



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة أبي بكر بالكايد- تلمسان

Université Aboubakar Belkaïd Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **Master**

En : **Génie Industriel**

Spécialité : **Chaine logistique & Ingénieur de production**

Intitulé

Amélioration des performances d'un système du transport des carburants

Réalisé par : ZINE Moussa & BENSARI Ayoub

Soutenance publique effectuée le 25 juin 2025, devant le jury composé comme suit :

Mme. TRIQUI, Lamia	Professeur	Université de Tlemcen	
Mme. GAUAR Nihad	MCB	Université de Tlemcen	
Mme. MANADJLIA Nardjisse	MCB	Université de Tlemcen	
Mme ABDELLAOUI Wassila	MCB	Université de Tlemcen	Encadrant
Mr. SAHNOUN M'hammed	MC, HDR	LINEACT laboratory CESI, France	Co- Encadrant

Année universitaire 2024-2025

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, le Clément et le Miséricordieux, qui m'a accordé la patience, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa guidance et Sa bénédiction, ce projet n'aurait pu voir le jour.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.

Je remercie sincèrement mes encadrants, M. ABDELLAOUI Wassila et Mr. SAHNOUN M'hammed , pour son accompagnement, sa disponibilité et la richesse de ses conseils. Sa rigueur et ses remarques constructives m'ont permis d'avancer avec méthode et de mieux structurer mon travail.

Je remercie également les membres du jury pour l'attention portée à mon mémoire, ainsi que pour leurs observations et suggestions précieuses qui enrichissent cette recherche.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de l'équipe pédagogique, pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de mon parcours, et pour leur engagement à transmettre leur savoir avec passion.

Je n'oublie pas mes collègues et camarades, avec qui j'ai partagé des moments de travail, de réflexion mais aussi de soutien mutuel, et qui ont contribué à rendre cette expérience plus enrichissante et humaine.

Je suis profondément reconnaissant envers ma famille, en particulier mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières, leur patience et leurs encouragements constants. Leur confiance en moi a été un pilier fondamental dans l'aboutissement de ce projet.

Enfin, je remercie tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont apporté leur aide, leur soutien moral ou technique tout au long de ce travail.

Qu'Allah les récompense tous pour leur bienveillance.

— *Merci infiniment.*

Dédicace

Je dédie ce mémoire à Allah, le Très-Haut,
Source de toute sagesse, de toute force et de toute réussite.
C'est par Sa volonté que ce travail a pu être mené à terme.

Je le dédie de tout cœur à mes très chers parents,
Qui ont été mes premières sources d'inspiration et de motivation.
Votre amour, vos prières silencieuses, vos sacrifices et votre
patience

Ont été les fondations de mon chemin.

Je n'oublierai jamais tout ce que vous avez fait pour moi.
À mes enseignants, à mes encadrants, et à tous ceux qui ont croisé
ma route académique,
Je vous dédie ce travail comme témoignage de ma reconnaissance.

À mes amis fidèles,

Qui m'ont épaulé dans les moments difficiles et célébré mes
petites victoires,

Merci pour votre amitié sincère et vos encouragements constants.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon ami Amin,
Pour son soutien précieux, sa bienveillance et sa présence constante
tout au long de ce parcours.

Enfin, je dédie ce travail à moi-même,
Pour avoir tenu bon, même quand le chemin paraissait incertain.

Abréviations

CPP	Chaîne d'approvisionnement pétrolière
SCM	Gestion de la chaîne logistique
DSC	Chaîne d'approvisionnement en aval
SMP	Système multi-produit
MILP/MINLP	Programmation linéaire (ou non linéaire) en variables mixtes
MILP/MINLP continue	Programmation linéaire (ou non linéaire) en variables mixtes, représentation continue
MILP/MINLP discrète	Programmation linéaire (ou non linéaire) en variables mixtes, représentation discrète
PM	Programmation mathématique
LP	Programmation linéaire
NLP	Programmation non linéaire
CP	Programmation par contraintes
SMPS	Ordonnancement du transport multi-produit par pipeline
SMPSP	Problème d'ordonnancement du transport multi-produit par pipeline

SOMMAIRE :

INTRODUCTION GENERALE	9
1. L'INDUSTRIE PETROLIERE (IP).....	11
1.1 Introduction	11
1.2 Historique et évolution de l'industrie pétrolière	12
1.3 Les chaînes d'approvisionnement pétrolières (CPP)	15
1.4 Transport dans la CPP	18
1.5 Challenges des CPP	23
1.6 Les enjeux et défis de l'industrie pétrolière	24
1.7 Conclusion.....	27
2. ETAT DE L'ART	29
2.1 Introduction	29
2.2 Ordonnancement du transport multi-produit par pipeline (SMPS).....	29
2.3 Travaux existants sur le problème SMPS	38
2.4 Analyse des résultats de la revue de littérature.....	46
2.5 Conclusion.....	47
3. MODELISATION MATHEMATIQUE	49
3.1 Introduction	49
3.2 Présentation de problème	49
3.3 Modélisation mathématique	50
3.4 La fonction objective	52
3.5 Contraintes.....	52
3.6 Conclusion.....	57
4. CAS D'ETUDE ET RESULTATS.....	59

4.1 Introduction	59
4.2 Présentation de cas d'étude	59
4.3 Résultats et Interprétation.....	60
4.4 Séquence et caractéristiques des injections.....	62
4.5 Évolution des stocks et livraisons.....	66
4.6 Conclusion.....	68
CONCLUSION GENERALE	71
REFERENCES	73

Table de Figure :

Figure 1.1: Évolution de la consommation mondiale d'énergie entre 1970-2020	13
Figure 1.2: Structure de la chaîne de valeur pétrolière.....	16
Figure 1.3: Localisation des réservoirs d'hydrocarbures par méthode sismique 3D	17
Figure 1.4: Catégories de pétroliers selon la capacité de chargement	21
Figure 1.5: Volume d'interface résulte intérieur de pipeline	23
Figure 2.1: Modèle de Pipeline Linéaire avec Points de Prélèvement et d'Injection vers des Centres de Stockage Décentralisés	30
Figure 2.2: Structure Arborescente d'un Réseau de Transport par Pipeline Alimenté par une Raffinerie Unique	31
Figure 2.3: Schéma d'un Réseau de Pipelines Multi-Sources et Multi-Destinations	31
Figure 2.4: Processus de fonctionnement de PM	33
Figure 2.6: Illustration de la Représentation en Temps Discret de l'Injection Séquencée de Lots (Batchs) dans un Pipeline	35
Figure 2.7: Processus de fonctionnement de PM	40
Figure 3.1: Modèle de Distribution de pipeline multi-produits en Aval.....	50
Figure 4.2: évolution de la fonction objective au cours du temps	62
Figure 4.3: la Séquence de pompage	62
Figure 4.4: Planning d'ordonnancement de pipeline d'ASR.....	64

Liste des Tableau :

Tableau 1.1:Pays membres de l'OPEP et années d'adhésion.....	14
Tableau 1.2 Analyse comparative des coûts unitaires selon les modes de transport des hydrocarbures.....	18
Tableau 2.1:Comparaison des Configurations de Réseaux de Pipelines selon leur Complexité, Flexibilité et Domaine d'Application	32
Tableau 4.1:Demande des centres de distribution des carburants	59
Tableau 4.2:Capacitésdestockagemaximum/minimumetstock initialdans.....	60
Tableau 4.3:Coûtsetvolumesdes interfaces.....	60
Tableau 4.4:Caractéristiques du modèle MILP et indicateurs de résolution	61
Tableau 4.6:Volumes initiaux des lots injectés.....	65
Tableau 4.7:Début et durée d'injection de chaque lot.....	65



Introduction Générale

Introduction Générale

L'industrie pétrolière occupe une place stratégique essentielle dans l'économie mondiale contemporaine, jouant un rôle central non seulement en matière d'approvisionnement en énergie, mais aussi en fournissant des matières premières à une multitude de secteurs industriels. Depuis le XIXe siècle, avec la découverte du pétrole et son exploitation à grande échelle, cette industrie a profondément influencé le développement économique mondial. Le pétrole, en raison de sa haute densité énergétique et de sa relative facilité de transport et de stockage, est devenu une ressource incontournable, représentant une part importante de l'énergie consommée à l'échelle mondiale. À titre d'exemple, environ 100 millions de barils de pétrole sont utilisés chaque jour dans le monde pour répondre à des besoins énergétiques variés tels que les carburants, la production d'électricité, ou encore le chauffage.

Toutefois, l'industrie pétrolière est confrontée à des défis considérables, notamment en ce qui concerne la gestion de sa chaîne logistique, et plus spécifiquement le transport des carburants. La logistique pétrolière est un processus complexe qui nécessite l'intégration d'infrastructures diverses et sophistiquées, telles que des pipelines, des navires, des camions et des trains, pour assurer un approvisionnement stable et sécurisé. Le système de transport par pipelines, en particulier, est un maillon essentiel de cette chaîne, permettant le transport de grandes quantités de produits sur des distances longues avec une relative sécurité. Cependant, ce système, bien que plus économique et plus sûr que d'autres modes de transport, est également confronté à de nombreux défis, notamment en ce qui concerne l'optimisation des flux, la gestion des interfaces entre les produits, la prévention des pertes et la minimisation des risques environnementaux.

Le but principal de ce mémoire est d'explorer et d'analyser les performances des systèmes de transport des carburants, en particulier ceux utilisant des pipelines multi-produits. En effet, le transport multi-produit par pipeline est une méthode couramment utilisée pour acheminer différents types de produits raffinés, comme l'essence, le diesel, le kérosène, entre autres, au sein d'un même réseau. Ce mode de transport, tout en offrant de nombreux avantages, présente néanmoins des défis opérationnels spécifiques liés à la gestion des interfaces entre les différents produits transportés et à l'optimisation des séquences de transport. À cet égard, ce travail se propose de modéliser et d'optimiser les processus d'ordonnement dans ces systèmes, en utilisant une modélisation mathématique à base de programmation mathématique en nombre entier par utilisation de représentation continue MILP-Continue afin de minimiser le coût opérationnel de système tenu en compte les contraintes de fonctionnements.

Le mémoire est structuré comme suit :

- **Chapitre 1** : Dresse un aperçu général de l'industrie pétrolière.
- **Chapitre 2** : Présente le problème SMPS et effectue une revue de la littérature.
- **Chapitre 3** : Expose notre contribution et détaille le modèle mathématique proposé visant un plan d'ordonnement optimal.
- **Chapitre 4** : Présente l'étude de cas et analyse les résultats obtenus.



Chapitre I : L'Industrie Pétrolière (IP)

1. L'Industrie Pétrolière (IP)

1.1 Introduction

Le pétrole reste une source majeure d'énergie et de matières premières pour de nombreux secteurs industriels, et son rôle en tant que ressource pétrolière pour soutenir l'économie mondiale est d'une importance capitale. On estime qu'environ 100 millions de barils de pétrole sont utilisés chaque jour à l'échelle mondiale [10] ou plus précisément, brûlés pour alimenter des véhicules, générer de l'électricité, chauffer des maisons et fournir des matières premières pour les industries chimiques. L'approvisionnement en ressources énergétiques est très stratégique, et il est essentiel de maintenir un approvisionnement fiable de ces ressources. Depuis le 20ème siècle, l'industrie pétrolière a été un pilier de l'essor industriel du monde. Elle repose sur un réseau logistique sophistiqué. La chaîne d'approvisionnement pétrolière (CPP), qui comprend tout, de l'exploration géologique des gisements de pétrole au marketing des produits raffinés, nécessite d'importantes infrastructures telles que des pipelines, des pétroliers, des trains et des camions nécessaires au transport du pétrole brut vers les centres de consommation [11]. Cela constitue le cœur de l'industrie, où les dépenses en logistique dépassent les dépenses d'extraction, voire de production, de pétrole [11].

Dès les années 1950, le pétrole s'est hissé au premier rang des sources d'énergie, représentant encore aujourd'hui environ 30 % de l'énergie primaire consommée au niveau mondial. Son hégémonie repose sur plusieurs atouts : une densité énergétique élevée ainsi qu'une facilité relative de transport et de stockage. La polyvalence d'usage (carburants, chauffage, pétrochimie) le distingue des autres ressources. Cette dépendance des transports - automobiles, camions, avions - à cette ressource, renforce son importance, au point que la fluctuation du marché pétrolier influe directement sur la croissance économique, le taux d'inflation et les balances commerciales d'un pays.

Les chaînes d'approvisionnement sont complexes car elles sont internationales et comprennent une large gamme de composants techniques et commerciaux. Le forage de pétrole se fait généralement dans des zones éloignées par rapport aux principales régions de consommation. Cela signifie que le pétrole doit être transporté sur de longues distances avant d'être raffiné et distribué. La routine entière constitue un certain nombre d'étapes importantes qui vont de la recherche et de l'extraction du pétrole du sol à la transformation du pétrole brut en produits utilisables et à l'envoi effectif de ceux-ci aux utilisateurs finaux. Ici, la logistique pétrolière joue un rôle important. L'optimisation de la chaîne logistique pétrolière peut entraîner une réduction des coûts d'environ 10 à 20 % des revenus [11].

L'industrie pétrolière fait face à une multitude de défis, que ce soit une surcharge des réglementations de sécurité environnementale, une protection adéquate de la sécurité des infrastructures et l'affaiblissement des prix à l'international. De plus, le secteur doit s'efforcer de rendre la transition à l'énergie verte. Pour cet ordre, l'efficacité logistique aurait reçu de l'importance afin de garder la compétitivité et pérenniser l'Industrie pétrolière.

Ce chapitre propose une vue d'ensemble de l'industrie pétrolière. Tout d'abord, nous retraçons l'historique et l'évolution de cette industrie, ainsi que son poids dans l'économie mondiale et les principales organisations qui la structurent. Ensuite, nous décrivons la chaîne d'approvisionnement pétrolière – ses composantes majeures et ses modes de transport, avec un

focus particulier sur le transport par pipeline multi-produits. Enfin, nous présentons les grands défis actuels de la filière pétrolière, qu'ils soient logistiques, économiques ou environnementaux, avant de conclure sur la nécessité d'améliorer les performances de ces systèmes pour l'avenir.

1.2 Historique et évolution de l'industrie pétrolière

1.2.1 Naissance et développement de l'industrie pétrolière :

L'humanité exploitait déjà le pétrole dès l'Antiquité, notamment sous forme d'asphalte, utilisé pour l'étanchéité ou l'éclairage. Cependant, l'industrie moderne du pétrole n'émerge qu'au XIX^e siècle. Un événement marquant survient le 27 août 1859, lorsque Edwin L. Drake fore le premier puits de pétrole à Titusville, en Pennsylvanie. En extrayant du brut à 20 mètres de profondeur, il démontre la faisabilité d'une extraction industrielle. Cette découverte déclenche une ruée vers le pétrole, apportant une prospérité sans précédent à la Pennsylvanie et à l'État voisin. Rapidement, le pétrole remplace l'huile de baleine comme principale source de combustible pour l'éclairage [12]. Peu après, en 1860, la construction de la première raffinerie américaine à Titusville marque la naissance d'un nouveau secteur industriel, dédié à la transformation du brut en kérosène pour lampes [13].

L'industrie pétrolière a connu une seule expansion massive dans les décennies qui suivirent. John D. Rockefeller a fondé Standard Oil aux États-Unis en 1870, et cette dernière a raffiné et distribué du pétrole jusqu'à sa séparation en 1911 à cause de son monopole. Peu après, le pétrole a commencé à être produit en grande quantité dans le reste du monde comme en Azerbaïdjan avec les champs de Bakou à la fin du 19^e siècle et pendant le 20^e siècle au Moyen-Orient où d'énormes champs en Iran ont été découverts en 1908 et ensuite au Koweït, Irak, Arabie Saoudite durant les années 1930. Le pétrole a vite été utilisé comme une ressource stratégique au monde, ayant un impact très important sur les deux guerres mondiales poussant l'économie du côté où l'on pouvait avoir accès au pétrole. L'acquisition de pétrole a permis à plusieurs puissances d'avoir du contrôle pendant la 2^e guerre mondiale. Puis ont suivi la guerre, la mise en exploitation s'est accentuée avec les énormes gisements du Golfe Persique et nouvelles découvertes en Algérienne, Nigeria et Mexique, et Venezuela [12][14][15].

