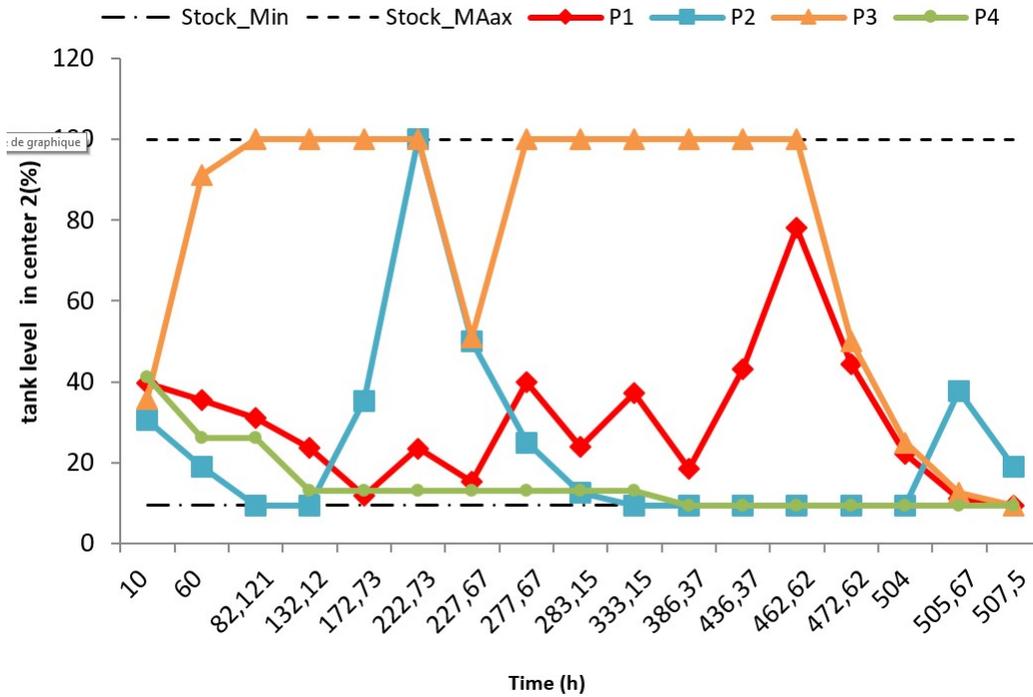


Figure 5.7 – Niveaux des stocks au centre Remchi

niveau de chaque centre j et pendant chaque période t sont complètement satisfaites avant la date d'échéance requise. Ce dernier assure la fiabilité de notre modélisation à base de formulation MILP-continue pour gérer un plan d'ordonnancement atteindre les objectifs destinés.

| volume réceptionné [m^3] | Centre 1 | | | |
|------------------------------|----------|---------|---------|-------|
| | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 |
| P_1 | 20373.8 | 23223.8 | 31236.8 | 32760 |
| P_2 | 4083 | 5698 | 7794 | 8253 |
| P_3 | 802.5 | 869 | 841,51 | 882,5 |

Table 5.6 – Distribution des demandes aux clients de centre 1

| volume réceptionné[m ³] | Centre 2 | | | |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|-------|
| | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 |
| P_1 | 29580.1 | 58802.4 | 85557.4 | 88200 |
| P_2 | 5880 | 15881.02 | 20983.02 | 23520 |
| P_3 | 2155 | 3570 | 4282.5 | 4430 |
| P_4 | 3802.5 | 3802.5 | 3970 | 4430 |

Table 5.7 – Distribution des demandes aux clients de centre 2

| fct objectif | N° var.contraintes | N° var.binaire | N°var.continue | Tps de CPU |
|--------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|
| 336288.25 | 11250 | 518 | 48586 | 3.76 <i>min</i> |

Table 5.8 – Résultats de taille de modèle

5.3.6 Taille de modèle

Le tableau 5.8 comprend la valeur de la fonction objective du coût d'exploitation optimal de système de transport de pipeline ASR/multi-produit qui égale à 336288.25 *unit cots* qui est atteinte après un temps d'exécution égale à 3.76 *min*. Dans ce type d'ordonnancement, le temps de CPU est l'un des critères d'évaluation et de performance entre les modèles d'ordonnancement du système de pipeline multi-produit. L'obtention d'un plan d'ordonnancement opérationnel en un temps minimum pour un horizon à long terme/multi-période d'un système complexe est une valeur à ajouter à notre modèle MILP-continue.

De plus, les autres informations concernant les nombres des contraintes, variables binaires et continus sont tous mentionnés dans le tableau 5.8.

5.4 Analyse de sensibilité

La contribution de notre étude consiste principalement à satisfaire les demandes fluctuantes au moment souhaité avec la qualité requise à un coût d'exploitation minimum sur un horizon à long terme composé de plusieurs périodes. Dans cette circulation, nous proposons une analyse de sensibilité pour tester l'effet des variations de la demande sur la solution optimale.

Différents scénarios sont testés en faisant varier :

- **Scénario (i)** : La demande de produit le plus consommable par les clients qu'est le produit p_1 , et
- **Scénario (ii)** : Les demandes de tous les produits.

A chaque scénario, nous varions les demandes présentées dans le tableau [5.1](#) avec un ratio $\alpha\%$.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux [5.9](#) et [5.10](#). Le tableau [5.9](#) contient les scénarios de variation des demandes de produit p_1 où on a varié la demande principale " S_0 " dans deux intervalles : $[-5\%, -0.5\%]$ et $[+0.5\%, +5\%]$ avec un pas de $\pm 0.5\%$. La même technique de variation est appliquée dans la partie de variation des demandes de tous les produits où on a varié la demande de chaque produit p présentée dans le tableau [5.1](#) dans les intervalles $[-50\%, -5\%]$ et $[+5\%, +50\%]$ avec un pas de $\pm 5\%$ (tableau [5.10](#)).