Au cours des XX, l'importance du pétrole dans le mix énergétique mondial a continué de croître, dépassant peu à peu le charbon en tant que première source d'énergie au monde. Comme l'illustre la figure 1 (Figure I.1), la consommation mondiale de pétrole suit une courbe ascendante entre 1970 et 2020. Durant cette période, il s'impose comme la source d'énergie la plus consommée au monde, dominant largement les autres produits énergétiques. La production de pétrole au niveau mondial, encore à 2,36 milliards de tonnes en 1970, s'est approchée de 4,47 milliards de tonnes en 2018 [16]. Ce changement venait de l'augmentation de l'offre qui était principalement alimentée par le développement des transports aériens et automobiles ainsi que par l'industrialisation de plusieurs nations. Dans les années 1950-70, non seulement la consommation de pétrole augmentait, mais aussi des pays plus développés. Dernièrement, des pays comme la Chine, l'Inde et d'autres économies ont commencé à consommer beaucoup plus de pétrole [15].

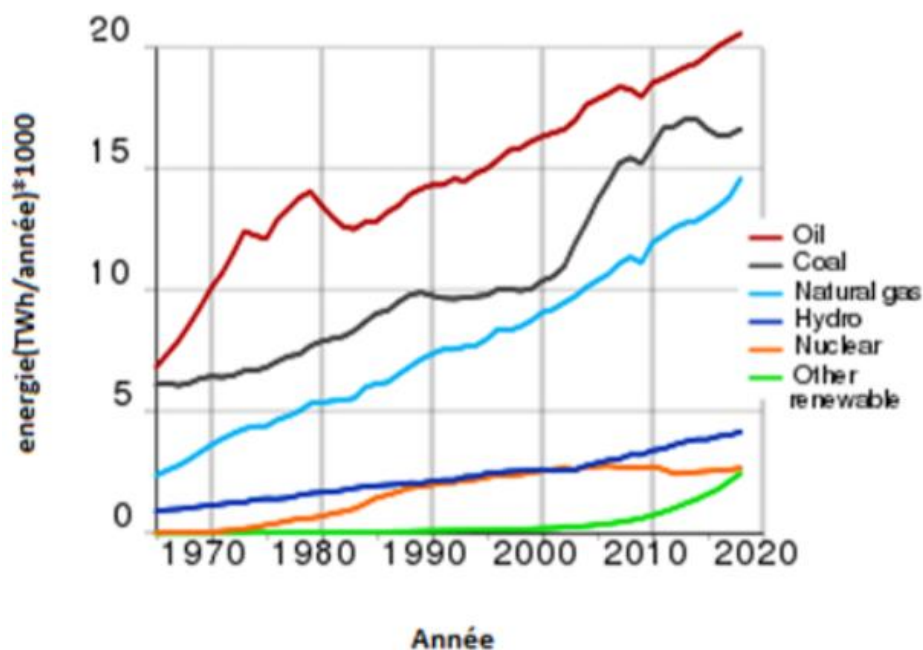


Figure 1.1: Évolution de la consommation mondiale d'énergie entre 1970-2020

L'industrie pétrolière est également sujette à des chocs et des transformations structurelles. Les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979 ont montré, par exemple, comment les économies sont tributaires du pétrole. L'embargo de 1973 et la révolution iranienne de 1979 entraînent des augmentations de prix accompagnées de pénurie, ce qui poussa les pays consommateurs à mettre en place des politiques d'économie d'énergie ou des changements de sources. Ces événements marquèrent l'importance stratégique du pétrole et les pays producteurs qui, par ailleurs, ont pris du poids dans la gestion de cette ressource. Entre 1980 et 1990, le marché du pétrole a été de plus en plus libéralisé, mais il a aussi connu une augmentation de la variation des prix dans le marché. La fin du XXe siècle et le début du XXIe ont vu le renforcement de nouveaux concurrents et aussi de nouvelles technologies (les compagnies pétrolières nationales ont remplacé les "sept sœurs" occidentales grâce à des forages en mer profonde, aux sables bitumineux et au pétrole de schiste) élargissant encore le champ de l'industrie pétrolière.[12][16][17]

Aujourd'hui, après un siècle et demi d'évolution, l'industrie pétrolière a mûri et est toujours en constant développement. Tout en demeurant un géant énergétique mondial, elle est également confrontée à des défis sans précédent tels que des fluctuations de prix extrêmes et la demande d'écologie durable.

1.2.2 Les organisations et les grands producteurs de pétrole dans le monde

En raison de l'importance stratégique croissante du pétrole sur la scène mondiale, plusieurs alliances et institutions internationales ont vu le jour afin de coordonner les politiques énergétiques et défendre des intérêts communs. Parmi elles, l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) s'impose comme l'une des plus influentes. Fondée le 14 septembre 1960 à l'issue de la Conférence de Bagdad, l'OPEP réunissait initialement cinq pays

producteurs — l'Irak, l'Irak, le Koweït, l'Arabie Saoudite et le Venezuela — dans le but de réguler conjointement l'offre et le prix du pétrole.

Au fil des décennies, l'organisation s'est progressivement élargie pour inclure d'autres acteurs majeurs du marché pétrolier mondial. Le tableau ci-dessous présente les pays membres ainsi que leurs dates respectives d'adhésion à l'OPEP, permettant de visualiser l'évolution de cette alliance jusqu'à ses 15 membres actuels en 2023. [21].

Tableau 1.1:Pays membres de l'OPEP et années d'adhésion

Pays membre	Date d'adhésion à l'OPEP
Irak	1960
Koweït	1960
Arabie Saoudite	1960
Venezuela	1960
Qatar	1961
Indonésie	1962 (suspendue en 2009, réintégrée en 2016, puis suspendue de nouveau en 2016)
Libye	1962
Émirats Arabes Unis	1967
Algérie	1969
Nigeria	1971
Équateur	1973 (suspendue en 1992, réintégrée en 2007, quittée en 2020)
Gabon	1975 (quittée en 1995, réintégrée en 2016)
Angola	2007
Congo (Brazzaville)	2018
Guinée équatoriale	2017

Les membres de l'OPEP dynamique détiennent, ensemble, une part importante des ressources mondiales de pétrole avoisinant 79 % des pétroles bruts prouvés en réserve et contribuant à approximativement 35 à 40 % de la production mondiale [21]. Les membres de l'OPEP peuvent contrôler les prix du pétrole tout en stabilisant la demande et l'offre de pétrole en modifiant leurs niveaux de production par le biais de quotas [18]. Cela donne à l'OPEP une influence significative sur le marché. L'organisation fixe un objectif officiel de "stabilisation du marché pétrolier" pour garantir des bénéfices équitables aux producteurs tout en offrant un approvisionnement constant aux consommateurs [12]. En réalité, l'impact de ces pays a été assez prononcé à certaines périodes, parfois dans les années 1970 lors des chocs pétroliers, tandis qu'à d'autres moments, comme l'influence des dynamiques de marché et l'augmentation de la production des pays non membres, leur contrôle a diminué. [18]

Outre l'OPEP, il faut également évoquer l'OPEP+, une coalition élargie établie en 2016, qui regroupe les membres de l'OPEP ainsi que dix autres pays producteurs de pétrole. Cette

alliance vise à renforcer la coordination des politiques de production pétrolière. Parmi ces dix pays, huit ne font pas partie de l'OPEP : la Russie, le Mexique, le Kazakhstan, l'Azerbaïdjan, Bahreïn, le Soudan, le Soudan du Sud et la Malaisie.

1.2.3 Localisation d'IP dans l'économie mondiale

L'Industrie pétrolière mondiale s'est divisée en pôles géographiques distincts pour la production et la consommation. De plus, il existe un lien entre les régions éloignées. L'industrie pétrolière occupe une place centrale dans l'économie mondiale, tant par son rôle énergétique que par son impact multisectoriel. Reconnue pour sa densité énergétique élevée et sa facilité de transport, le pétrole est devenu un moteur clé de l'industrialisation à partir du XXe siècle. Il assure près de 40 % de l'approvisionnement énergétique mondial, avec une prédominance marquée dans les transports, où il couvre environ 98 % des besoins sous forme de carburants tels que le diesel, l'essence ou le kérosène.

Son importance ne se limite toutefois pas à l'énergie : le secteur pétrolier fournit des matières premières fondamentales à diverses branches industrielles, dont la pétrochimie, l'agriculture, le secteur pharmaceutique et les travaux publics. De plus, de nombreux produits du quotidien, allant des plastiques aux textiles synthétiques, en passant par les produits de beauté, les médicaments et les engrais, dépendent directement de cette ressource.

En outre, le pétrole représente une source majeure de richesse pour les pays producteurs. Il génère des recettes fiscales, des emplois, et constitue une base d'exportation essentielle. Il stimule également l'innovation, notamment dans les techniques d'exploration, de raffinage et de logistique.

En définitive, le pétrole ne se résume pas à une source d'énergie : c'est un pilier structurel de l'économie mondiale, indispensable au fonctionnement d'une multitude de secteurs industriels et à la stabilité des systèmes économiques contemporains.

Par conséquent, l'industrie pétrolière est profondément ancrée dans l'économie mondiale à travers un système dense de transport interrégional et joue un rôle clé dans les balances commerciales [6]. Par exemple, l'Union européenne et la Chine dépendent fortement des importations pour satisfaire leurs besoins, tandis que des économies comme l'Arabie saoudite, la Russie et la Norvège dépendent substantiellement des exportations de pétrole pour leurs revenus [21].

1.3 Les chaînes d'approvisionnement pétrolières (CPP)

1.3.1 Définition des CPP

La chaîne d'approvisionnement d'un produit, en l'occurrence du pétrole, comprend toutes les activités et les opérations logistiques qui visent à livrer le pétrole et ses produits à un consommateur. D'après **Nnadili (2006)**, il peut également être décrit comme « un ensemble d'activités qui fournissent aux consommateurs, sous différentes infrastructures comme les stations-service, des produits pétroliers. La chaîne pétrolière commence par l'exploration et la production de pétrole brut, suivi par le transport de celui-ci vers les raffineries, puis par le raffinage consiste à transformer le brut en produits pétroliers finis, et enfin la distribution de dépôts de produits pétroliers consommés tels que les stations-service et les clients industriels.

Au milieu de cette chaîne, un autre élément tout aussi important est le flux d'informations nécessaires pour coordonner toutes les interventions, telles que communiquer les prévisions de rendement de carburant qui permettent de reprogrammer la production et l'expédition ». [3]

La chaîne d'approvisionnement pétrolière est à la fois complexe et vaste. Elle nécessite une infrastructure lourde (puits de pétrole, pipelines, ports maritimes, raffineries de pétrole, dépôts de pétrole et pétroliers) tout en nécessitant la participation de nombreux acteurs (entreprises pétrolières intégrées, entreprises de services pétroliers, transporteurs, courtiers et distributeurs). En comparaison avec d'autres secteurs industriels, la chaîne de valeur de l'industrie, et plus particulièrement celle du pétrole et du gaz, possède ses propres caractéristiques telles qu'une rigidité relativement forte, car certains processus comme l'extraction et le raffinage doivent fonctionner 24 heures sur 24 et à haute capacité pour être économiquement viables (inflexion), et une forte sensibilité aux changements de facteurs externes (géologiques, politiques et météorologiques) qui composent l'économie. Cependant, il est bien connu que la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM) dans l'industrie pétrolière et gazière peut influencer de manière substantielle les coûts, la sécurité de l'approvisionnement et la performance de l'industrie, c'est pourquoi ces caractéristiques sont souvent considérées comme des obstacles [3][4].

1.3.2 Les composants majeurs des CPP

On décompose classiquement la filière pétrolière en trois grands segments qui structurent la chaîne d'approvisionnement : l'amont (*upstream*), le médian (*midstream*) et l'aval (*downstream*) voir (la Figure 1-2). Chacun de ces segments correspond à un ensemble de fonctions particulières :

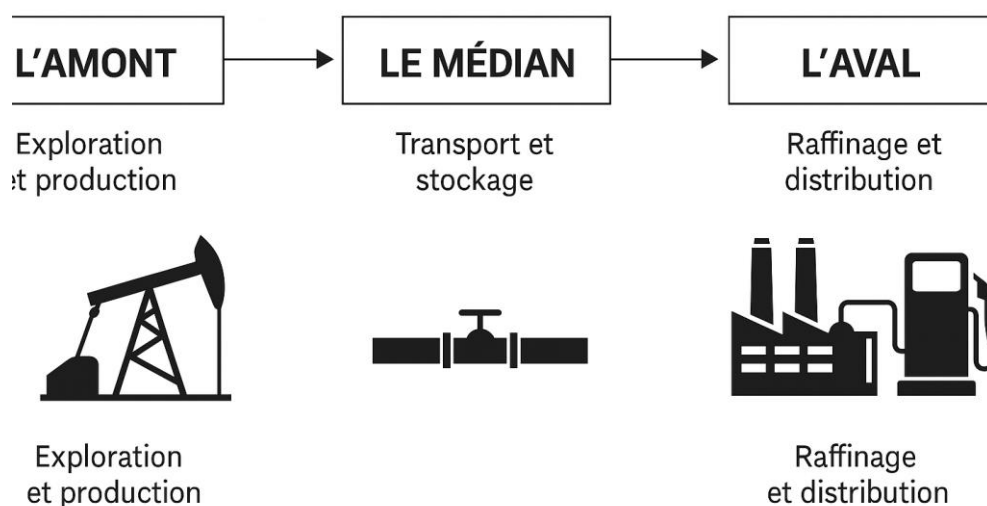


Figure 1.2: Structure de la chaîne de valeur pétrolière

- **Exploration & Production (E&P)** : C'est la première étape de la chaîne, qui comprend la recherche de gisements exploitables (exploration) et l'extraction de pétrole brut (production). L'exploration pétrolière mobilise des géologues et géophysiciens

pour identifier des zones potentiellement riches en hydrocarbures, grâce à des techniques telles que la sismique 3D, puis la réalisation de forages d'exploration pour vérifier la présence de pétroles. Si un champ pétrolier viable est découvert, le travail se concentre sur le développement du champ et l'extraction de pétrole en forant des puits supplémentaires et en installant des équipements de pompage. [22]

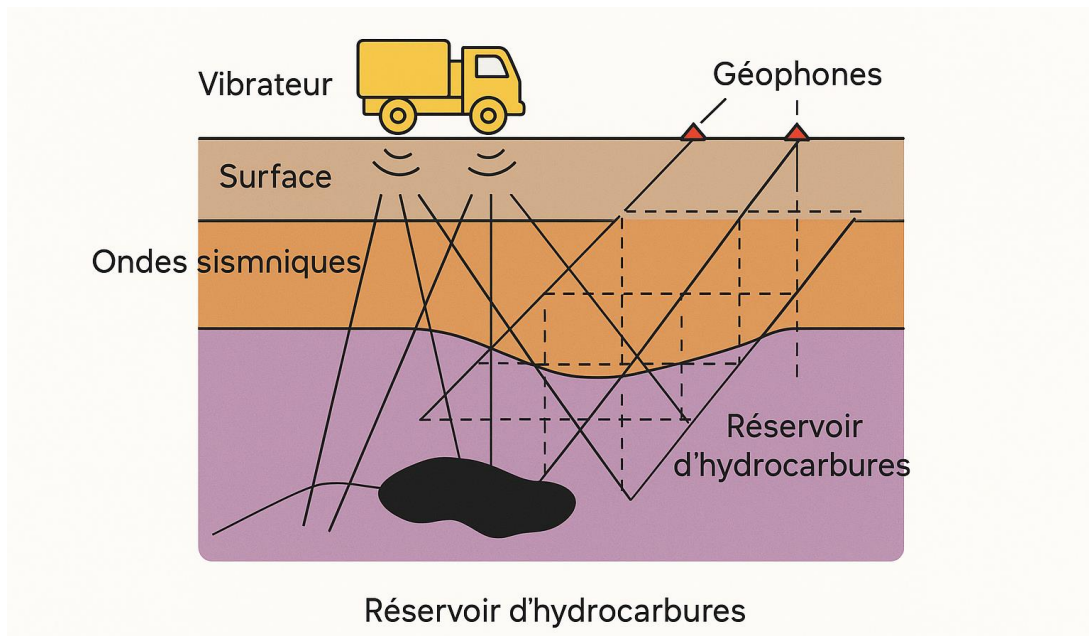


Figure 1.3: Localisation des réservoirs d'hydrocarbures par méthode sismique 3D

- **Transport et stockage de pétrole brut :** Segment Midstream Une fois récupéré, le pétrole brut doit être transporté vers les centres de transformation (raffineries) ou les pôles de consommation. Différents modes peuvent être utilisés pour le transport (voir section 1.4). Ce segment comprend également les installations de stockage de pétrole brut, en particulier dans les terminaux pétroliers (dépôts, fermes de citernes) aux points d'entrée/sortie, par exemple, dans les ports ou à la tête des pipelines. Ces installations permettent de contrôler le flux et de fournir une réserve tampon. La combinaison de ces activités de transport, transit et stockage intermédiaire de pétrole brut constitue le midstream au sein de l'industrie. C'est un maillon logistique crucial car les régions de production sont généralement très éloignées des centres de raffinage et de consommation finale. Le midstream englobe parfois également certains prétraitements (séparation de pétrole/gaz/eau sur le terrain, stabilisation du pétrole brut, etc.) avant le transport, bien que celles-ci soient souvent rattachées au segment amont. [5]
- **Raffinage :** Segment bas (partie amont). Le raffinage est le processus de conversion du pétrole brut en produits pétroliers commercialisables. Il se réalise dans des raffineries et consiste d'abord à distiller le pétrole brut, puis à effectuer diverses conversions chimiques (craquage, reformage, hydrocraquage, etc.) pour générer les fractions désirées : principalement des carburants comme l'essence, le diesel, le kérosène et le fioul ; quelques matières premières pétrochimiques comme le naphte, l'huile lubrifiante, l'asphalte, le propane, le soufre, parmi d'autres. Le raffinage est un maillon central qui ajoute de la valeur entre le pétrole brut (qui est difficile à utiliser dans son état naturel) et les produits finis précisément définis. C'est une activité industrielle en processus

continu, conçue pour fonctionner à un débit maximal. Les raffineries sont généralement situées près des centres de consommation (ports d'importation, grandes villes) ou des principales zones de production. Elles sont approvisionnées en amont par des champs pétroliers ou des ports, et en aval par des réseaux de distribution de produits.[22]

- **Transport et distribution des produits raffinés** : Segment de post-traitement (aval). Une fois raffinés, les produits pétroliers finis doivent être livrés aux utilisateurs finaux ou aux points de vente (stations-service, clients industriels, aéroports, etc.). Dans ce segment, le transport des produits comprend le mouvement des différents produits raffinés vers des dépôts de stockage régionaux, puis vers des stations-service ou des clients, ce qui se fait par pipelines, wagons-citernes et camions-citernes. Les pipelines multi-produits sont très importants pour l'approvisionnement en vrac des terminaux nationaux (voir sous-section 1.4.3), tandis que la distribution du dernier kilomètre se fait principalement par la route (camions). Les fonctions de marketing et de vente sont également incluses dans le segment : gestion des stocks dans les dépôts, maintenance du réseau de stations-service, fixation des prix de détail, etc. La partie aval se caractérise par une multitude de points de livraison et un ajustement aigu de la demande locale (saisonnalité des combustibles, spécificités régionales des essences, etc.). [8] [9]

1.4 Transport dans la CPP

1.4.1 Importance du transport dans la CPP

Le transport est le système nerveux de la chaîne d'approvisionnement pétrolière. Le pétrole se trouve souvent à plusieurs milliers de kilomètres des zones de production et de consommation. Le transport est donc critique pour l'approvisionnement. Par exemple, le pétrole en Afrique de l'Ouest doit être transporté pour la moitié du globe afin d'alimenter les raffineries en Asie, pendant ce temps, le brut acheminé par oléoduc en Europe de l'Est sera transformé en carburant qui sera consommé dans l'ouest de l'Europe. Cette dissociation géographique rend inévitable l'affrètement, qui est tracté par le temps de transit et les moyens de transport massifs ainsi que diversifiés.

Les coûts de transport du pétrole affectent grandement le coût final des produits pétroliers. En général, le transport à longue distance par pipeline ou par bateau est nettement moins cher que par camion ou par train. Cela est illustré dans le tableau suivant :

Tableau 1.2 Analyse comparative des coûts unitaires selon les modes de transport des hydrocarbures

Mode de transport	Coût approximatif par baril
Pipeline	Moins de 5 \$
Rail	Entre 10 \$ et 15 \$
Camion-citerne	Environ 20 \$

Cela représente une économie considérable tant que le mode de transport est choisi judicieusement.

L'autre aspect dont s'occupent les parties prenantes dans le cadre de leurs prérogatives est la sûreté physique et environnementale du transport pétrolier. Les incidents d'une telle nature peuvent être catastrophiques : il peut y avoir des pertes en vies humaines et des pollutions gravissimes du sol ou des eaux. En ce qui concerne les pipelines et les navires, il est prouvé qu'ils sont globalement plus sûrs que le transport routier pour déplacer de grandes quantités de pétrole. Par exemple, le taux d'accidents mortels par volume transporté est aux USA d'environ 70 fois inférieur par oléoduc que par camion. Cela s'explique notamment par le fait qu'un pipeline fonctionne de manière automatique et qu'il n'y a pas d'interaction humaine. Cela s'explique aussi par l'isolement des trajets maritimes. Les cours d'approvisionnement optimisés en hydrocarbures sont ceux qui pour certaines distances et volumes d'hydrocarbures à acheminer choisissent le mode de transport qui permet de garantir l'acheminement le plus économiquement viable, stable et sécurisé aux besoins centralisés des marchés [7][8].

1.4.2 Les différents modes de transport dans la CPP

Plusieurs modes de transport complémentaires interviennent dans la logistique pétrolière, chacun ayant ses avantages, ses limites et son rôle privilégié dans la chaîne d'approvisionnement. Les principaux modes utilisés sont :

- **Camions-citernes** : Ils sont très utiles pour le transport de produits pétroliers d'une distance relevant à moyenne, tel que la livraison directe des stations-service en région aux dépôts. Malgré le fait qu'ils soient extrêmement utiles, il reste en outre une terrible estimation du coût unitaire par véhicule, un seul camion-citerne peut transporter en carburant de 30 à 40 m^3 de 70 m^3 , soit environ 190 à 250 barils. Cela n'est pas du tout suffisant, par rapport au taux de consommation d'un oléoduc, ou d'un l'autre pétrolier. En plus, c'est de plus en plus le système le plus cher en économie d'énergie. Il y a aussi pas mal de chances au volant de subir un accident sur de longues distances, ce qui le rend peu fiable. En rapportant à l'étude de [5] « le coût pour le pétrole transporté par un camion est 4 fois plus cher que par un oléoduc »
- **Pipelines (oléoducs)** : Ce sont des pipelines pétroliers fixes, qu'ils soient terrestres ou sous-marins, dont la fonction est de transporter le pétrole (qu'il soit brut ou raffiné) sur de longues distances de manière continue. De loin, ils constituent le moyen de transport le plus important sur de longues distances tant pour le pétrole brut que pour certains produits raffinés, en raison de leur grande valeur et de leur faible coût opérationnel.
 - Une fois mis en service, les pipelines sont capables de transporter chaque jour plusieurs centaines de milliers de barils de pétrole sur des trajets pouvant s'étendre sur plusieurs milliers de kilomètres.
 - Leur utilisation implique une dépense énergétique relativement faible, principalement liée au fonctionnement des stations de pompage fixes.
 - L'exploitation de ces installations nécessite peu de personnel, ce qui facilite leur gestion au quotidien.
 - En raison de ces atouts, les pipelines sont reconnus comme la solution de transport la plus économique et la plus sûre pour les hydrocarbures sous forme liquide.

- En Amérique du Nord, les pipelines assurent le transport de plus de 70 % du pétrole brut destiné aux raffineries.
- En termes de sécurité, les fuites sur les oléoducs demeurent peu fréquentes au regard de la quantité globale de pétrole acheminée.
- De manière générale, ces incidents causent des conséquences moins graves que ceux liés au transport terrestre ou maritime, même s'ils peuvent occasionnellement provoquer des dommages à l'échelle locale.

Le piratage d'un pipeline a, en tout cependant, causé quelques pollutions locales de grande ampleur. Les pipelines posent cependant un sérieux problème de manque de souplesse : ils doivent faire l'objet d'un investissement très lourd de construction et d'équipements sur mesures (tracé imposé, diamètre fixe) tels qu'ils ne sont économiquement viables que dans des flux soutenus et permanents entre deux endroits définis. Par ailleurs, la réalisation de nouvelles installations est parfois freinée par des règlements, des problèmes sociaux et écologiques (expropriations, traversée de milieux sensibles, contestations des populations locales). Cependant, le pipeline est encore et toujours la structure fondamentale de logistique pétrolière pour le continent.[8]

➤ **Navires pétroliers** : Le transport maritime est un élément essentiel du commerce international impliquant le pétrole. Entre les plus petits pétroliers - qui peuvent contenir quelques milliers de tonnes - et les géants supertankers, il existe plusieurs catégories de navires spécialisés dans le transport maritime de pétrole, assurant l'acheminement du pétrole brut depuis les zones exportatrices vers les régions consommatrices, ainsi que la distribution de produits pétroliers raffinés le long de corridors maritimes bien définis. Leur principal atout réside dans leur importante capacité de chargement, rendant possible le transport de volumes considérables en une seule traversée. Comme présenté dans la figure 2, ces navires sont classifiés selon leur capacité de port en lourd (TPL). Les unités de type Panamax, Aframax et Suezmax sont adaptées au transport mixte de pétrole brut et de produits dérivés. En revanche, les navires de plus grande taille, à savoir les VLCC (Very Large Crude Carrier) et ULCC (Ultra Large Crude Carrier), sont exclusivement conçus pour le transport de pétrole brut. À titre d'exemple, un seul ULCC est en mesure de transporter jusqu'à 2 millions de barils, soit l'équivalent d'environ 80 millions de litres, ce qui correspond à la capacité de près de 2 500 camions-citernes.



Figure 1.4: Catégories de pétroliers selon la capacité de chargement

D'un point de vue économique, le transport maritime de pétrole est très rentable, Le prix du transport par mer est souvent comparable à celui de la canalisation sur de grandes distances, et grâce à cette efficacité, le coût de transport par tonne est assez bas.

L'infrastructure maritime liée au pétrole est bien développée. Il y a près de huit mille pétroliers appartenant à des armateurs spécialisés dans le monde entier. Cela facilite les échanges commerciaux mondiaux.

- **Vulnérabilité aux points de passage stratégiques** : Le transport maritime du pétrole dépend fortement de détroits et canaux internationaux (comme Ormuz, Suez, Malacca ou Panama), qui concentrent une part importante du trafic mondial. Toute perturbation dans ces zones peut entraîner une baisse soudaine de l'offre et une flambée des prix.
- **Risques environnementaux élevés** : Les accidents impliquant des pétroliers (naufages, collisions) peuvent provoquer des marées noires aux conséquences écologiques dévastatrices, comme l'ont montré les cas du *Torrey Canyon* (1967), de l'*Amoco Cadiz* (1978) ou de l'*Exxon Valdez* (1989).
- **Mesures de prévention renforcées** : Pour limiter ces risques, des réglementations internationales strictes ont été adoptées (coques doubles, séparation du trafic, contrôles portuaires), complétées par des normes de sécurité rigoureuses imposées par les compagnies elles-mêmes.
- **Rôle stratégique** : Malgré ses limites, le transport maritime demeure un maillon essentiel de l'approvisionnement énergétique mondial, sans lequel une grande partie des pays serait confrontée à des pénuries de pétrole.

1.4.3 Le système de transport multi-produits par pipeline (TMPP)

En raison de son efficacité, un pipeline n'est pas seulement utilisé pour le transport de pétrole, mais aussi pour transporter des produits pétroliers raffinés sur de longues distances. Un système de pipeline multi-produits moderne (MMPPS) est maintenant couramment employé dans le monde entier pour décrire l'utilisation du même pipeline pour transporter des biens finis

consécutivement par lots. L'utilisation de ces systèmes est très courante en aval (par exemple pour approvisionner plusieurs réservoirs depuis une raffinerie centrale) et minimise la nécessité de construire un pipeline pour chaque produit. Dans un système de pipeline multi-produits, des produits comme l'essence, le diesel, le kérosène, le fioul, etc. sont injectés les uns après les autres dans le pipeline.

- **Fonctionnement du système TMPP** : Le fonctionnement d'un TMPP repose sur une coordination très rigoureuse des opérations d'injection et de retrait. En clair, on planifie à l'avance quels produits vont circuler, dans quel ordre et en quelles quantités. Typiquement, une raffinerie injecte, mettons, $X \text{ m}^3$ d'essence, suivis de $Y \text{ m}^3$ de kérosène, puis $Z \text{ m}^3$ de diesel. Ce séquençage précis constitue ce qu'on appelle un « train » de batches. A l'arrivée, les choses se compliquent un peu : selon la configuration du réseau (s'il y a des embranchements ou non), chaque lot peut être soit livré intégralement à un terminal, soit réparti entre plusieurs dépôts au fil du pipeline. L'ordre des lots n'est donc pas laissé au hasard – il dépend étroitement des besoins logistiques en aval et des contraintes techniques comme la capacité des cuves ou les délais de livraison. L'acheminement, lui, est continu : les lots avancent, poussés par la pression exercée par une station de pompage. En théorie, chaque produit reste bien séparé. En pratique, c'est une autre histoire. À la jonction entre deux produits successifs, des mélanges se forment : ce sont les fameuses zones d'interface. Par exemple, entre du kérosène et du diesel, il y aura une portion de produit hybride, ni vraiment l'un ni tout à fait l'autre. Ces interfaces sont inévitables, car même l'usage de racleurs – ces « cochons » censés faire barrière – n'a pas donné les résultats escomptés. Pire : ils ont parfois accentué les turbulences, donc favorisé les mélanges. Plutôt que de chercher une étanchéité parfaite – quasi illusoire –, les exploitants acceptent donc un certain niveau de contamination à ces interfaces. Ces volumes mixtes sont ensuite gérés à part : soit requalifiés comme produits hors spécifications, soit renvoyés vers la raffinerie pour être retraités. C'est là tout l'art (et la contrainte) du transport multi-produits : jongler entre précision, flexibilité, et compromis technique.[6][9]
- **La technique de Batching** : L'un des objectifs clés d'un pipeline multi-produits est de limiter les mélanges ainsi que les pertes de qualité aux interfaces. Pour cela, on utilise la technique de Batching qui cherche à optimiser la séquence d'envoi des produits par ordre maximal de compatibilité de deux lots.
- **Gestion des interfaces (contaminants)** : Même avec le meilleur appariement, des interfaces de mélange subsistent entre les lots adjacents (voir la Fig : 1.3). Par exemple, pipeline Trans Mountain au Canada, le volume d'interface entre un lot d'essence et un lot de diesel a été maintenu à 750 m^3 (4 700 barils) sur plus de 1 000 miles. La gestion de ces interfaces est un aspect important du TMPP. Lorsqu'une partie d'une interface est déplacée vers un point de terminaison, il y a deux situations : soit ce mélange peut être intégré dans l'un ou l'autre des produits (par exemple, une petite portion d'essence mélangée au diesel peut parfois être tolérée dans un bassin industriel de diesel), soit s'il enfreint les spécifications, il doit être séparé et traité séparément. Souvent, l'interface entre deux produits de classes différentes (par exemple, du carburant pour aviation et de l'essence) est collectée dans un réservoir spécifique et renvoyé à la raffinerie pour être retravaillée (redistillation ou utilisation comme un composant moins noble). Cela entraîne un coût de retraitement supplémentaire que nous souhaitons minimiser. En tant qu'objectif, il s'agit de "déclasser" l'interface en la mélangeant avec un produit que l'interface est jugée plus lourde des deux : par exemple, de l'essence contaminée au diesel sera considérée comme du diesel

de faible qualité et sera incorporée dans un lot de diesel commercial de faible qualité, évitant un traitement complet.

Les facteurs tels que la vitesse d'écoulement, la différence de densité et de viscosité entre les deux produits, ainsi que la distance parcourue, prépondèrent dans l'interface.



Figure 1.5: Volume d'interface résulte intérieur de pipeline

1.5 Challenges des CPP

Malgré son apparente maturité, la chaîne d'approvisionnement pétrolière fait face à plusieurs challenges majeurs qui compliquent sa gestion au quotidien. Parmi ces défis, on peut citer :

1.5.1 Complexité élevée et rigidités structurelles :

Le CCP comporte de nombreux niveaux (amont, intermédiaire, aval), ce qui le rend intrinsèquement difficile à gérer. Chaque segment a ses propres contraintes techniques et certaines optimisations locales qui peuvent ne pas être globalement optimales. De plus, certaines caractéristiques rigides aggravent la complexité de la situation : par exemple, les raffineries fonctionnent mieux à charge constante, les pipelines ne peuvent transporter qu'une plage limitée de brut ou de produits à un moment donné, etc. De telles rigidités rendent les chaînes d'approvisionnement moins réactives aux fluctuations de la demande ou aux incidents. En résumé, l'IP fonctionne souvent dans un mode de flux poussé relativement gelé avec de longs délais de réponse aux signaux du marché.[22][4]

1.5.2 Temps de transit long et grandes distances :

Le délai entre les sources et les clients est souvent de plusieurs milliers de kilomètres, entraînant d'importants retards de transit. Le temps entre la production d'un baril de pétrole et sa consommation sous forme de gaz en Europe peut prendre plusieurs semaines, y compris l'expédition, le stockage, le raffinage et la distribution (transport maritime + stockage + raffinage + distribution). Cela nécessite de travailler avec des stocks tampons tout au long de la chaîne d'approvisionnement pour faire face aux incertitudes et garantir un approvisionnement continu. De plus, les longues distances augmentent le nombre de cas d'échec possibles (accident, panne) qui doivent être surveillés. [8][19].