La première remarque à observer dans les tableaux [5.9](#) et [5.10](#) est que la diminution (respectivement augmentation) de la demande diminuée (respectivement augmentée) le coût total d'exploitation de pipeline et le nombre de batches pompés par la raffinerie. L'évolution du coût total du système d'exploitation du pipeline est principalement due à l'ajustement de la taille des batches pompés afin de répondre à la demande des clients des centres. De plus, l'évolution du nombre total de batches inclus dans la séquence optimale d'injection modifie le nombre d'interfaces, le volume de contamination et donc leur coût total d'interfaces.

Dans le scénario (i), notre analyse de sensibilité, révèle que le modèle MILP d'ordonnement de pipeline d'ASR /multi-produit est sensible à la variation de la demande de produit (P_1), à partir de valeur -1.5% , le nombre total des nouveaux baches devient égal à 16 ($|I^{new}| = 16$), et il reste la même

pendant l'intervalle de variation $[-1.5\%, -5\%]$. En ce qui concerne, le test de $\pm 0.5\%$ et -1% le nombre des batches pompées est resté le même que dans le planning initial ($|I^{new}| = 17$). Et donne l'intervalle $[1\%, 5\%]$ le nombre optimal de $|I^{new}|$ augmenté par 1.

Concernant le **scénario (ii)**, le planning optimal est sensible à la varia-

| Scénario (i) | α | Coût total | $ I^{new} $ |
|----------------|-------------|------------------|-------------|
| $S_{P_1,-5}$ | -5% | 321877.00 | 16 |
| $S_{P_1,-4.5}$ | -4.5% | 322680,25 | 16 |
| $S_{P_1,-4}$ | -4% | 324192.25 | 16 |
| $S_{P_1,-3.5}$ | -3.5% | 325704,25 | 16 |
| $S_{P_1,-3}$ | -3% | 327216,25 | 16 |
| $S_{P_1,-2.5}$ | -2.5% | 328728,25 | 16 |
| $S_{P_1,-2}$ | -2% | 330240,25 | 16 |
| $S_{P_1,-1.5}$ | -1.5% | 331752,25 | 16 |
| $S_{P_1,-1}$ | -1% | 333264,25 | 17 |
| $S_{P_1,-0.5}$ | -0.5% | 334776,25 | 17 |
| S_0 | + 0% | 336288.25 | 17 |
| $S_{P_1,+0.5}$ | + 0.5% | 337800.25 | 17 |
| $S_{P_1,+1}$ | + 1% | 339364.75 | 18 |
| $S_{P_1,+1.5}$ | + 1.5% | 340878.25 | 18 |
| $S_{P_1,+2}$ | + 2% | 342390.25 | 18 |
| $S_{P_1,+2.5}$ | + 2.5% | 343858.368 | 18 |
| $S_{P_1,+3}$ | + 3% | 345414.25 | 18 |
| $S_{P_1,+3.5}$ | + 3.5% | 346926.25 | 18 |
| $S_{P_1,+4}$ | + 4% | 348454.32 | 18 |
| $S_{P_1,+4.5}$ | + 4.5% | 349985.85 | 18 |
| $S_{P_1,+5}$ | + 5% | 351497.85 | 18 |

Table 5.9 – Résultats de sensibilité du modèle pour le scénario (i)

tion de demande à partir de $\pm 10\%$, le nombre optimal de $|I^{new}|$ change. Dans les scénarios $\pm 5\%$ le nombre de $|I^{new}|$ reste le même que scénario S_0 .

| Scénario (<i>ii</i>) | α | coût total | $ I^{new} $ |
|------------------------|----------|------------------|-------------|
| S_{-50} | -50% | 137196 | 8 |
| S_{-45} | -45% | 156633.80 | 8 |
| S_{-40} | -40% | 176761,25 | 9 |
| S_{-35} | -35% | 196709,975 | 10 |
| S_{-30} | -30% | 216363,6 | 11 |
| S_{-25} | -25% | 236376,475 | 12 |
| S_{-20} | -20% | 250581.35 | 13 |
| S_{-15} | -15% | 275727.575 | 14 |
| S_{-10} | -10% | 295633,9 | 16 |
| S_{-5} | -5% | 315986.375 | 17 |
| S_0 | + 0% | 336288.25 | 17 |
| S_{+5} | +5% | 356597.625 | 17 |
| S_{+10} | +10% | 376996.6 | 18 |
| S_{+15} | +15% | 397305.875 | 19 |
| S_{+20} | +20% | 417679.35 | 20 |
| S_{+25} | +25% | 438014.325 | 21 |
| S_{+30} | +30% | 458396.1 | 22 |
| S_{+35} | +35% | 479574.628 | 22 |
| S_{+40} | +40% | 499050,45 | 23 |
| S_{+45} | +45% | – | – |

Table 5.10 – Résultats de sensibilité du modèle pour le scénario (ii)

Nous montrons dans la figure 5.8 les séquences détaillées des S_0 , S_{+5} , S_{+10} et S_{+15} . Les séquence encadrée sur la figure 5.8 sélection ou il y'a un changement de contenu de batch par rapporte l'ordre des produits dans le scénario initial S_0 . Le changement de localisation des produits dans les batches de la séquence d'injection est principalement du à la satisfaction des demandes des clients.