1.5.3 Capacités limitées et goulets d'étranglement :

De nombreuses infrastructures structurelles, telles que la production, le transport et le stockage, ont des capacités finies. D'autre part, la demande de pétrole semble augmenter avec le temps (avec quelques variations). La croissance continue de la consommation d'énergie chaque année a créé une tension dans certaines parties du système. Par exemple, un pipeline

saturé ne peut pas transmettre plus de volume sans extension, risquant ainsi de limiter l'approvisionnement d'une région particulière. De même, un pays peut être contraint d'exporter du pétrole brut non raffiné ou d'importer des produits finis coûteux, si sa capacité locale n'est pas significativement augmentée et que ses raffineries fonctionnent déjà à pleine capacité. L'investissement nécessaire pour augmenter la capacité (nouveaux pipelines, nouvelles raffineries, agrandissement des dépôts de pétrole) est extrêmement coûteux et doit être planifié des décennies avant de pouvoir être financé. Pour le moment, la chaîne doit faire face à des goulets d'étranglement qui nécessitent une allocation minutieuse des ressources disponibles [14][23].

1.5.4 Incertitudes politiques et économiques :

Le CPP est également exposé à des facteurs externes imprévisibles tels que la politique, les conflits géopolitiques, les évolutions réglementaires ou les chocs économiques. Par exemple, une crise diplomatique peut conduire à des sanctions qui perturbent les flux (embargos sur un pays producteur, fermeture d'un pipeline transfrontalier). Les décisions internes de certains pays (quotas de l'OPEP, politiques d'exportation) modulent l'offre du marché mondial. Sur le plan économique, une récession mondiale affecte la demande de pétrole et, donc, le poids de la chaîne logistique, tandis qu'un boom conjoncturel affecte l'huile. La pandémie de COVID-19 en 2020 est un exemple extrême où la demande de carburants s'est effondrée en l'espace de quelques semaines, entraînant une congestion de la capacité de stockage et un besoin de réduire drastiquement les niveaux de production. En revanche, un rebond rapide ou un hiver très froid peut mettre à l'épreuve le système. La volatilité de ces estimations exige du CPP qu'il construise un degré élevé de résilience et d'adaptabilité, même si, comme cela a été montré ci-dessus, elle a de fortes inerties.[11][9]

En réponse à ces défis, les acteurs de l'industrie pétrolière cherchent à améliorer les solutions. Les aspects coûteux de la gestion de l'industrie tels que la réduction des stocks et les niveaux de production ajustés ont été résolus grâce à des méthodes avancées de « prévision ». De plus, une meilleure coordination entre les processus en amont et en aval permet de répondre aux défis de la surproduction locale ainsi qu'aux pénuries léthargiques. La prévision de production pour certains produits devient également plus précise lorsque la planification de la coordination en amont est améliorée.

Pour résumer, la chaîne d'approvisionnement en pétrole doit intégrer la gestion de flux physiques larges et complexes avec la prise en compte de facteurs externes volatils. L'amélioration des processus et des outils de prise de décision au sein du système IP est une nécessité en raison des défis qui doivent être relevés (complexité, distance, capacité, incertitude, etc.). L'étude de cas TMPP fait partie de ce projet général d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement.

1.6 Les enjeux et défis de l'industrie pétrolière

En dehors des aspects logistiques et économiques, au XXI^e siècle, l'industrie pétrolière est confrontée à des problèmes mondiaux qui représentent des défis potentiels pour son avenir. Quatre préoccupations clés viennent à l'esprit : les restrictions environnementales et légales, la sécurité industrielle, la fluctuation des prix du pétrole et la transition énergétique.

1.6.1 Problématiques environnementales et réglementations :

Le forage pétrolier a un impact environnemental significatif depuis la tête de puits jusqu'à la station-service - émissions de gaz à effet de serre, pollution des écosystèmes et accidents possibles - ce qui devient de plus en plus inacceptable. En raison de la pression publique et des obligations internationales telles que les accords climatiques, les gouvernements ont cherché à imposer des restrictions en matière de propriété intellectuelle, renforçant les réglementations au fil des ans. Par exemple, il existe des normes qui restreignent l'émission de polluants, imposent l'utilisation de technologies de forage moins destructrices et renforcent la prévention des dispositifs de déversement de pétrole dans les raffineries. L'Union européenne a mis en place une directive de système d'échange de quotas d'émission (ETS) qui s'applique également aux propriétaires de raffineries. Aux États-Unis, la catastrophe de Deepwater Horizon (2010) a conduit à la refonte de la réglementation sur la sécurité des forages en mer. De plus, les sociétés pétrolières sont tenues de réduire leurs émissions de carbone, par exemple, en limitant la torchage de gaz sur les champs pétrolifères et en investissant dans des projets de capture et de stockage de CO₂. Pour garantir la rentabilité, il est important pour IP d'investir dans de nouvelles technologies telles que le forage horizontal pour réduire le nombre de puits, l'automatisation des têtes de puits pour réduire les émissions, et des carburants encore plus propres. Une communication accrue avec les entités gouvernementales est également essentielle. Un exemple positif est l'amélioration des techniques de forage, qui permettent désormais une production de pétrole plus importante avec moins de puits, réduisant ainsi la perturbation du sol et de l'habitat. Quoi qu'il en soit, l'industrie connaîtra très probablement une augmentation des réglementations mises en place alors que les problèmes climatiques commencent à se multiplier, obligeant l'industrie à changer ses procédures ou son modèle commercial à long terme [24].

1.6.2 Sécurité et risques

L'industrie pétrolière et gazière traite des matériaux inflammables et opère des installations à haut risque (vessels offshore, plateformes de forage, raffineries et dépôts), ayant ainsi une préoccupation continue pour la sécurité industrielle. Bien qu'il y ait eu des progrès, il existe des dangers potentiels dans chaque segment : Une fuite dans un pipeline peut entraîner une explosion ou une contamination, un accident de raffinerie de pétrole à terre ou en mer peut conduire à un incendie de grande envergure, etc. Des accidents majeurs dans le passé ont montré l'ampleur des possibilités (l'explosion de Piper Alpha en 1988 a tué 167 personnes, entraînant une révision des réglementations de sécurité offshore). En matière de transport, les déversements de pétrole comme celui de l'Exxon Valdez en 1989 ont démontré la vulnérabilité environnementale de l'industrie. En réponse à cela, l'organisation IP a instauré et développé une culture de sécurité plus forte : des procédures strictes sont mises en place, le personnel est formé, des équipements de sécurité sont disponibles, et des plans d'urgence élaborés existent. La plupart des grandes entreprises ont adopté le concept de "zéro accident" et utilisent rapidement les fonds pour des mesures de maintenance préventive et des systèmes de détection (détecteurs d'inondation sur les pipelines, surveillance sismique des puits, etc.). Néanmoins, aucun risque n'est complètement dissipé, et l'augmentation des infrastructures (forage dans l'Arctique, augmentation du transport de pétrole) crée encore plus de risques. Les chantiers les plus délicats sont ceux qui se rapportent à la protection des actifs obsolètes. La majorité des

pipelines et des unités de raffinage datant des années 1960-1970 commencent à s'approcher de leur obsolescence, ce qui rend impératif leur remplacement ou leur réhabilitation au niveau requis de sécurité. D'autres périls tels que la cybersécurité font leur apparition. En 2021, le piratage du réseau Colonial, une figure majeure dans l'industrie pétrolière américaine, a éterné une partie de l'approvisionnement électrique du pays pendant plusieurs jours, il y a de quoi se demander à quel point l'électricité d'une entreprise intégrée est protégée. De plus, il est indéniable qu'un haut degré de sécurité doit être maintenu pour garantir l'acceptabilité de l'industrie tout en contrant les coûts très élevés dus aux accidents (nettoyage, compensations, amendes, marketing) [13][22].

1.6.3 Transition énergétique et alternatives aux carburants fossiles

L'un des défis les plus décisifs auxquels l'industrie pétrolière pourrait faire face dans les prochaines décennies est le passage à une énergie mondiale. En raison du changement climatique, de nombreuses nations et entreprises se sont engagées à réduire de manière drastique leurs émissions de CO₂, ce qui conduira finalement à une utilisation réduite des combustibles fossiles. Certains scénarios prospectifs (comme celui du Scénario de Développement Durable de l'AIE) prédisent un pic de la demande de pétrole dans les années 2020, qui diminuera ensuite jusqu'à environ le milieu du 21^e siècle. Plusieurs facteurs contribuent à cette tendance : l'adoption rapide des voitures électriques, qui réduirait la consommation d'essence et de diesel (on s'attend à ce qu'en 2040, une proportion significative de voitures, en particulier en Europe, en Chine et en Amérique du Nord, soit électrique) ; les améliorations de l'efficacité énergétique dans le transport conventionnel (normes de consommation plus strictes, aviation plus efficace) ; le remplacement partiel du pétrole par des énergies renouvelables ou du gaz pour la production d'électricité ; et plus généralement, des politiques publiques visant des émissions nettes de carbone nulles autour de 2050 à 2060 dans de nombreux pays. En même temps, il y a une compétitivité croissante de l'offre renouvelable : nouveaux biocarburants inter-miscibles avec les carburants classiques, développement de l'hydrogène (pour les transports lourds ou le stockage d'électricité), développement et électrification des transports doux. Cette envisagée limitation et ensuite réduction de la consommation mondiale de pétrole pose un problème existentiel à l'IP qui, jusqu'à récemment, était habituée à une quasi-permanente augmentation de la demande. Le pétrole a déjà commencé à diversifier ses portefeuilles vers des sources d'énergie à faible empreinte carbone (certaines d'entre elles nagent dans le solaire, l'éolien offshore, la vente d'électricité, etc.), mais la majeure partie de leurs bénéfices proviennent encore des hydrocarbures. Deux questions se posent : comment rendre le pétrole encore compétitif et acceptable (par exemple, en diminuant son empreinte carbone par baril en augmentant le niveau de propreté des opérations – « acheter du temps ») ; et comment préparer la post-pétrole en évoluant progressivement la stratégie d'affaires. Dans un souci rapproché et à moyen terme, la consommation pétrolière demeurera à la hausse, même pour certains secteurs tels que l'aviation, dans les pays émergents. Ce qui nous assure, pour les quelques décennies à venir, une robuste activité économique. Toutefois, dans l'optique qu'il y a possiblement un futur déclin à anticiper, l'industrie s'évertue à réfléchir sur comment investir, ou non, dans l'exercice de dépenses pour des gisements qu'il serait bien trop difficile de rentabiliser s'il y a une chute de demande, et surtout, comment innover pour demeurer efficace au sein d'une dynamique énergétique en place. L'énergie est par conséquent

une menace (la contraction de la consommation de pétrole, un aspect dérangeant de l'énergie fossile) et une porte de sortie pour l'IP (en faisant appel au gaz moins émissif, en misant sur la valorisation des carburants synthétiques, en apportant la tête des structures techniques vers le dispositif). [20][15]

En gros, au sein de l'industrie pétrolière, il semble y avoir un dilemme. Ils doivent toujours fournir de l'énergie aux consommateurs tout en maintenant leur efficacité, leur sécurité et leur compétitivité traditionnelles. Outre les défis traditionnels, l'industrie doit faire face à de nouvelles questions de durabilité et de responsabilité sociale. Comme mentionné, ces défis ne se tiennent pas seuls ; cumulatifs, ils rendent le travail des managers et des ingénieurs d'autant plus compliqués. Par exemple, considérons une dépense visant à sécuriser une installation : cette dépense peut augmenter le coût des émissions de dioxyde de carbone et donc, le coût d'exploitation. Cela est totalement inacceptable, surtout lorsqu'il existe une concurrence acharnée et des prix au ras des pâquerettes. Si l'industrie pétrolière entend rester un leader dans le secteur de l'énergie au XXI^e siècle, la capacité à contrer ces limitations opposées sera vitale.

1.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons fourni une vue synoptique de l'industrie pétrolière et de sa chaîne d'approvisionnement dans le but de cadrer le problème de l'amélioration des performances d'un système de transport de pipeline de carburant. Nous avons abordé l'essor historique du pétrole depuis le puits de Drake en 1859 jusqu'à son statut actuel de pilier énergétique mondial, tout en discutant des changements structurels qui ont eu lieu, tels que l'essor des pays producteurs et de l'OPEP, la diversification des acteurs et l'intégration verticale ou la fragmentation des chaînes selon les contextes. Nous avons décrit une chaîne logistique pétrolière typique, allant de l'exploration du pétrole brut à la distribution de carburant tout en soulignant le rôle critique du transport à chaque étape du processus. Plus particulièrement, nous avons décrit le fonctionnement des pipelines multi-produits, où plusieurs types de carburant peuvent être transportés par un seul pipeline en même temps, à condition qu'il y ait une planification adéquate des séquences d'envoi et un contrôle de l'interface de mélange. TMPP est au cœur du problème de planification traité dans cette remémoration.

L'amélioration de la performance du système de transport, qui est le sujet de cette mémoire, vise à transformer le système d'approvisionnement en pétrole en un système efficace et résilient, qui augmente la compétitivité économique et le rend plus durable (moins gaspillant, moins risqué). Dans les chapitres suivants (après on rajoute madame ici et quelque chose)



Chapitre II : Etat de l'art

2. Etat de l'art

2.1 Introduction

Ce chapitre présente à la fois les méthodes générales d'ordonnancement du transport dans les systèmes de pipelines multi-produits ainsi que les travaux existants sur ce sujet.

Le processus de résolution des problèmes d'ordonnancement peut être structuré en trois étapes principales :

- **Définition du contexte du problème** : Cette première étape consiste à formuler les problématiques métier sous forme de décisions à prendre, d'objectifs à atteindre, de conditions à respecter et de contraintes à considérer.
- **Modélisation du problème dans un cadre d'optimisation** : Le problème est ensuite exprimé sous forme mathématique de manière à intégrer les exigences identifiées précédemment.
- **Choix des méthodes et algorithmes de résolution** : Enfin, des approches techniques sont sélectionnées pour résoudre le problème d'optimisation, en tenant compte de sa nature et de sa complexité.

En raison de la complexité inhérente aux problèmes d'ordonnancement dans le cadre du transport par pipeline multi-produits, ceux-ci sont classifiés comme appartenant à la catégorie des problèmes NP-complets. Plusieurs facteurs contribuent à cette complexité : la taille et la structure des réseaux de pipelines, les capacités limitées des réservoirs de stockage, les conditions spécifiques d'injection au niveau des sources (telles que les raffineries), les modalités de réception dans les dépôts, les contraintes opérationnelles du pipeline, ainsi que la gestion des interfaces entre produits. Ces interfaces influencent la localisation des produits à l'intérieur des lots (batches) circulant dans le pipeline, ce qui impose des séquences de transport strictement admissibles. De plus, la longueur de l'horizon de planification et la multiplicité des échéances de livraison dans divers lieux ajoutent d'importantes contraintes opérationnelles, rendant la tâche d'ordonnancement particulièrement difficile à traiter.

La section 3.2 aborde les spécificités propres aux problèmes de type SMPS (Scheduling of Multi-Product Pipeline Systems) et les stratégies techniques qui ont été proposées pour leur résolution. La section 3.3 propose un état de l'art concernant l'ordonnancement du transport de produits raffinés via des réseaux de pipelines multi-produits. Les principaux enseignements tirés de cette revue de la littérature sont synthétisés dans la section 3.4. Enfin, la section 3.5 est consacrée à une conclusion générale sur l'ensemble des éléments traités dans ce chapitre.

2.2 Ordonnancement du transport multi-produit par pipeline (SMPS)

D'après les travaux disponibles dans la littérature scientifique, plusieurs caractéristiques majeures définissent la nature des problèmes d'ordonnancement dans les systèmes de transport multi-produit par pipeline (SMPS). Parmi ces caractéristiques, la structure physique du réseau de canalisations constitue un élément déterminant.

2.2.1 Configuration des systèmes de pipelines

L'une des premières étapes dans la modélisation d'un problème SMPSP consiste à définir la configuration physique du réseau de transport. Ce choix structurel a un impact direct sur la complexité du problème ainsi que sur la formulation mathématique du modèle retenu.

Les principales architectures de systèmes de pipelines identifiées dans la littérature peuvent être regroupées comme suit :

- **Pipeline linéaire :**

Ce type correspond à un agencement simple dans lequel un seul pipeline relie plusieurs centres de distribution et stockage (dépôts) à une source unique ou à plusieurs sources (raffineries) (figure II.1). Dans certaines variantes, des centres intermédiaires peuvent à la fois prélever et injecter des produits dans le pipeline, ce qui augmente la flexibilité mais également la complexité de gestion.

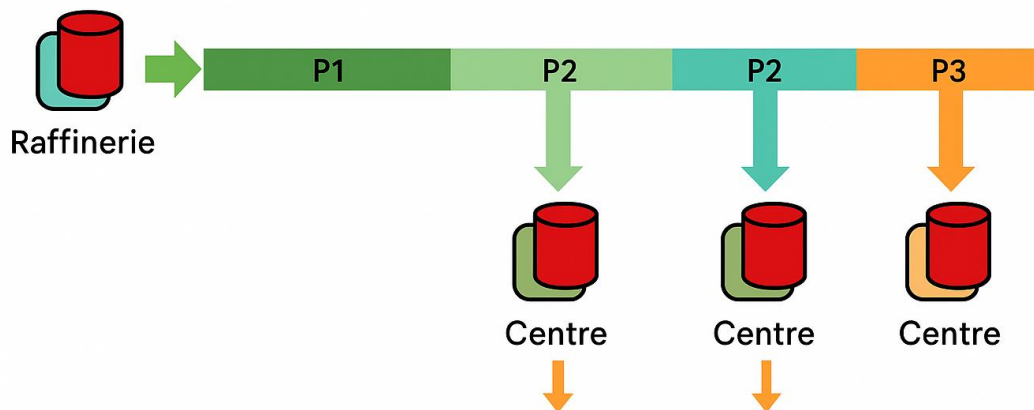


Figure 2.1: Modèle de Pipeline Linéaire avec Points de Prélèvement et d'Injection vers des Centres de Stockage Décentralisés

- **Pipeline arborescent :**

Ce schéma de transport repose sur une structure en forme d'arbre, dans laquelle une raffinerie, située à la racine, alimente différentes branches. À l'extrémité de chaque branche se trouve un dépôt de réception (figure II.3). Ce type de configuration est adapté à la circulation simultanée de plusieurs lots de produits (multi-batches).

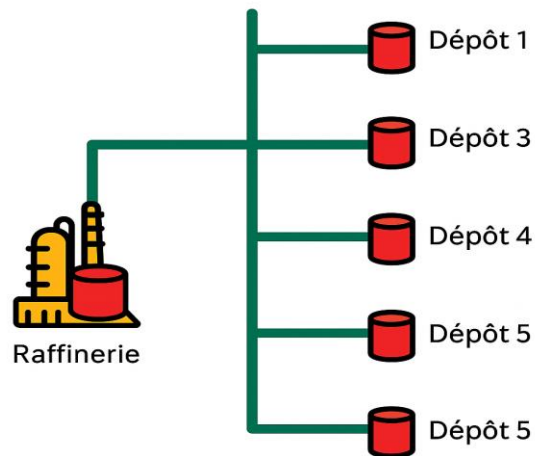


Figure 2.2: Structure Arborescente d'un Réseau de Transport par Pipeline Alimenté par une Raffinerie Unique

- **Réseau de pipelines :**

Cette configuration représente une forme plus évoluée et plus complexe que les précédentes (figureII.4). Elle intègre plusieurs points d'injection répartis tout au long du réseau [6]. Cette architecture permet une grande flexibilité dans la gestion des flux, mais nécessite des stratégies d'ordonnancement avancées pour éviter les conflits d'utilisation et optimiser les séquences de transport.

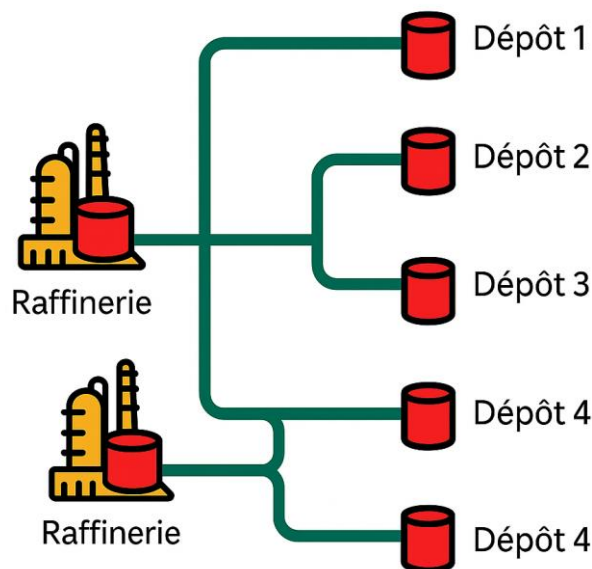


Figure 2.3: Schéma d'un Réseau de Pipelines Multi-Sources et Multi-Destinations Pour une Distribution Flexibilisée

Tableau 2.1: Comparaison des Configurations de Réseaux de Pipelines selon leur Complexité, Flexibilité et Domaine d'Application

Type de Configuration	Complexité opérationnelle	Flexibilité	Exemple d'application typique
Linéaire	Faible à Moyenne	Limitée	Transport simple raffinerie vers dépôts
Arborescente	Moyenne	Modérée	Distribution régionale
Réseau complexe	Élevée	Élevée	Distribution nationale à sources multiples

2.2.2 Cadre d'optimisation

a) Types de modélisation

i. Programmation mathématique

La programmation mathématique (PM) constitue l'un des fondements essentiels de la recherche opérationnelle. Elle représente une méthode centrale dans l'analyse quantitative pour l'aide à la décision. Par ailleurs, elle est largement utilisée dans les disciplines du management et de l'économie, où les problématiques de gestion sont traduites sous forme de modèles mathématiques.

En termes généraux, la programmation mathématique correspond à la formalisation d'un problème d'optimisation. Un tel modèle se compose de trois éléments principaux :

- Un ensemble de **contraintes**, exprimées sous forme d'équations ou d'inéquations,
- Un ensemble de **variables de décision**, continues ou discrètes, représentant les quantités à déterminer,
- Une **fonction objective**, définissant un critère à optimiser (par exemple : minimisation du coût, du temps, ou maximisation du profit).

Les contraintes établissent les relations entre les variables et délimitent l'espace de recherche, tandis que la fonction objective indique la direction optimale à suivre.

L'une des principales difficultés dans la mise en œuvre d'un modèle de programmation mathématique réside dans l'identification précise des variables pertinentes, la formulation cohérente des contraintes et l'alignement logique avec la fonction objective. Cette phase nécessite des compétences analytiques solides, une bonne maîtrise des outils mathématiques et une certaine expérience en modélisation.

Le schéma général de fonctionnement d'un modèle de PM est présenté à la figure 2.5. La performance du processus dépend à la fois du choix approprié du type de modèle à utiliser et de l'interopérabilité entre la modélisation mathématique et l'outil informatique utilisé pour l'implémentation.

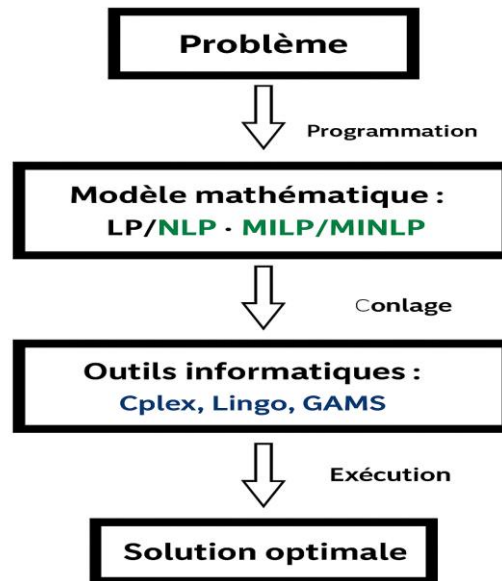


Figure 2.4: Processus de fonctionnement de PM

La programmation mathématique ne cherche pas uniquement à simuler ou prédire un comportement, mais à répondre à la question centrale : **"Quelle est la meilleure solution possible ?"** Cette finalité la distingue d'autres approches comme la simulation ("Que se passerait-il si ?"), les statistiques ("Qu'est-il arrivé ?") ou la prévision ("Que va-t-il se passer ?").

La programmation mathématique est aujourd'hui utilisée dans de nombreux domaines, notamment pour des problèmes de décision, de planification, d'ordonnancement de la production, de transport, en logistique militaire ou encore pour l'analyse de la croissance économique. L'exécution des modèles se fait généralement via des solveurs spécialisés tels que IBM ILOG CPLEX, LINGO, GUROBI ou GAMS, chacun étant adapté à des types particuliers de formulations mathématiques.

Selon la nature des relations entre les variables, plusieurs catégories de modélisation peuvent être distinguées :

- **Programmation linéaire (LP) :**

Tous les termes du modèle (fonction objectif et contraintes) sont linéaires. Elle est couramment utilisée dans de nombreux secteurs tels que l'agriculture, l'alimentation, l'énergie, la fabrication ou le transport pour optimiser l'utilisation des ressources.

- **Programmation non linéaire (NLP) :**

Lorsqu'au moins une relation dans le modèle n'est pas linéaire, la formulation devient non linéaire. Ce type de modélisation est souvent nécessaire lorsque les phénomènes à représenter ne peuvent être exprimés de manière linéaire.

- **Programmation linéaire ou non linéaire en nombres mixtes (MILP/MINLP) :**

Ces formulations intègrent des variables de décision de type entier ou binaire, en plus de variables continues. Elles offrent une grande flexibilité pour modéliser des systèmes complexes.

Par exemple, elles sont particulièrement adaptées à l'optimisation des opérations de transport de produits énergétiques (comme les carburants) via des pipelines, où certaines décisions doivent être prises de manière discrète (comme le choix d'un segment de pipeline à activer).

ii. Programmation par contraintes (CP)

La programmation par contraintes (CP) est un paradigme de résolution né dans le contexte de l'intelligence artificielle, initialement destiné au traitement de problèmes de faisabilité. Elle a par la suite été étendue à divers domaines, notamment à l'optimisation de tâches d'ordonnancement (problèmes de séquençement), à la planification, ainsi qu'à l'allocation de ressources. Cette dernière catégorie est souvent caractérisée par une lente convergence lorsqu'elle est traitée via des approches classiques, d'où l'intérêt d'en proposer une modélisation alternative par contraintes [25].

Comme le souligne l'auteur cité en référence [26], bien que les termes "programmation" en programmation par contraintes (CP) et en programmation mathématique (MP) soient identiques, ils renvoient à des concepts distincts. Dans le cadre de la CP, il s'agit de programmation au sens informatique, c'est-à-dire d'une manière de décrire et de résoudre un problème par l'énumération de contraintes. En revanche, la programmation mathématique fait référence à l'établissement d'un plan optimal, généralement exprimé sous forme d'un modèle mathématique à optimiser [27] [28].

b) Représentation des problèmes SMPS

Dans le cadre des problèmes d'ordonnancement des systèmes de transport multi-produit par pipeline (SMPS), la modélisation temporelle joue un rôle crucial. Deux approches de représentation temporelle sont généralement adoptées : la représentation en temps **discret** et celle en temps **continu**.

i. Représentation en temps discret

Cette méthode consiste à diviser l'horizon de planification en un ensemble d'intervalles temporels, de durée constante ou variable. Dans ce cadre, les événements, tels que le début ou la fin de l'injection d'un lot de produit (batch), ne peuvent avoir lieu qu'aux bornes de ces intervalles prédéfinis. La figure 2.5 illustre ce type de représentation.

Selon les travaux de référence [29], les principales variables de décision utilisées dans cette approche sont :

- $W_{i,j,t} \in \{0,1\}$: une variable binaire indiquant si le lot i commence à être injecté sur le pipeline j à l'instant t ;
- $B_{i,j,t} \geq 0$: variable représentant la taille du lot i démarrant sur le pipeline j à l'instant t ;
- $S_{s,t} \geq 0$: variable correspondant au niveau de stock du produit s au temps t .

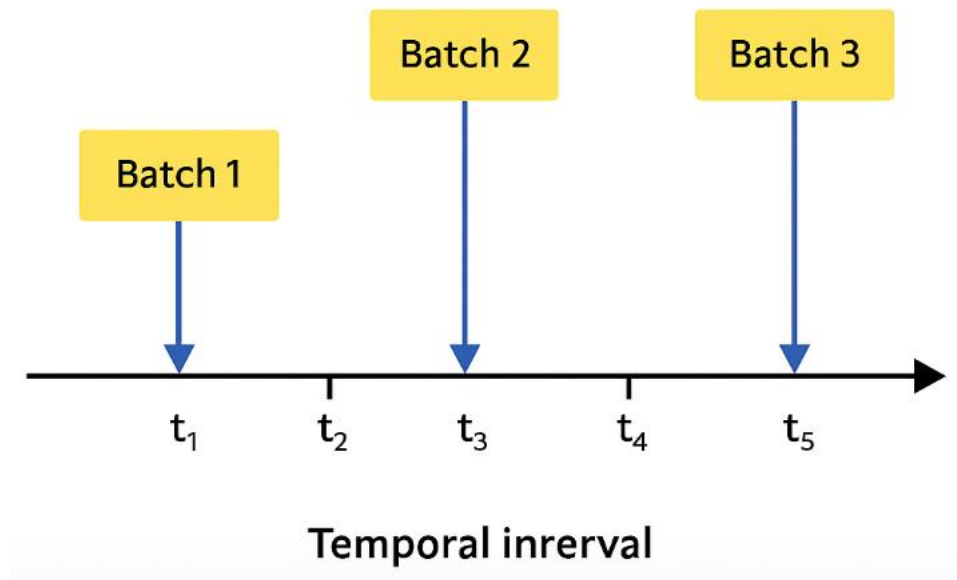


Figure 2.6: Illustration de la Représentation en Temps Discret de l'Injection Séquencée de Lots (Batches) dans un Pipeline

Le principal avantage de cette représentation réside dans sa simplicité. Elle repose sur une grille temporelle commune à l'ensemble des tâches et permet ainsi une modélisation uniforme des conflits de ressources partagées, ce qui est particulièrement utile dans les environnements compétitifs où plusieurs produits doivent emprunter les mêmes segments de pipeline simultanément [30].

Cependant, cette approche présente également des limites. Pour obtenir une solution précise, il est nécessaire d'adopter une discrétisation fine, c'est-à-dire une grille de temps très dense. Cette finesse accroît considérablement le nombre de variables binaires à considérer, ce qui entraîne une hausse significative du temps de calcul et rend la résolution difficile, en particulier pour les instances de grande taille. Par conséquent, l'applicabilité de cette méthode peut être limitée dans les cas industriels complexes.

iii. Représentation en temps continu

La représentation en temps continu repose sur le principe selon lequel les événements du système, tels que le démarrage d'un lot (batch), peuvent se produire à n'importe quel instant au cours de l'horizon temporel, sans être contraints à des points fixes. Contrairement à l'approche discrète, où les événements ne peuvent survenir qu'à des instants prédéfinis, le modèle en temps continu laisse au solveur d'optimisation le soin de déterminer précisément les instants d'occurrence des événements.

Cette approche introduit une variable supplémentaire, notée T_t , qui représente la valeur temporelle continue associée à l'instant t . Les principales variables de décision utilisées sont les suivantes :

- $W_{i,j,t} \in \{0,1\}$: variable binaire indiquant si le lot i débute sur la machine (ou segment de pipeline) j au temps t ;
- $B_{i,j,t} \geq 0$: taille du lot i démarrant sur la machine j à l'instant t ;

- $S_{s,t} \geq 0$: niveau de stock du produit s à l'instant t ;
- $T_{t+1} - T_t - 1 \geq 0$: intervalle de temps écoulé entre deux événements consécutifs.

Selon Méndez [31], cette méthode présente plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, elle permet une représentation plus compacte du problème, en réduisant considérablement le nombre de variables binaires nécessaires, comparativement à la modélisation en temps discret. De plus, elle autorise une synchronisation fine des événements, ce qui se traduit par une meilleure précision dans la planification, un espace de recherche plus réduit et, en général, un temps d'exécution plus court.

Un autre point important de cette représentation est sa flexibilité. Elle permet d'introduire facilement des contraintes temporelles liées au traitement, ce qui facilite son adaptation à des contextes industriels réels. Dans le cadre spécifique de l'ordonnancement de systèmes de transport multi-produit par pipeline, la modélisation en temps continu s'avère particulièrement pertinente, car elle reflète de manière plus proche de fonctionnement réel du système.