Le scénario S_{+45} n'est pas réalisable (cf. 5.10) lorsque nous exécutons

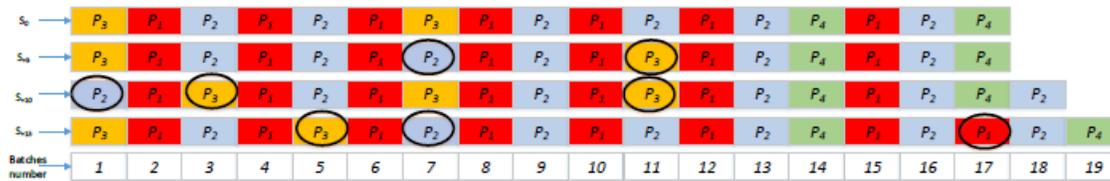


Figure 5.8 – Comparaison des séquences S_0 , S_{+5} , S_{+10} et S_{+15}

Le modèle pour le scénario S_{+45} , il donne une solution infaisable. La question que se pose pourquoi la solution n'est pas réalisable ?

a) Explication de in-faisabilité :

La longueur de l'horizon d'ordonnancement est de $672h$, le débit maximum qui peut être utilisé par la raffinerie pour injecter les produits est de $300m^3/h$, et si le système fonctionne avec la capacité maximum de la pompe il peut injecter une quantité qui égale à $201600m^3$ ($672h * 300m^3/h$). Le stock disponible dans les centres pouvant être transféré aux clients est de $229868.5m^3$. Dans ce cas, la quantité totale disponible est $(201600 + 229868.5)$. La demande totale reçue dans le scénario S_{+45} est de $235586,15m^3$. En comparant la demande et la quantité disponible, on constate que $235586,15m^3 \geq 229868.5m^3$. C'est ce qui conduit à donner une solution infaisable.

b) Solutions proposées

-Proposition 1

Dans la première proposition, nous avons supposé que nous commençons par des stocks initiaux égaux à les capacités maximales des réservoirs. Donc les quantités disponibles dans les centres sont passées de $229868,5m^3$ à $39259,5m^3$ impliquent que la quantité totale disponible par le système de pipeline atteint à $240859,5m^3$ et ce dernier pouvant satisfaire la demande des clients qui est égal à $229868,5m^3$. Dans ce contexte, l'exécution de modèle

MILP-continue donne une solution, où le coût total d'exploitation de système de pipeline est égal à 491880.825 unités de coût, et le nombre optimal de $|I^{new}|$ égale à 23 nouveaux batches.

Cette proposition permet d'améliorer le planning en ajoutant l'hypothèse suivante : l'horizon de planification terminé par un stock de haut niveau pour éviter le risque de pénurie des produits à l'horizon suivant. Cette proposition peut résoudre de nombreux cas mais elle n'est pas réalisable pour tous les problèmes.

-Proposition 2

Une autre façon de résoudre ce scénario consiste à augmenter la capacité de pompage pour atteindre un débit d'injection compris entre $[0; 400]m^3/heure$. Cette modification permet d'obtenir une solution optimale pour le scénario S_{+45} avec un coût total égal à 519412,325 unité de coût et 24 nouveaux lots a injecté.

5.5 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre pipeline de cas d'étude existant en Algérie qu'est le pipeline ASR/ multi-produit de compagnie Sonatrach, Le ASR pipeline responsable d'approvisionnement de quatre types des carburants destinés aux différents véhicules du transport et aux multiples usages industriels pour le marché énergétique de l'ouest et sud-ouest de l'Algérie. Ce système comprend une raffinerie reliée à deux centres de stockage et de distribution par un pipeline droit unidirectionnel. Les résultats obtenus confirment l'efficacité de notre MILP-continue modèle, en représentation continue de résoudre les problèmes de terrain dans un temps de calcul raisonnable. Une analyse de sensibilité révèle qu'il est possible de satisfaire la demande va-

riable tout en respectant les contraintes de qualité, capacités des ressources et de coût.

6 Conclusion générale

Dans cette thèse, nous sommes intéressés à étudier l'un des problèmes existant en industrie pétrolière plus précisément dans la chaîne d'approvisionnement pétrolière en aval qui sont les problèmes d'ordonnancement de transport par pipeline multi-produit. Notre objectif principal est de développer une méthode d'optimisation permettant de modéliser l'ordonnancement de transport des carburants par pipeline multi-produit qui relie une raffinerie à plusieurs centres de stockage et de distribution localisés proche des marchés des clients afin de présenter un plan optimal détaillé qui contient toutes les informations de pompage, pipeline et réceptions. De plus, la gestion des réservoirs des centres est intégrée. La spécification de contribution présentée dans ce travail qui était publiée dans l'article de (83) consiste à considérer un horizon multi-période à long terme, la fin de chaque période représente une date d'échéance de livraison des demandes des centres où les retards de livraison des produits ne sont pas autorisés c'est-à-dire les demandes de chaque période doit d'être entièrement satisfait sans aucune permutation entre les périodes. Dans ce contexte, les demandes doivent être satisfaites au temps souhaité avec la qualité voulue à un coût d'exploitation de pipeline minimal tout en respectant les contraintes des capacités des ressources et de fonctionnement de système de pipeline.

Le choix de méthode d'optimisation consiste à sélectionner les points suivantes :

- **le type de modélisation utiliser** : généralement deux types de modélisation sont utilisés pour présenter les problèmes de planification et d'ordonnancement de pipeline multi-produit qui sont la programmation mathématique et la programmation par contraintes. Nous avons choisi la programmation mathématique à base de formulation MILP, en raison de flexibilité et les performances des algorithmes associés aux programma-

tions mathématiques spécialement la programmation linéaire en nombres mixtes (MILP) qui permet de modéliser un plan d'ordonnement optimal et adapté aux horizons à long terme ; Les résultats obtenus validaient notre choix de modélisation qui conduit à des résultats optimaux et dans une durée d'exécution rapide. En outre, d'après le chapitre 3, la plupart des articles publiés dans l'état de l'art ont utilisé la modélisation MILP/MINLP grâce à son efficacité, c'est ce que nous a motivé à choisir la formulation MILP et puisqu'il n'y a pas de non-linéarité dans le système de pipeline étudié.

- **Représentation du problème** : parallèlement au choix de type de modélisation, il est important de déterminer comment représenter le temps ? Dans notre système la représentation en temps continu est le plus préférable. En matière de fonctionnement du système : il est difficile d'établir des intervalles des temps discrets réalisables pour un pipeline qui transporte un grand nombre des batches des différents types des produits et dimensions. De plus, le pipeline soumis à un flux continu des produits indique qu'un plan optimal du système de pipeline doit prévoir les heures des débuts et des fins des pompages des batches de flux continu de produits (C'est-à-dire des variables des décisions et leurs valeurs déterminées par le modèle choisi), ceci est assez compliqué à réaliser par la représentation à temps discret puisque ces heures des débuts et de fin des pompages sont associées aux limites des intervalles fixés. En outre, la taille de formulation MILP en représentation continue est plus petite que la représentation discrète c'est parce que le point faible de cette dernière est le grand nombre des variables binaires utilisées, ce qui augmente le temps d'exécution et rend la résolution de gros problèmes modélisés par MILP - discret une tâche très difficile.
- **Méthode de résolution** : après le choix de type de modélisation et de représentation, le modèle MILP en représentation continue qu'était construit a été résolu par une méthode directe à base d'un algorithme

exact qu'est brunch & cute. Résoudre un problème d'ordonnancement opérationnel tel que le problème du transport par pipeline multiproduits nécessite de présenter une solution optimale où la bonne modélisation de ce problème aide à trouver un bon plan d'ordonnancement du système de pipeline dans un temps de calcul raisonnable. Dans cette thèse, logiciel IBM ILOG CPLEX à base de solveur CPLEX été utilisé pour le codage et l'exécution de notre MILP- continue modèle.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous avons intéressé à montrer les points suivants :

- L'importance de l'industrie pétrolière dans l'économie mondiale et leur impact sur les autres secteurs dans le but de visionner au lecteur l'importance globale de notre thèse.
- Montrer que le point important dans l'industrie pétrolière est la chaîne d'approvisionnement pétrolière et le challenge représenté dans sa gestion où l'optimisation joue un rôle vital pour assurer un approvisionnement continu des clients finaux de la chaîne. Les procédures d'implémentation d'optimisation sont toutes présentées en détail dans le chapitre 2.
- Spécifier le contexte de la recherche qui est l'optimisation de chaîne d'approvisionnement pétrolière en aval, particulièrement, les systèmes de transport par pipeline multi-produit où l'importance d'étudier les problèmes de SMPS est mentionnée dans le chapitre 2.

Les problèmes d'ordonnancement du transport par pipeline multi-produit sont récents, classés le troisième parmi les problèmes d'ordonnancement très étudiés dans les dernières années (24). Ils sont 100% des problèmes de train existants en monde réel des compagnies pétrolières. Au sein de chapitre 3, nous avons présenté les techniques de science académique qui peut aider à

améliorer le rendement de ce système par l'utilisation des méthodes et les outils d'optimisation puissants et adaptables avec la complexité des problèmes afin de présenter un plan d'ordonnement optimal en terme des coûts, satisfaction des clients et l'utilisation des ressources . Ensuite, nous avons présenté une revue de la littérature des articles publiés résumant comment les chercheurs ont adapté les techniques d'optimisation pour résoudre les problèmes de planification et ordonnancement des transports des carburants par le système de pipeline multi-produit.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté en détail dans la première partie : notre contribution, leur localisation par rapport les travaux existant où l'originalité de la contribution a été présenté et la description de problème étudié. Ensuite, dans la deuxième partie, les hypothèses et le modèle mathématique développé pour l'ordonnement de transport par pipeline multi-produit à base de programmation linéaire en nombre mixtes et en représentation continue (MILP-continue) sont présenté.

La possibilité d'avoir une étude de cas réelle a soutenu notre thèse, nous avons testé le modèle développé (MILP en représentation continue) dans un système de pipeline algérien responsable d'approvisionnement de quatre types des produits carburants (P1 : Gasoil (**GO**), P2 : Essence super(**SCA**), P3 :Essence normal (**CA**) et P4 : Essence sans plomb (**SP**)) en marchés des régions ouest et sud-ouest de l'Algérie, le système relie une raffinerie à deux centres de stockage et distribution par un pipeline droit. La présentation détail du système de pipeline ASR /multi-produit et data utilisés pour l'exécution de modèle sont présentés dans le chapitre 5. De plus, elle contient les résultats, discussion des résultats, et l'analyse de sensibilité pour des différents scénarios de fluctuations des demandes des clients.