2.2.3 Méthodes de résolution

Ces dernières années, les techniques d'optimisation ont suscité un intérêt croissant, tant dans les milieux universitaires que dans les secteurs industriels. Plusieurs approches ont été développées pour traiter les problèmes d'ordonnancement, et le choix de la méthode appropriée dépend principalement de la taille du problème, de sa structure, ainsi que de son niveau de complexité. En ce qui concerne le problème spécifique de l'ordonnancement du transport multi-produit par pipeline (SMPS), quatre grandes catégories de méthodes de résolution ont été identifiées.

a) Méthodes exactes

Les méthodes exactes s'appuient sur des formulations mathématiques rigoureuses, généralement issues de la programmation linéaire (LP) ou de la programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP). Ces formulations sont résolues à l'aide d'algorithmes de type « Branch and Bound » ou « Branch and Cut », qui permettent d'explorer l'espace de solutions de manière structurée à travers des arbres de décision. Ces approches visent à garantir l'optimalité de la solution obtenue en procédant par une énumération partielle mais systématique des solutions possibles.

Toutefois, comme le souligne l'auteur cité en référence [32], le nombre de solutions potentielles croît de manière exponentielle avec l'augmentation du nombre de variables binaires dans le modèle MILP. Cette explosion combinatoire limite considérablement l'efficacité des méthodes exactes lorsque le problème atteint une certaine taille. Ainsi, leur applicabilité devient restreinte pour les instances de grande dimension, en raison des ressources computationnelles qu'elles exigent.

Il convient de noter que plusieurs solveurs commerciaux, tels que IBM ILOG CPLEX, intègrent ces algorithmes exacts dans leurs moteurs de résolution, et sont fréquemment utilisés dans la pratique.

c) Méthodes de décomposition

Les méthodes de décomposition constituent une classe d'approches conçues pour traiter des problèmes de grande envergure, qui ne peuvent pas être résolus de manière directe. Le principe fondamental repose sur la division du problème initial en sous-problèmes de plus petite taille, généralement plus simples à résoudre individuellement.

Le cas des systèmes SMPS, deux types de décomposition sont couramment appliqués :

- **La décomposition hiérarchique**, qui consiste à structurer le problème en plusieurs niveaux de décision (par exemple, un niveau stratégique suivi d'un niveau opérationnel) ;
- **La décomposition temporelle**, qui divise l'horizon de planification en segments successifs, facilitant ainsi la gestion des décisions au cours du temps.

Ces techniques permettent non seulement de réduire la complexité computationnelle, mais aussi d'améliorer la capacité des modèles à s'adapter à des échelles industrielles

d) Décomposition hiérarchique

La décomposition hiérarchique consiste à fragmenter le modèle initial en un modèle principal, appelé *master problem*, et en un ou plusieurs sous-modèles. Le modèle principal représente une version simplifiée ou agrégée du problème global, permettant d'en fixer les grandes lignes. Les sous-modèles sont ensuite utilisés pour affiner les décisions et obtenir une solution complète. Dans le cas des problèmes d'ordonnancement du transport multi-produit par pipeline (SMPS), cette méthode se traduit généralement par une décomposition en deux étapes : la première a pour objectif de déterminer l'ordre d'injection des produits, tandis que la seconde s'intéresse à la séquence de réception dans les dépôts. Les résultats du premier modèle servent alors de données d'entrée au second.

c) Décomposition temporelle

La décomposition temporelle repose sur la division de l'horizon de planification global en plusieurs sous-horizons temporels. À chaque étape, un problème réduit est résolu sur une fenêtre temporelle limitée à l'aide d'un algorithme à horizon glissant (rolling horizon). La solution obtenue pour une itération donnée est ensuite utilisée comme point de départ ou donnée d'entrée pour l'itération suivante, tandis que la fenêtre temporelle est décalée progressivement. Cette approche permet de réduire la complexité du problème à chaque étape, mais elle présente une limite importante : la solution finale n'est pas garantie optimale à l'échelle globale. Elle peut conduire à une solution locale, proche de l'optimum, mais sans assurance de performance optimale.

e) Méthodes approchées

Dans certaines situations, les méthodes exactes ne parviennent pas à résoudre les problèmes d'optimisation de grande taille ou à forte complexité dans des délais raisonnables. Cela a conduit au développement de méthodes approchées, parmi lesquelles figurent les heuristiques et métaheuristiques. Ces techniques ont pour but de trouver des solutions proches de l'optimum, en un temps de calcul acceptable.

Les heuristiques sont généralement conçues pour exploiter la structure particulière d'un problème donné, tandis que les métaheuristiques sont des cadres plus généraux (algorithmes génétiques, recherche tabou) capables de s'adapter à divers types de problèmes. Ces méthodes ont été appliquées avec succès aux problèmes SMPS, en particulier dans les cas où le réseau de pipeline présente une structure complexe et difficile à modéliser par des méthodes exactes.

f) Outils de simulation

La simulation constitue une approche complémentaire à l'optimisation. Comme le souligne [33], elle consiste à développer un modèle représentant le comportement réel du système, dans le but d'évaluer ses performances dans des conditions spécifiques. Les outils de simulation sont particulièrement utiles pour analyser des systèmes dynamiques, à grande échelle et soumis à des incertitudes, comme c'est souvent le cas dans les chaînes logistiques.

Selon [34], deux grandes stratégies de simulation peuvent être distinguées :

- **Le couplage simulation-optimisation :**

Cette méthode combine un modèle déterministe (par exemple un modèle MILP) avec une approche stochastique pour intégrer les aléas liés à la chaîne d'approvisionnement. Cela permet d'évaluer la robustesse des solutions en tenant compte de scénarios incertains.

- **Les approches basées sur les agents :**

Cette méthode repose sur la modélisation du système à travers une collection d'agents intelligents, autonomes et hétérogènes. Chaque agent simule le comportement d'un acteur ou d'une entité dans la chaîne logistique (comme un dépôt, un centre de distribution, ou une unité de production), ce qui permet une représentation décentralisée et dynamique du système global.

Ces deux approches permettent d'explorer des solutions adaptatives, notamment dans les contextes où l'incertitude et la variabilité rendent difficile l'utilisation exclusive de modèles purement déterministes.

2.3 Travaux existants sur le problème SMPS

Depuis les années 1970, et plus précisément à partir de 1974, de nombreux travaux de recherche ont été consacrés à la planification et à l'ordonnancement du transport des produits raffinés via des systèmes de pipelines multi-produits. Ces recherches visent principalement à développer des outils d'optimisation capables de générer des plans opérationnels efficaces, fondés sur des modèles réalistes correspondant aux contraintes des réseaux de transport utilisés dans l'industrie pétrolière.

Avant d'aborder les approches de résolution, il convient de définir clairement ce que l'on entend par ordonnancement du transport multi-produit par pipeline (SMPS). Il s'agit d'un problème relevant du niveau opérationnel de la planification, dont l'objectif est d'élaborer un plan détaillé des opérations de transport depuis la raffinerie jusqu'aux dépôts répartis le long du pipeline. Ce plan inclut la programmation des injections, des réceptions, du stockage et des livraisons. Il prend en compte différents paramètres, tels que :

- Les quantités disponibles à la raffinerie,

- Les besoins des centres de stockage et de distribution,
- La capacité de transport et les conditions d'exploitation du pipeline,
- Les performances des pompes,
- Les limitations en termes de capacités de stockage aux différents points du réseau,
- Et les propriétés physico-chimiques des produits transportés.

L'objectif global du problème SMPS est de parvenir à un équilibre spatio-temporel entre l'offre (fournie par les raffineries) et la demande (localisée dans les différents dépôts). L'ordonnancement optimal vise à déterminer la meilleure séquence de pompage, qui permet de satisfaire les demandes clients tout en minimisant les coûts d'exploitation du système, ou en maximisant la rentabilité, tout en respectant un ensemble complexe de contraintes opérationnelles.

Plus précisément, le problème consiste à déterminer pour chaque batch :

- La taille,
- La durée d'injection,
- Le type de produit transporté,
- Ainsi que les volumes et la durée de réception dans chaque centre actif.

Ces éléments constituent les principales variables de décision du modèle. Dans une approche d'optimisation, la problématique SMPS peut être formulée à travers la question suivante :

Comment optimiser l'ordonnancement du transport multi-produit par pipeline à l'aide de techniques d'optimisation ?

Cette question générale peut être décomposée en plusieurs sous-questions méthodologiques :

1. Quel type de modélisation est le plus adapté pour représenter fidèlement un problème de type SMPS ?
2. Quelle représentation temporelle (discrète ou continue) convient le mieux à ce type de système ?
3. Comment intégrer les coûts opérationnels dans le modèle d'optimisation ?
4. Quel est l'impact des différentes méthodes de résolution sur la qualité des résultats et sur le temps de calcul ?

Dans la littérature, les études traitant du problème SMPS sont généralement classées en fonction de la topologie du réseau de transport, c'est-à-dire selon la manière dont les sources (raffineries) et les destinations (dépôts) sont interconnectées. Dans cette optique, la présente revue bibliographique est structurée en deux parties :

- La première partie porte sur les travaux consacrés à l'ordonnancement dans des pipelines droit, c'est-à-dire des structures simples à une seule ligne de transport.

- La seconde partie traite des recherches portant sur l'ordonnancement dans des réseaux de pipelines complexes, impliquant plusieurs sources et plusieurs destinations interconnectées.

2.3.1 Ordonnancement du transport multi-produit dans un pipeline linéaire

Les premiers travaux traitant de l'ordonnancement dans un pipeline multi-produit remontent à [35], qui ont proposé un modèle simplifié visant à réduire le volume des interfaces formées entre deux produits consécutifs circulant dans la conduite. L'objectif principal était de limiter les pertes liées au mélange de produits incompatibles lors du changement de batch.

Dans la continuité de ces recherches, [36] ont approfondi ce problème en le modélisant à l'aide d'une formulation de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) en temps discret. Le pipeline est modélisé comme étant divisé en segments, chaque segment correspondant à un dépôt de destination. À l'intérieur de ces segments, les produits sont organisés sous forme de petits lots (batches), chacun contenant un seul produit, comme illustré à la figure 2.7. Le débit d'injection est considéré constant sur toute la période. Une approche de décomposition a été mise en œuvre pour fragmenter le problème principal en sous-problèmes plus simples, résolus ensuite à l'aide d'un algorithme de type *branch and bound*, dans le but de minimiser les coûts de pompage et de maintenance.

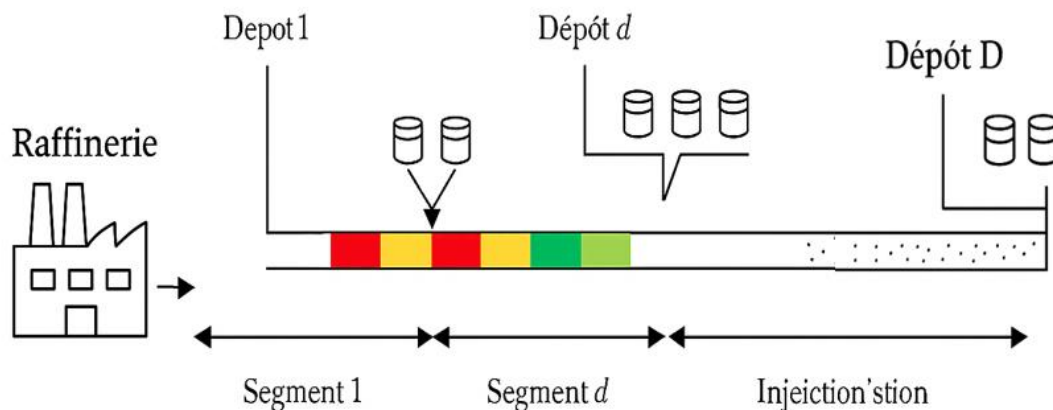


Figure 2.8: Processus de fonctionnement de PM

Par ailleurs, [37] ont proposé une méthode heuristique fondée sur l'exploitation des connaissances opérationnelles du système afin de construire un calendrier de pompage à long terme pour un pipeline reliant une raffinerie à plusieurs dépôts. Leur modèle prend en compte les contraintes de séquençage des produits, les limitations de capacité des réservoirs de stockage, ainsi que les exigences de livraison, dans le but de réduire les coûts liés au pompage et aux interfaces entre produits.

Depuis l'auteur Rejowski [38] ont, quant à eux, élaboré un modèle direct basé sur une formulation MILP en représentation discrète du temps, destiné à l'ordonnement à court terme, avec un horizon de planification limité à trois jours. La fonction objective cherche à minimiser les coûts d'exploitation, incluant les coûts de pompage, de stockage, et d'interface. Le modèle introduit également des contraintes assurant que le pipeline reste continuellement rempli, ainsi que des conditions spécifiques liées au pompage et à la réception des produits dans les dépôts. Toutefois, l'une des limites de ce modèle réside dans son incapacité à prendre en charge des opérations de réception simultanée dans plusieurs centres, ce qui peut générer des situations d'infaisabilité lors du calcul.

Afin de surmonter ces limites, les mêmes auteurs ont par la suite amélioré leur approche initiale. Ils ont proposé une version plus flexible du modèle MILP en y intégrant des contraintes supplémentaires relatives à la contamination entre produits. Ces nouvelles contraintes permettent de mieux contrôler la quantité d'interface générée et de réduire les pertes associées. En complément, des techniques de coupures entières (*cutting planes*) ont été utilisées pour accélérer la résolution et obtenir des solutions en des temps de calcul raisonnables [39].

Dans la continuité des travaux de [38] et [40] ont proposé une nouvelle approche de modélisation en utilisant une formulation MILP avec une représentation continue du temps. Cette représentation permet de s'affranchir des contraintes liées à la discrétisation temporelle et spatiale, couramment présentes dans les modèles classiques. L'intégration de cette approche dans le modèle d'ordonnement a permis une réduction significative du nombre de variables binaires, ainsi qu'une amélioration notable des performances en termes de temps de calcul. En outre, le modèle prend en compte les contraintes liées aux heures de pointe de consommation électrique, offrant ainsi une modélisation plus réaliste du contexte opérationnel.

Par ailleurs, Magalhaes [33] ont présenté un modèle d'ordonnement à moyen terme ($h_{max} = 150$ heures) pour un pipeline reliant une raffinerie à un dépôt unique. La résolution repose sur une méthode de décomposition hiérarchique utilisant deux modèles MILP en temps discret. La fonction objective vise à minimiser les coûts associés aux interfaces et aux changements de produit. Un an plus tard, [41] ont proposé une approche intégrée combinant la programmation par contraintes (CLP) et la programmation linéaire mixte (MILP), afin d'améliorer la qualité des solutions obtenues pour le même cas d'étude.

Les travaux de [42] ont marqué une avancée importante en combinant l'ordonnement du pipeline et la gestion des stocks dans les dépôts répartis le long de la conduite, à proximité des zones de consommation. Le modèle développé repose sur une formulation MILP en temps continu, appliquée à un horizon mensuel divisé en plusieurs périodes, chacune correspondant à une échéance de livraison. L'objectif est de maximiser le taux d'utilisation du pipeline tout en respectant les contraintes de contrôle qualité sur les produits réceptionnés. Ce modèle a été validé à travers une étude de cas réelle portant sur l'entreprise portugaise CLC.

Ces auteurs ont ensuite enrichi leur modèle en intégrant un débit variable et en tenant compte d'éventuelles interruptions dans le fonctionnement du pipeline. Ils ont également développé un algorithme de réordonnement destiné à réagir efficacement à des événements imprévus, tels que des arrêts temporaires de la conduite [43].

De leur côté, Cafaro [44] ont proposé un modèle MILP en temps continu pour gérer un ordonnancement dynamique sur un horizon glissant composé de plusieurs périodes. Ce modèle repose sur une mise à jour périodique des données à la fin de chaque période, et vise à minimiser le coût total d'exploitation, en tenant compte du retraitement des interfaces, des stocks en raffinerie et en dépôt, des demandes non satisfaites, ainsi que de l'utilisation partielle du pipeline.

Depuis l'auteur Rejowski [45] ont traité le même problème que [39], mais à travers un modèle MINLP en représentation continue, en considérant un pipeline fonctionnant par intermittence. Une nouveauté importante de leur travail réside dans la prise en compte du coût de pompage en fonction des rendements des stations de surpression. Les résultats montrent une amélioration tant au niveau de la qualité des solutions que du temps d'exécution.

Depuis l'auteur Cafaro [46] ont proposé une amélioration du modèle de [42], en réduisant sa taille et en optimisant les temps de résolution. La fonction objective inclut la minimisation des coûts liés aux interfaces, aux pénalités sur les demandes non satisfaites, ainsi qu'à l'inutilisation de la capacité du pipeline.

Depuis l'auteur Relvas [47] ont quant à eux proposé une heuristique pour modéliser l'ordonnancement d'un pipeline simple reliant une raffinerie à un dépôt unique, sur un horizon de planification d'un mois.

Enfin, Cafaro, [48] ont étendu le modèle MILP en temps continu introduit par Cafaro [40] afin de le rendre compatible avec un pipeline alimenté par plusieurs sources d'injection. Leur hypothèse de travail impose qu'une seule source soit active à chaque instant. L'objectif de leur modélisation est de déterminer les séquences optimales d'injection et de réception, permettant de minimiser les coûts de pompage et ceux liés au retraitement des interfaces contaminantes.