L'objectif global de cette thèse de doctorat est de présenter un outil d'aide d'ordonnement du système du transport par pipeline multi-produit à base des techniques d'optimisation qui permet de présenter un bon plan opération-

nel avec un temps de calcul court ce qui permet d'aider les ingénieurs au niveau des compagnies pétrolières à bien utiliser ce système de pipeline et prendre les bonnes décisions aux bons moments. Nous avons publié cinq papiers dans des conférences internationales : un chapitre de livre dans Springer (74), trois papiers dans Le proceeding IEEE (84; 83; 85) et un papier dans la conférence STEMA 2017. un article était publié dans le journal computer & industrial engineering (83) **classe A, impacte factor 5.92, H.index 128**. De plus, nous avons eu la chance de présenter notre travail dans **International Federation of Operational Research Societies (IFORS)** . En outre, j'ai eu un bourse PNE de durée de 10 mois afin de compléter notre travaux dans laboratoire center of management study dans l'institut supérieur de technologie -Portugal (CEG-IST) sous la direction de professeur Relvas Susana. Nous avons attaqué une deuxième contribution concernant l'intégration de station de pompage et leur maintenance, ce travail a été soumis dans une revue internationale : The European Journal of Operational Recherche (EJOR).

Perspectives et Future recherches

La modélisation et l'approche proposée dans cette thèse sont basées sur l'utilisation des données déterministes, cette dernière représente une limite de notre proposition où le marché pétrolier connaît de fortes fluctuations en matière de production et de consommation, l'intégration de ces paramètres qui sont des types stochastiques permet d'améliorer le modèle proposé afin d'être flexible en variation de marché énergétiques.

plusieurs travaux peuvent être des extensions de ce travail

- Le modèle proposé peut être étendu pour résoudre l'ordonnancement d'un réseau des pipelines,
- L'intégration de planification des tâches de maintenance de pipeline dans le modèle proposé tel que les tâches de métayage de pipeline (maintenance préventive) et les arrêtes de pipeline à cause des fuites (mainte-

nances curatives),

- Améliorer le modèle en matière de gestion des réservoirs au niveau des centres de stockages par l'élimination d'hypothèse qui considère un seul réservoir de stockage pour chaque type de produit par la considération de nombre réel de recevoir de chaque type de produit dans les centres afin de gérer le flux d'entre et de sortie pour chaque réservoir.

- L'approche proposée peut trouver une difficulté de calcul si en augmente la taille de problème, la proposition d'une approche qui permet de présenter une solution raisonnable adaptable avec ces situations.

Bibliographie

- [1] P. Jittamai, "Analysis of oil-pipeline distribution of multiple products subject to delivery time-windows," Ph.D. dissertation, Texas A&M University, 2006.
- [2] N. Julka, I. Karimi, and R. Srinivasan, "Agent-based supply chain management—2 : a refinery application," *Computers & chemical engineering*, vol. 26, no. 12, pp. 1771–1781, 2002.
- [3] C. A. Méndez, J. Cerdá, I. E. Grossmann, I. Harjunkoski, and M. Fahl, "State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes," *Computers & chemical engineering*, vol. 30, no. 6-7, pp. 913–946, 2006.
- [4] V. G. Cafaro, D. C. Cafaro, C. A. Méndez, and J. Cerdá, "Detailed scheduling of operations in single-source refined products pipelines," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 10, pp. 6240–6259, 2011.
- [5] W. H. T. Meira, L. Magatão, S. Relvas, A. P. Barbosa-Póvoa, F. Neves Jr, and L. V. Arruda, "A matheuristic decomposition approach for the scheduling of a single-source and multiple destinations pipeline system," *European Journal of Operational Research*, vol. 268, no. 2, pp. 665–687, 2018.
- [6] T. M. T. Lopes, A. A. Ciré, C. C. de Souza, and A. V. Moura, "A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem," *Constraints*, vol. 15, no. 2, pp. 151–189, 2010.
- [7] Z. Haoran, L. Yongtu, L. Qi, S. Yun, and Y. Xiaohan, "A self-learning approach for optimal detailed scheduling of multi-product pipeline," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 327, pp. 41–63, 2018.

- [8] S. Lisitsa, A. Levina, and A. Lepekhin, "Supply-chain management in the oil industry," in *E3S Web of Conferences*, vol. 110. EDP Sciences, 2019, p. 02061.
- [9] C. M. Chima *et al.*, "Supply-chain management issues in the oil and gas industry," *Journal of Business & Economics Research (JBER)*, vol. 5, no. 6, 2007.
- [10] K. Hassen and D. Szucs, "Supply chain optimization in the oil industry : A case study of mol hungarian oil and gas plc," 2012.
- [11] G. P. Jenkins and D. S. Wright, "Managing inflexible supply chains," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 9, no. 2, pp. 83–90, 1998.
- [12] E. Anderson, "Supply chain strategy in the oil and gas sector," *Exploration & Production : The Oil & Gas Review* <http://www.touchoilandgas.com/supply-chainstrategy-sector-a84-1.html>, 2003.
- [13] O.-P. Hilmla, "Logistics sector development potential of world's oil exporters," *International Journal of Energy Sector Management*, 2011.
- [14] M. Christopher, *Logistics & supply chain management*. Pearson Uk, 2016.
- [15] R. Hussain, T. Assavapokee, and B. Khumawala, "Supply chain management in the petroleum industry : challenges and opportunities," *International Journal of Global Logistics & Supply Chain Management*, vol. 1, no. 2, pp. 90–97, 2006.
- [16] M. Gainsborough, "Building world-class supply chain capability in the downstream oil business," *Oil and Gas Processing Review*, pp. 29–32, 2006.
- [17] D. Dimas, V. V. Murata, S. M. Neiro, S. Relvas, and A. P. Barbosa-Póvoa, "Multiproduct pipeline scheduling integrating for inbound and outbound inventory management," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 115, pp. 377–396, 2018.

- [18] H. Mostafaei and P. M. Castro, "Continuous-time scheduling formulation for straight pipelines," *AIChE Journal*, vol. 63, no. 6, pp. 1923–1936, 2017.
- [19] A. Grigoriev and N. V. Grigorieva, "The valve location problem : Minimizing environmental damage of a spill in long oil pipelines," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57, no. 3, pp. 976–982, 2009.
- [20] V. Cafaro, D. C. Cafaro, C. A. Mendez, and J. Cerda, "Detailed scheduling of oil products pipelines with parallel batch inputs at intermediate sources," 2013.
- [21] S. Vlot, "Batch scheduling of multi-product pipeline networks," 2017.
- [22] R. Barzin, J. J. Chen, B. R. Young, and M. M. Farid, "Peak load shifting with energy storage and price-based control system," *Energy*, vol. 92, pp. 505–514, 2015.
- [23] S. Mitra, L. Sun, and I. E. Grossmann, "Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under time-sensitive electricity prices," *Energy*, vol. 54, pp. 194–211, 2013.
- [24] M. E. Coccola, V. G. Cafaro, C. A. Mendez, and D. C. Cafaro, "Enhancing the general precedence approach for industrial scheduling problems with sequence-dependent issues," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 44, pp. 17 092–17 097, 2014.
- [25] B. N. Nnadili, "Supply and demand planning for crude oil procurement in refineries," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [26] G. Ribas, A. Leiras, and S. Hamacher, "Tactical planning of the supply chain : Optimization under uncertainty," *XLIII Simposio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, vol. 15, no. 18, pp. 17–29, 2011.
- [27] M. C. Carneiro, G. P. Ribas, and S. Hamacher, "Risk management in the oil supply chain : a cvar approach," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 7, pp. 3286–3294, 2010.

- [28] R. Cigolini and T. Rossi, "Managing operational risks along the oil supply chain," *Production Planning and Control*, vol. 21, no. 5, pp. 452–467, 2010.
- [29] H. Sahebishahemabadi, "Strategic and tactical crude oil supply chain : Mathematical programming models," 2013.
- [30] H. Sahebi, S. Nickel, and J. Ashayeri, "Strategic and tactical mathematical programming models within the crude oil supply chain context—a review," *Computers & chemical engineering*, vol. 68, pp. 56–77, 2014.
- [31] C. Lima, S. Relvas, and A. P. F. Barbosa-Póvoa, "Downstream oil supply chain management : A critical review and future directions," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 92, pp. 78–92, 2016.
- [32] A. Leibel, C. Seagram, C. McMann, M. McLellan, H. Oliveira, T. Savaliya, and K. Bhandal, "Transportation of oil and gas."
- [33] R. Ganeshan, "An introduction to supply chain management," http://lcm.csa.iisc.ernet.in/scm/supply_chain_intro.html, 1995.
- [34] D. Simchi-Levi and Y. Zhao, "The value of information sharing in a two-stage supply chain with production capacity constraints," *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 50, no. 8, pp. 888–916, 2003.
- [35] A. M. Janvier-James, "A new introduction to supply chains and supply chain management : Definitions and theories perspective," *International Business Research*, vol. 5, no. 1, pp. 194–207, 2012.
- [36] P. Pardalos and J. Geunes, "Supply chain optimization," *University of Florida*, pp. 275–278, 2005.
- [37] D. Szucs and K. Hassen, "Supply chain optimization in the oil industry : a case study of mol hungarian oil and gas plc," *Jonkoping International Business School, Jonkoping*, 2012.
- [38] J. C. Camillus, *Strategic planning and management control : Systems for survival and success*. Lexington Books, 1986.

- [39] C. M. Piotrowski, *Interior Design Management : A Handbook for Owners and Managers*. John Wiley & Sons, 1992.
- [40] D. C. Cafaro and J. Cerda, "Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 32, no. 4-5, pp. 728–753, 2008.
- [41] S. Relvas, A. P. F. Barbosa-Póvoa, and H. A. Matos, "Heuristic batch sequencing on a multiproduct oil distribution system," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 712–730, 2009.
- [42] S. MirHassani, M. Abbasi, and S. Moradi, "Operational scheduling of refined product pipeline with dual purpose depots," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, no. 8, pp. 5723–5742, 2013.
- [43] H. Mostafaei, Y. Alipouri, and J. Shokri, "A mixed-integer linear programming for scheduling a multi-product pipeline with dual-purpose terminals," *Computational and Applied Mathematics*, vol. 34, no. 3, pp. 979–1007, 2015.
- [44] D. C. Cafaro and J. Cerda, "A rigorous mathematical formulation for the scheduling of tree-structure pipeline networks," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 9, pp. 5064–5085, 2010.
- [45] H. Mostafaei, P. M. Castro, and A. Ghaffari-Hadigheh, "A novel monolithic milp framework for lot-sizing and scheduling of multiproduct treelike pipeline networks," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 54, no. 37, pp. 9202–9221, 2015.
- [46] D. C. Cafaro and J. Cerda, "Rigorous scheduling of mesh-structure refined petroleum pipeline networks," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 38, pp. 185–203, 2012.
- [47] P. Van Hentenryck, *Constraint satisfaction in logic programming*. MIT press, 1989.