Depuis l'auteur Cafaro [49] ont élaboré un modèle de simulation à événements discrets en utilisant le logiciel Arena, dans le but de reproduire le fonctionnement opérationnel d'un système de pipeline reliant une raffinerie à plusieurs dépôts. Ce plan de simulation repose sur les résultats obtenus par la formulation mathématique présentée dans les travaux de [40]. Le modèle est structuré autour de trois blocs fonctionnels : la station d'entrée (raffinerie), les terminaux de réception (dépôts) et les segments de pipeline .

Cette approche permet de valider la planification globale à travers la construction d'un échéancier opérationnel détaillé et réalisable. Par ailleurs, une interface d'animation est intégrée, facilitant la visualisation dynamique des opérations du pipeline au fil du temps.

Depuis l'auteur Herrán [50] ont élargi le modèle MILP de [40] en introduisant une planification multi-périodes au lieu d'une période unique. De plus, ils ont intégré la planification de la production dans le processus de décision. Une formulation continue en programmation non linéaire en nombres mixtes (MINLP) est proposée pour représenter le problème de planification et d'ordonnancement d'un système de transport reliant une raffinerie à plusieurs dépôts via une seule canalisation, dans un horizon à court terme.

Depuis l'auteur MirHassani [51] ont présenté un modèle MILP en temps continu pour planifier l'ordonnancement d'un pipeline reliant une raffinerie à plusieurs centres de distribution. Leur modèle prend en compte divers éléments tels que les échéances quotidiennes

de la demande, les périodes de contrôle qualité, ainsi que les dates programmées pour la maintenance préventive. L'objectif est de minimiser les coûts liés aux interfaces, aux demandes non satisfaites et à l'utilisation partielle de la capacité du pipeline. Une méthode heuristique est appliquée pour répondre aux exigences de calcul dans les cas de grande taille.

Depuis l'auteur V. G. Cafaro [27] ont utilisé un modèle MILP en temps continu pour réduire le nombre de redémarrages du pipeline et les commutations de produits sur un horizon de planification à long terme. Le modèle est structuré en deux niveaux selon une approche de décomposition hiérarchique : le premier niveau détermine la séquence d'injection, tandis que le second fixe la séquence de réception. Un an plus tard, les mêmes auteurs [52] ont amélioré leur modèle pour permettre la réception simultanée d'un lot par plusieurs centres.

Depuis l'auteur S. Relvas [53] ont développé deux variantes de modèles MILP pour intégrer l'ordonnancement du transport et la gestion des inventaires dans un pipeline reliant une raffinerie à un centre unique. Leur approche vise à proposer des solutions de planification à moyen terme, efficaces et rapides à exécuter, tout en évitant le recours à une décomposition.

Depuis l'auteur MirHassani [54] ont présenté une amélioration du modèle de [55] en adoptant une formulation MILP en représentation continue, capable de modéliser un pipeline unidirectionnel où les dépôts intermédiaires peuvent à la fois injecter et réceptionner des produits. Cette méthode permet une estimation précise des coûts d'interface et une réduction significative des temps de calcul.

Selon l'auteur H. Mostafaei [56] ont conçu une méthode directe basée sur une formulation MILP unique en représentation continue, afin de résoudre le problème traité par C. A. Mendez, et J. Cerda [52], qui utilisait une méthode de décomposition hiérarchique. Le modèle d'ordonnancement est appliqué à un horizon mensuel divisé en quatre périodes hebdomadaires, avec une échéance de livraison à la fin de chaque période. L'objectif est de minimiser les coûts liés au pompage et à la maintenance du pipeline.

Selon l'auteur V. G. Cafaro [57] ont enrichi le modèle proposé par C. A. Mendez, et J. Cerda [66] en y intégrant des équations non linéaires afin de modéliser de manière précise la consommation d'énergie. La résolution du problème, formulé comme un programme non linéaire en nombres mixtes (MINLP) en temps continu, a été réalisée à l'aide de l'algorithme DICOPT du logiciel GAMS. L'objectif est de minimiser les coûts liés à la consommation d'énergie ainsi qu'aux opérations de redémarrage ou d'arrêt du flux dans un contexte réel d'ordonnancement, sur un horizon de planification de 660 heures.

Selon l'auteur A. Zaghian [58] ont fait évoluer le modèle de H. Mostafaei [56] en prenant en compte la possibilité de réception simultanée de plusieurs lots dans chaque centre actif à chaque nouvelle injection. Le modèle MILP proposé vise à minimiser les coûts d'exploitation, incluant ceux du pompage, de la contamination des produits, des demandes non satisfaites à la fin de l'horizon de planification, ainsi que les coûts liés au redémarrage ou à l'arrêt du flux du pipeline.

Selon l'auteur S. Moradi [59] ont abordé la problématique de l'ordonnancement en contexte stochastique, en tenant compte de la variabilité des demandes. Ils ont développé un modèle MILP en temps discret visant à minimiser les coûts de pompage et de contamination.

Pour gérer l'incertitude des données, ils ont appliqué l'approche "ε-robustness". Le système modélisé comprend une seule source, un seul dépôt, et un pipeline linéaire.

Selon l'auteur D. Dimas [60] ont présenté une formulation MILP en temps discret pour modéliser l'intégration de l'ordonnancement du pipeline avec la gestion des réservoirs des raffineries et des dépôts. L'objectif est de minimiser les coûts de stockage, de pompage, de sous-utilisation du pipeline et de contamination. Le modèle opère sur un horizon de sept jours, divisé en sept périodes, chaque période correspondant à une échéance de livraison aux clients.

Selon l'auteur T. Kirschstein [61] ont formulé l'ordonnancement dans un pipeline multi-produit comme un problème économique de gestion de lots, en supposant une séparation physique entre les produits. Le problème est résolu à l'aide d'une procédure heuristique visant à identifier une séquence de pompage minimisant les coûts de stockage et d'utilisation des installations.

Une méthode de décomposition structurelle en deux modules a été présentée par W. H. T. Meira [28]. Le premier module, ASM (Allocation and Sequencing Module), détermine la séquence d'injection de la raffinerie vers le pipeline. Le second, SM (Scheduling Module), planifie en détail les opérations de réception dans les dépôts sur l'horizon de planification. Le modèle repose sur une formulation MILP couplée à une approche heuristique. Dans ASM, une décomposition temporelle avec horizon glissant est appliquée, tandis qu'une décomposition stratégique est envisagée dans SM, abordant les opérations de livraison segment par segment.

Selon l'auteur W. Abdellaoui, A. Berrichi [62] ont présenté une formulation en programmation linéaire en nombres mixtes (MILP) avec une représentation temporelle continue pour l'ordonnancement d'un pipeline unidirectionnel sur un horizon de planification à moyen terme, composé de plusieurs périodes. Leur objectif principal était de déterminer une séquence d'injection minimisant le volume des interfaces formées entre les lots (batches) consécutifs.

Selon l'auteur S. Moradi [63] ont développé une méthode heuristique fondée sur une décomposition du problème, appliquée au modèle de base proposé par S. MirHassani [51]. Cette approche vise à réduire les coûts liés au pompage et aux interfaces. Selon les auteurs, l'efficacité de cette méthode repose sur une bonne compréhension de la structure du problème, ce qui permet d'évaluer plus précisément la qualité des solutions obtenues tout en diminuant le temps de calcul, en particulier pour les cas de grande taille.

Selon l'auteur M. Quinteros [64] ont mis en application un modèle de programmation en nombres entiers mixtes (MIP) sur un réseau opérationnel réel appartenant à une compagnie pétrolière chilienne. Le système modélisé est constitué d'un pipeline unidirectionnel, avec une seule entrée et plusieurs points de sortie. Les séquences d'injection sont fixées a priori, sur la base de l'expérience des opérateurs. Le modèle prend en compte la gestion des stocks à chaque dépôt tout au long de l'horizon de planification. Des pénalités sont appliquées en cas de non-respect du niveau minimal de stock de sécurité, afin de réduire les risques liés à la variabilité de la demande.

Selon l'auteur H. Mostafaei [65] ont conçu un modèle MILP intégré en temps continu pour l'ordonnancement du transport par pipeline multi-produit unidirectionnel, couplé à la gestion

des stocks dans les centres. Le modèle considère que les centres peuvent servir à la fois de points d'injection et de réception. La fonction objective vise à minimiser le coût total, incluant les coûts de pompage, de redémarrage des pompes, ainsi que le makespan, tout en respectant les contraintes de séquences interdites.

Selon l'auteur M. Bamoumen [66] ont proposé une approche hybride combinant une formulation MILP utilisée en post-optimisation et une méthode heuristique pour déterminer la séquence de pompage. L'objectif est de minimiser les coûts d'inventaire, d'interruption de pipeline, d'interface, ainsi que les coûts liés à la non-satisfaction des demandes dans les délais impartis.

Enfin, Selon l'auteur van Gelder [67] ont introduit une méthodologie intégrée pour évaluer la fiabilité de l'approvisionnement dans les systèmes de transport par pipeline en cas de panne de pompe. Pour modéliser la nature stochastique de ces pannes, ils ont utilisé un processus de Markov en temps discret associé à une simulation de type Monte Carlo.

2.3.2 Ordonnancement du transport multi-produit dans un réseau de pipelines

Selon l'auteur S. MirHassani and M. Ghorbanalizadeh [68] ont proposé un modèle d'optimisation basé sur une formulation MILP en temps discret, appliqué à un cas réel d'ordonnancement dans un réseau de pipeline multi-produit. Le système modélisé comprend une raffinerie, plusieurs branches de pipeline, ainsi que plusieurs dépôts. L'objectif de ce modèle est de minimiser le nombre d'interfaces entre produits en déterminant une séquence de pompage optimale. Toutefois, la complexité de calcul peut s'accroître selon le niveau de détail choisi dans la modélisation.

Selon l'auteur S. N. Boschetto, [69] ont conçu une approche hybride reposant sur une décomposition hiérarchique, combinant une formulation MILP en temps continu avec des techniques heuristiques. Cette approche a été appliquée à un réseau de pipelines unidirectionnel brésilien, composé de quatre raffineries, trente pipelines, deux ports, six dépôts et deux marchés finaux. La méthode est organisée en cinq blocs fonctionnels :

- **Bloc de planification** : détermine le volume total à transporter en utilisant une formulation MILP continue.
- **Bloc d'affectation** : applique une heuristique pour fixer les séquences initiales, les volumes, les durées des lots, et le contenu de chaque segment de pipeline.
- **Bloc de séquençage** : améliore les séquences obtenues via un algorithme génétique.
- **Bloc de simulation** : établit les limites inférieures et supérieures des débits de pompage.
- **Bloc de synchronisation (timing)** : utilise une formulation MILP pour déterminer les timings détaillés des opérations.

Selon S. Vlot [29], l'objectif principal de cette approche est de fournir une solution faisable, mais non nécessairement optimale. En outre, en cas d'in-faisabilité, la stratégie à adopter pour corriger la situation n'est pas explicitement définie.

Depuis l'auteur H. Mostafaei [49] ont développé un modèle MILP en représentation continue pour l'ordonnancement à court terme d'un pipeline arborescent à sources multiples, en s'appuyant sur l'approche « Resource-Task Network ».

Parallèlement, T. M. T. Lopes, [70] ont abordé le même problème que S. N. Boschetto, [69], mais en appliquant une méthode de programmation par contraintes. Leur stratégie repose sur une décomposition en deux phases :

- **Phase de planification** : une heuristique de génération aléatoire est utilisée pour définir les volumes à transporter entre dépôts, les trajets empruntés, et les quantités par segment, avec pour objectif de réduire le trafic et les interfaces.
- **Phase d'ordonnement** : à partir des données de livraison issues de la phase précédente, cette étape permet de fixer les séquences et les durées de pompage dans chaque pipeline. Cette phase constitue le noyau du processus décisionnel.

Enfin, depuis l'auteur Q. Liao [71] ont introduit un modèle mathématique de type MINLP en temps discret, pour générer le calendrier opérationnel d'un réseau complexe reliant plusieurs raffineries à plusieurs centres. Ce modèle est résolu à l'aide d'un algorithme heuristique, et vise à déterminer les séquences d'injection qui permettent de minimiser les coûts d'exploitation liés aux redémarrages de pompes, à la consommation électrique et à la gestion de la contamination des produits.

2.4 Analyse des résultats de la revue de littérature

L'analyse approfondie de la littérature sur l'ordonnement du transport multi-produit par pipeline (SMPS) met en évidence les conclusions suivantes :

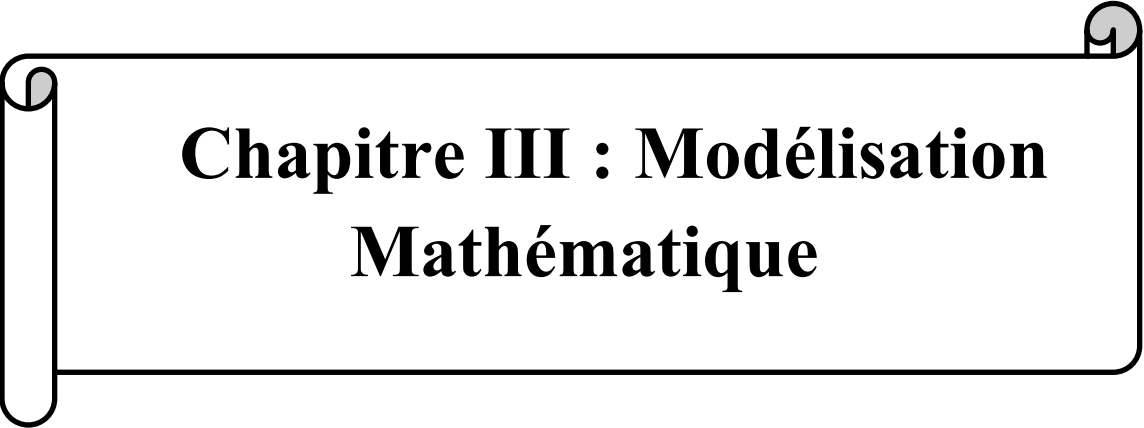
- La programmation linéaire en nombres mixtes (MILP), ainsi que sa variante non linéaire (MINLP), constituent la méthode de modélisation la plus répandue dans les travaux portant sur les problèmes SMPS. Cette approche permet de représenter avec rigueur les contraintes opérationnelles réelles, tout en s'adaptant aisément à différentes configurations de réseaux de pipelines.
- L'un des aspects essentiels dans la construction d'un modèle MILP/MINLP pour les problèmes SMPS est la représentation du temps et du volume, servant à décrire la migration des lots (batches). Deux types de modélisations sont couramment employés : la représentation **discrète** et la représentation **continue**. Cette dernière est généralement préférée dans la littérature car elle reflète mieux les dynamiques réelles du système, tout en réduisant le nombre de variables, la taille du modèle, et le temps de calcul requis (CPU).
- Les fonctions objectifs adoptées peuvent être de nature opérationnelle (par exemple, maximiser le taux d'utilisation du pipeline) ou économique (telle que la minimisation du coût global d'exploitation). La majorité des contributions se concentrent sur des objectifs économiques, visant à réduire divers postes de coûts : pompage, contamination, insatisfaction de la demande, stockage, etc. Le choix des critères à optimiser dépend directement des objectifs spécifiques à chaque étude.
- De nombreux articles valident les modèles proposés à travers des cas d'application réels, en recourant principalement à des solveurs exacts tels que IBM ILOG CPLEX ou GUROBI pour obtenir des solutions optimales. Lorsque les temps de calcul deviennent prohibitifs, certaines études intègrent des méthodes heuristiques ou des stratégies de décomposition. Toutefois, ces approches ne garantissent pas l'optimalité des solutions obtenues.

- L'extension des modèles à des réseaux de pipelines complexes est souvent envisagée comme une prolongation des modèles conçus pour des pipelines droit. La plupart des approches méthodologiques sont d'abord développées dans le cadre de pipelines simples.
- Une tendance récente dans les travaux SMPS est le passage de modèles mono-périodes à des modèles multi-périodes, où la fin de chaque période correspond à une échéance de livraison pour les dépôts.
- La gestion des réservoirs dans les centres de stockage et de distribution constitue un défi important, en raison de la complexité à modéliser rigoureusement leurs contraintes. C'est pourquoi peu d'études se sont penchées sur l'intégration conjointe de la gestion des stocks et de l'ordonnancement des opérations dans les pipelines.
- L'objectif idéal, tel que poursuivi par les contributions les plus avancées, est de proposer un modèle d'ordonnancement capable de déterminer la séquence optimale de pompage, tout en localisant avec précision les lots dans le pipeline et en assurant le suivi des stocks dans les différents centres. Ce modèle vise également à satisfaire les demandes périodiques dans les délais impartis, avec un coût minimal et dans le respect des contraintes opérationnelles réelles.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les principaux outils d'optimisation mobilisés pour résoudre les problèmes d'ordonnancement du transport par pipeline multi-produit. Il a également mis en évidence la manière dont les chercheurs ont adapté ces approches afin de développer des méthodologies génériques, rapides et capables de générer des plannings faisables et efficaces pour les systèmes d'oléoducs multi-produits.