- [48] I. J. Lustig and J.-F. Puget, "Program does not equal program : Constraint programming and its relationship to mathematical programming," *Interfaces*, vol. 31, no. 6, pp. 29–53, 2001.
- [49] C. A. Floudas and X. Lin, "Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes : a review," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, no. 11, pp. 2109–2129, 2004.
- [50] R. Bixby and E. Rothberg, "Progress in computational mixed integer programming—a look back from the other side of the tipping point," *Annals of Operations Research*, vol. 149, no. 1, pp. 37–41, 2007.
- [51] M. V. Magalhaes, E. T. Fraga, and N. Shah, "Refinery scheduling," 2004.
- [52] R. Techo and D. Holbrook, "Computer scheduling worlds biggest product pipeline," *PIPELINE & GAS JOURNAL*, vol. 201, no. 5, pp. 27–32, 1974.
- [53] C. A. Hane and H. D. Ratliff, "Sequencing inputs to multi-commodity pipelines," *Annals of Operations Research*, vol. 57, no. 1, pp. 73–101, 1995.
- [54] M. Sasikumar, P. R. Prakash, S. M. Patil, and S. Ramani, "Pipes : A heuristic search model for pipeline schedule generation," *Knowledge-Based Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 169–175, 1997.
- [55] R. Rejowski Jr and J. M. Pinto, "Scheduling of a multiproduct pipeline system," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 27, no. 8-9, pp. 1229–1246, 2003.
- [56] ———, "Efficient milp formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, no. 8, pp. 1511–1528, 2004.
- [57] D. C. Cafaro and J. Cerdá, "Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete milp formulation," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, no. 10, pp. 2053–2068, 2004.

- [58] L. Magatão, L. Arruda, and F. Nevesxe Jr, "Using clp and milp for scheduling commodities in a pipeline," in *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, 2005, vol. 20, pp. 1027–1032.
- [59] S. Relvas, H. A. Matos, A. P. F. Barbosa-Póvoa, J. Fialho, and A. S. Pinheiro, "Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 45, no. 23, pp. 7841–7855, 2006.
- [60] S. Relvas, H. A. Matos, A. P. F. Barbosa-Póvoa, and J. Fialho, "Reactive scheduling framework for a multiproduct pipeline with inventory management," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 46, no. 17, pp. 5659–5672, 2007.
- [61] R. Rejowski Jr and J. M. Pinto, "A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 32, no. 4-5, pp. 1042–1066, 2008.
- [62] D. C. Cafaro and J. Cerda, "Efficient tool for the scheduling of multiproduct pipelines and terminal operations," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 47, no. 24, pp. 9941–9956, 2008.
- [63] ———, "Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 48, no. 14, pp. 6675–6689, 2009.
- [64] A. Herrán, F. Defersha, M. Chen, and J. Cruz, "An integrated multi-period planning of the production and transportation of multiple petroleum products in a single pipeline system," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 2, no. 1, pp. 19–44, 2011.
- [65] S. MirHassani, S. Moradi, and N. Taghinezhad, "Algorithm for long-term scheduling of multiproduct pipelines," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 50, no. 24, pp. 13 899–13 910, 2011.

- [66] V. G. Cafaro, D. C. Cafaro, C. A. Mendez, and J. Cerda, "Detailed scheduling of single-source pipelines with simultaneous deliveries to multiple offtake stations," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 17, pp. 6145–6165, 2012.
- [67] S. Relvas, S. N. B. Magatão, A. P. F. Barbosa-Póvoa, and F. Neves Jr, "Integrated scheduling and inventory management of an oil products distribution system," *Omega*, vol. 41, no. 6, pp. 955–968, 2013.
- [68] D. C. Cafaro and J. Cerdá, "Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 34, no. 10, pp. 1687–1704, 2010.
- [69] H. Mostafaei and A. Ghaffari Hadigheh, "A general modeling framework for the long-term scheduling of multiproduct pipelines with delivery constraints," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 17, pp. 7029–7042, 2014.
- [70] V. G. Cafaro, D. C. Cafaro, C. A. Méndez, and J. Cerdá, "Minlp model for the detailed scheduling of refined products pipelines with flow rate dependent pumping costs," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 72, pp. 210–221, 2015.
- [71] A. Zaghian and H. Mostafaei, "An milp model for scheduling the operation of a refined petroleum products distribution system," *Operational Research*, vol. 16, no. 3, pp. 513–542, 2016.
- [72] S. Moradi and S. MirHassani, "Robust scheduling for multi-product pipelines under demand uncertainty," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, no. 9-12, pp. 2541–2549, 2016.
- [73] T. Kirschstein, "Planning of multi-product pipelines by economic lot scheduling models," *European Journal of Operational Research*, vol. 264, no. 1, pp. 327–339, 2018.
- [74] W. Abdellaoui, A. Berrichi, D. Bennacer, F. Maliki, and L. Ghomri, "Optimal scheduling of multiproduct pipeline system using milp continuous

- approach,” in *IFIP International Conference on Computational Intelligence and Its Applications*. Springer, 2018, pp. 411–420.
- [75] S. Moradi, S. MirHassani, and F. Hooshmand, “Efficient decomposition-based algorithm to solve long-term pipeline scheduling problem,” *Petroleum Science*, vol. 16, no. 5, pp. 1159–1175, 2019.
- [76] M. Quinteros, M. Guignard, A. Weintraub, M. Llambias, and C. Tapia, “Optimizing the pipeline planning system at the national oil company,” *European Journal of Operational Research*, vol. 277, no. 2, pp. 727–739, 2019.
- [77] H. Mostafaei, P. M. Castro, S. Relvas, and I. Harjunoski, “A holistic milp model for scheduling and inventory management of a multiproduct oil distribution system,” *Omega*, p. 102110, 2019.
- [78] M. Bamoumen, S. Belil, S. Elfirdoussi, L. Ren, and N. Tchernev, “A hybrid heuristic for the multi-product straight pipeline scheduling problem,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 535–540, 2019.
- [79] X. Zhou, P. van Gelder, Y. Liang, and H. Zhang, “An integrated methodology for the supply reliability analysis of multi-product pipeline systems under pumps failure,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 204, p. 107185, 2020.
- [80] S. MirHassani and M. Ghorbanalizadeh, “The multi-product pipeline scheduling system,” *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 891–897, 2008.
- [81] S. N. Boschetto, L. Magatão, W. M. Brondani, F. Neves-Jr, L. V. Arruda, A. P. Barbosa-Póvoa, and S. Relvas, “An operational scheduling model to product distribution through a pipeline network,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 12, pp. 5661–5682, 2010.
- [82] Q. Liao, H. Zhang, Y. Wang, W. Zhang, and Y. Liang, “Heuristic method for detailed scheduling of branched multiproduct pipeline networks,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 140, pp. 82–101, 2018.

- [83] W. Abdellaoui, M. Souier, M. Sahnoun, and F. B. Abdelaziz, "Multi-period optimal schedule of a multi-product pipeline : A case study in algeria," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 159, p. 107483, 2021.
- [84] W. Abdellaoui, M. Souier, and S. M'hammed, "Modeling the scheduling of a multi products pipeline : A case study in algeria," in *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [85] A. Wassila, R. Susana, S. Mehdi *et al.*, "Scheduling of multi product/multi-pump pipeline distribution system," in *2021 1st International Conference On Cyber Management And Engineering (CyMaEn)*. IEEE, 2021, pp. 1–4.

Résumé :

Dans cette thèse de doctorat, nous nous sommes intéressés à étudier un problème d'ordonnancement opérationnel d'un système de transport énergétique pour un horizon à long terme/ multi-période. Le système étudié comprend un pipeline droit multi-produit qui relie une raffinerie à plusieurs centres de stockage et distribution des carburants localisés dans des différents endroits le long du pipeline et proche des stations-service des clients. Une formulation mathématique à base de programmation linéaire à nombres mixtes, en représentation continue (MILP-continue) est développée pour modéliser l'ordonnancement de notre système et résolue à l'aide d'une méthode exacte à base d'algorithme branch and cut. L'approche proposée vise à présenter un plan d'ordonnancement optimal qui satisfait les demandes des différents centres de distribution en temps désiré sans aucun retard de livraison, en respectant les exigences de qualité des produits, les capacités des ressources du système et le coût opérationnel de pipeline qui consiste à minimiser les coûts des interfaces et de pompes. Nous avons testé notre modèle à un pipeline d'ASR /multi-produit d'une compagnie pétrolière algérienne responsable d'approvisionnement des marchés des carburants pour les régions de l'ouest et du sud-ouest de l'Algérie. Le MILP modèle a réussi à fournir un plan d'ordonnancement efficace qui satisfait les demandes périodiques tout en respectant les contraintes opérationnelles du système.

Mots clés : transport énergétique, ordonnancement multi-période, pipeline multi-produit, MILP-continue, optimisation

Abstract

In this doctoral thesis, we are interested to study the operational scheduling problem of an energy transportation system for a multi-period / long-term horizon. The system studied comprises a straight multi-product pipeline that connects a refinery to several storage and fuels distribution centers placed in different locations along the pipeline and close to customer service stations. A mathematical formulation based on the mixed-integer linear programming model in continuous representation (MILP-continuous) is developed to model the scheduling of our system and solved using an exact method based on the branch & cut algorithm. The proposed approach aims to present an optimal scheduling plan that meets the demands of the different distribution centers on time without any delay in delivery, respecting the requirements of the product's qualities, the capacities of the system resources, and pipeline operational cost which consists in minimizing the costs of interfaces and pumping. We tested our model at an ASR / multi-product pipeline from an Algerian oil company responsible for supplying fuel markets in the western and southwestern regions of Algeria. The model MILP has been successful in providing an efficient scheduling plan that meets periodic demands while respecting the operational constraints of the system.

Keywords: energy transportation, multi-period scheduling, multi-product pipeline, MILP-continues, optimization

المخلص

في أطروحة الدكتوراه هذه، نحن مهتمون بدراسة مشكلة الجدولة التشغيلية لنظام نقل الطاقة لأفق طويل الأجل / متعدد الفترات. يشمل النظام المدروس على خط أنابيب متعدد المنتجات يربط مصفاة بالعديد من مراكز تخزين وتوزيع الوقود الموجودة في مواقع مختلفة على طول خط الأنابيب وبالقرب من محطات خدمة العملاء. تم تطوير صيغة رياضية تعتمد على برمجة الأرقام المختلطة الخطية في التمثيل المستمر لنموذج جدولة نظام المدروس وتم حلها باستخدام طريقة دقيقة تعتمد على خوارزمية الفروع والقطع. تهدف الطريقة المقترحة إلى تقديم خطة جدولة مثالية تلبي متطلبات مراكز التوزيع في الوقت المحدد دون أي تأخير في التسليم مع مراعاة متطلبات جودة المنتج وقدرات موارد النظام والتكلفة التشغيلية لخط الأنابيب حيث تتضمن تقليل تكاليف الواجهات والضخ. اختبرنا النموذج المقترح في خط أنابيب متعدد المنتجات من شركة نفط جزائرية مسؤولة عن إمداد أسواق الوقود للمناطق الغربية والجنوبية الغربية من الجزائر. لقد نجح نموذجنا في توفير خطة جدولة فعالة تلبي المتطلبات الدورية بالإضافة إلى احترام قيود تشغيل النظام.

كلمات مفتاحية: نقل الطاقة، جدولة متعددة الفترات، خط أنابيب متعدد المنتجات، تحسين