Une revue de la littérature approfondie a été réalisée, mettant en lumière les aspects critiques des approches existantes. Cette analyse constitue un point d'appui pour situer notre propre contribution, laquelle sera détaillée dans le chapitre 3.



**Chapitre III : Modélisation
Mathématique**

3. Modélisation Mathématique

3.1 Introduction

Transporter plusieurs produits par un même pipeline est une idée séduisante sur le plan logistique, mais en pratique, les choses sont loin d'être simples. En effet, il existe des risques de contamination entre les lots adjacents qui circulent dans la canalisation, ainsi que des contraintes de fonctionnement des différents éléments du système. De plus, il faut satisfaire les demandes des clients dans les délais impartis tout en minimisant les coûts opérationnels.

Ce chapitre débutera par une présentation détaillée de notre problématique. Ensuite, nous plongerons dans une modélisation mathématique rigoureuse, basée sur la programmation linéaire mixte en nombres entiers utilisant une représentation continue (MILP – Continuous). L'objectif est d'élaborer un plan d'injection qui soit à la fois réaliste et optimal, tout en respectant les contraintes réelles de fonctionnement du système.

3.2 Présentation de problème

Le système de transport par pipeline multi-produit relie une raffinerie à plusieurs centres de stockage et de distribution de carburants, répartis le long de la canalisation (Figure 3.1). Cette infrastructure stratégique et complexe constitue l'objet central de notre étude.

Dans ce système, chaque centre alimente ses réservoirs en prélevant directement les produits injectés dans le pipeline par la raffinerie. Ces produits (appelés *batches*) sont introduits successivement sans séparation physique, générant inévitablement une zone de contamination entre deux *batches* adjacents.

Implantés à proximité des bassins de consommation, les centres répondent chacun à une demande locale spécifique, dictée par leur clientèle. Le planning de livraison s'articule autour d'un horizon temporel divisé en périodes, chacune soumise à une échéance impérative.

Notre objectif est de proposer un modèle mathématique robuste fondé sur une programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP) en représentation continue. Ce modèle vise à générer un plan d'ordonnancement opérationnel et réaliste, tout en minimisant les coûts d'exploitation du pipeline. Dans cette étude, ces coûts correspondent principalement à la dégradation de la qualité des produits induite par les contaminations. La formulation du modèle devra intégrer les contraintes opérationnelles suivantes :

- Capacité limitée des réservoirs ;
- Spécificités de fonctionnement du pipeline ;
- Disponibilité logistique des centres ;
- Demande des clients finaux ;

- Règles de séquençement des produits lors de l'enchaînement des batches.

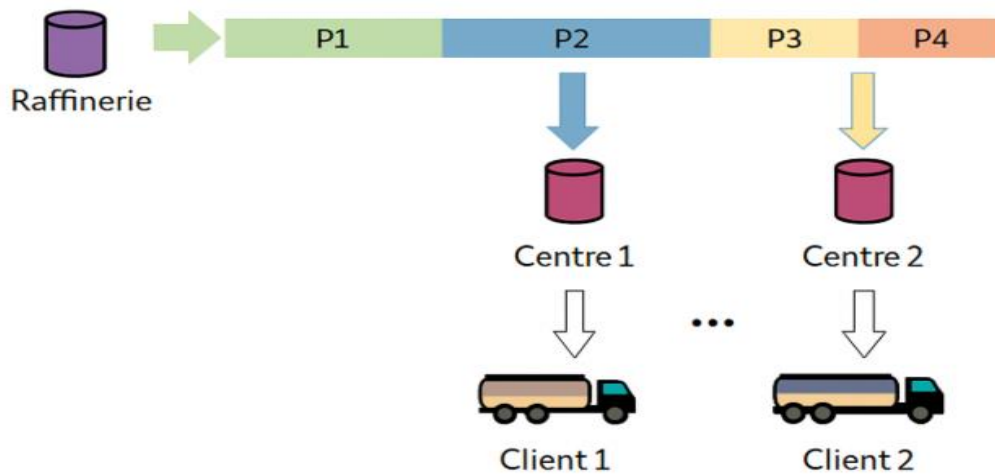


Figure 3.1: Modèle de Distribution de pipeline multi-produits en Aval

3.3 Modélisation mathématique

3.3.1 Hypothèses du travail

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

1. Écoulement unidirectionnel : le flux circule dans une seule direction, de la raffinerie vers les centres de distribution (gauche → droite).
2. À chaque nouveau pompage, un seul produit peut être injecté de la raffinerie au pipeline.
3. Réception simultanée possible : plusieurs centres peuvent recevoir un même batch de produit en parallèle, ce qui permet une meilleure gestion des livraisons.
4. Pipeline toujours en charge : Le pipeline doit rester plein en permanence, afin de maintenir une pression stable dans la canalisation.
5. État initial de système est connu.
6. Injection sans séparation physique : les produits sont introduits de manière continue, sans interface physique. Cela crée des zones de contamination entre deux batches successifs.
7. Volumes d'interface pré-estimés : les zones des interfaces sont évaluées à partir de données historiques, et leur taille dépend du couple de produits adjacents.
8. Séquences interdites : certaines combinaisons de produits ne peuvent pas se suivre dans le pipeline.
9. Capacités de stockage au niveau de raffinerie et dépôts sont limitées.

3.3.2 Nomenclature Description

Ensembles	
tl	Ensemble de tous les batches comprend $li \cup ln$
li	Ensemble des batches à l'intérieur du pipeline à l'état initial
ln	Ensemble de nouveaux batches à injecter dans le pipeline

c	Ensemble des centres
s	Ensemble des produits
p	Ensemble des périodes
Paramètres	
cd_{a,b}	Coût unitaire de dégradation de la qualité du produit entre les frontières de produits <i>a</i> et <i>b</i> à l'intérieur du pipeline
ci_a	Coût unitaire d'injection d'un mètre cube de produit <i>a</i> de la raffinerie au pipeline
vint_{a,b}	Volume d'interface résulte entre les batches <i>i</i> et <i>i + 1</i> contenant respectivement le produit <i>a</i> et <i>b</i>
sa_{a,b}	Matrice booléenne représentant les séquences possibles et interdites entre les produits <i>a</i> et <i>b</i> dans le pipeline.
dmin /dmax	Débit minimum/maximum d'injection de la raffinerie vers le pipeline (m^3 /h)
vi_h	Le volume du batch <i>h</i> qui est à l'intérieur du pipeline à l'état initial
vtp	La capacité totale de pipeline en (m^3)
cvc_j	Coordonnée volumétrique du centre <i>j</i> mesurée par le volume total entre la raffinerie (origine) et le centre <i>j</i> (m^3)
pil_h	La coordonnée volumétrique supérieure du lot <i>h</i> à l'intérieure du pipeline à l'état initial
qmax_j qmin_j	Le débit minimum/maximum de réception de pipeline vers le centre <i>j</i> (m^3/h)
crp_a	La capacité maximale du réservoir de produit <i>a</i> dans la raffinerie en (m^3 /h)
M	Un grand nombre en (m^3)
sip_{a,j}	Le stock initial de produit <i>a</i> au centre <i>j</i>
dpc_{a,j,t}	La demande du client pour le produit <i>a</i> au centre <i>j</i> à la période <i>t</i>
hm	Horizon temporel de la planification (heure)
fp_i	L'heure de fin de période <i>t</i>
smin_{a,j} smax_{a,j}	La capacité minimum/maximum de réservoir de produit <i>a</i> dans le centre <i>j</i>
Variables Continuous	
vil_{i,a,b}	Volume d'interface entre les batches <i>i</i> Et (<i>i + 1</i>), contenant respectivement les produits <i>a</i> et <i>b</i>

$vpp_{i,a}$	Le volume initial d'un nouveau batch i du type a qui sera injecté à l'intérieur du pipeline
hdi_i	Heure de début de l'injection du nouveau lot i de la raffinerie au pipeline
di_i	La durée d'injection du nouveau batch i
$dr_{h,j,i}$	Durée de réception de batch h au centre j pendant le pompage de batch i
vl_i	Le volume initial du nouveau batch i
$vrc_{h,j,i}$	Le volume de batch h à transférer du pipeline vers le centre j lors de l'injection du nouveau batch i
$vr_{h,i}$	Volume du batch h à l'intérieur du pipeline à la fin de l'injection du nouveau batch i
$csv_{h,i}$	La borne supérieure de batch h à l'intérieur du pipeline à l'heure de fin de l'injection du nouveau lot i
$vt_{h,a,j,i}$	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
$sfl_{a,j,i}$	Niveau de stock du produit a au centre j à la fin de l'injection du nouveau batch i
$vdc_{a,j,i}$	Le volume du produit a transféré de centre vers le marché de consommation pendant la période de pompage du nouveau lot i
Variables binaires	
$edp_{i,a}$	Variable binaire égale à 1 si le nouveau batch i contient le produit a sinon $edp_{i,a} = 0$
$rc_{h,j,i}$	Variable binaire égale à 1 si une partie du lot h peut être reçue au centre j sinon $rc_{h,j,i} = 0$
$lp_{i,t}$	Variable binaire égale à 1 si l'injection du batch i est terminé pendant la période t sinon $lp_{i,t} = 0$

3.4 La fonction objective

L'équation (3-1) représente notre fonction objective. Elle vise à minimiser le coût total de dégradation dû aux interfaces résulte entre les bordures des batches des produits adjacents.

$$\sum_{i \in tl} \sum_{a \in s} \sum_{b \in s} cd_{a,b} \cdot vil_{i,a,b} \quad 3-1)$$

3.5 Contraintes

Nous avons réparti les contraintes en quatre catégories distinctes. Chacune d'elles correspond à une étape fonctionnelle bien définie du système de transport multi-produit par pipeline qui sont les suivantes :

3.5.1 Séquence de pompage

- **Affectation des produits aux nouveaux batches :**

Cette contrainte (3-2) vise à garantir qu'un nouveau lot ne contient au plus qu'un seul type de produit.

$$\forall i \in ln, \sum_{a \in s} edp_{i,a} \leq 1 \quad (3-2)$$

- **Séquencement**

La contrainte (3-3) assure que les batches pompés sont des batches remplis.

$$\forall i \in ln, \sum_{a \in s} edp_{i,a} \leq \sum_{a \in s} edp_{i-1,a} \quad (3-3)$$

- **Affectation initiale des lots existants**

La contrainte (3-4) permet d'identifier le type des produits existants au pipeline à l'état initial.

$$\forall h \in li, \forall a \in s, edp_{h,a} = pil_{h,a} \quad (3-4)$$

- **Début d'injection des nouveaux batches**

En se basant sur l'hypothèse 2, la contrainte (3-5-1) définit la date de début d'injection de chaque nouvelle injection. L'équation (3-5-2) indique quant à elle la date de début d'injection du premier nouveau batch.

$$hdi_{i+1} = 0 \quad (3-5-1)$$

$$\forall i \in ln, hdi_i = hdi_{i-1} + di_i \quad (3-5-2)$$

- **Volume d'interface**

Les batches des produits déplace dans le pipeline sans aucun séparation physique, cela conduit à la création de certain volume d'interface entre produits différents a et b . La modélisation de ce volume $-vil_{i,a,b}$ est représenté par la contrainte (3-6).

$$\forall i \in tl, \forall a \in s, \forall b \in s, vil_{i,a,b} \geq vint_{a,b} \cdot (edp_{i,a} + edp_{i+1,b} - 1) \quad (3-6)$$

- **Séquence autorisée**

La contrainte suivante (3-7) sert à contrôler les séquences autorisés et non autorisés afin d'éviter les grandes dégradations de qualité de produit transporté.

$$\forall i \in ln, \forall a, b \in s, a \neq b, edp_{i,a} + edp_{i+1,b} \leq 1 + sa_{a,b} \quad (3-7)$$

- **Durée minimale d'injection**

La Contrainte (3-8) établit une durée minimale d'injection pour chaque nouveau lot, en fonction de son volume. Elle impose que le temps d'injection soit au moins égal au volume du lot divisé par un débit fixe de 300 unités par heure.

$$\forall i \in ln, \quad di_i \geq \frac{vl_i}{300} \quad (3-8)$$

La Contrainte (3-9) représente le volume des batches existe au pipeline à l'état initial.

$$\forall h \in li, \quad vl_h = vi_h \quad (3-9)$$

- **Capacité réservoir raffinerie**

La Contrainte (3-10) impose une limite maximale au volume de chaque produit injecté dans un nouveau lot, en fonction de la capacité disponible. Plus précisément, le volume de produit a dans un lot ne peut pas dépasser la capacité du réservoir dédié à ce produit. Cela permet de respecter les contraintes physiques du système de stockage, et d'éviter tout dépassement de capacité.

$$\forall i \in ln, \forall a \in s, \quad vpp_{i,a} \leq crp_a \quad (3-10)$$

- **Contraintes auxiliaires**

La contrainte suivante est utilisée pour assurés la cohérente de modèle.

$$\forall h \in tl, \quad \sum_{a \in s} vpp_{h,a} = vl_h \quad (3-11)$$

3.5.2 Flux et volumes dans le pipeline

- **Conservation de volume de pipeline**

La Contrainte (3-12) permet d'assuré que le pipeline reste plein par l'application de principe la quantité entrée égale aux sommes de quantité sortante.

$$\forall i \in ln, \quad vl_i = \sum_{\substack{h \in tl \\ h \leq i}} \sum_{j \in c} vrc_{h,j,i} \quad (3-12)$$

- **Mise à jour de contenu de pipeline**

Le pipeline soumis à un flux contenu de mouvement des batches, la mise à jour de volume des batches existant dans de pipeline est assuré par la constraints (3-13) ou le volume de batch h à la fin de nouveau pompage de batch i égale au volume de ce batch h aux fins de pompage de batch $i - 1$ mois la somme de volume transportés aux centres. L'équation (3-14) représente le contenu de pipeline pour le premier pompage.

$$\forall i \in ln, \forall h \in tl, h < i, \quad vrl_{h,i} = vrl_{h,i-1} - \sum_{j \in c} vrc_{h,j,i} \quad 3-13)$$

$$\forall h \in li, \quad vrl_{h,li+1} = vi_h - \sum_{j \in c} vrc_{h,j,li+1} \quad 3-14)$$

La Contrainte (3-15) permet de calculer le volume restant d'un nouveau batch i dans le pipeline à la fin de pompage de ce batch .

$$\forall i \in ln, \quad vrl_{i,i} = vl_i - \sum_{j \in c} vrc_{i,j,i} \quad 3-15)$$

- **Coordonnée volumétrique des batches**

La Contrainte (3-16) permet de calculer la position de la borne supérieure d'un lot h dans le pipeline à la fin de l'injection du lot i . Elle indique que cette coordonnée est obtenue en partant du volume total disponible dans le pipeline, puis en soustrayant les volumes restants des lots précédents

$$\forall i \in ln, \quad csv_{h,i} = vtp - \sum_{\substack{l \in tl \\ l \leq h-1}} vrl_{l,i} \quad 3-16)$$

3.5.3 Transferts, stocks et distributions aux centres

- **Condition de réception de pipeline vers centre |j|**

La Contrainte (3-17) assure que le batch h est dans une position qui permet au centre final de réception ce batch sachant que le dernier centre peut recevoir tous le batch h c.à.d. la partie pure et partie interface de ce batch h .

$$\forall i \in ln, \forall h \in tl, h \leq i, \quad csv_{h,i} \geq cvc_{nc} \cdot rc_{h,nc,i} \quad 3-17)$$

- **Condition de réception pour centres intermédiaires**

La Contrainte (3-19) permet de vérifier que la position d'une partie pure de batch h dans le pipeline est compatible avec sa réception par un centre intermédiaire.

$$\forall i \in ln, \forall h \in tl, 1 < h \leq i, \forall j \in c, \quad csv_{h,i} - \sum_{a \in s} \sum_{b \in s} vil_{h-1,a,b} \geq cvc_j \cdot rc_{h,j,i} \quad 3-18)$$

Les Contraintes (3-19), (3-20) et (3-21) (3-22) sont des contraintes auxiliaires. Contrainte (3-19) vise à vérifier qu'un batch h réceptionné par le centre j assure les conditions de réception. Et contrainte (3-21) lie le volume effectivement reçu par un centre j par le variable binaire $rc_{h,j,i}$ qui indique si le centre j reçoit un le batch h . Contraintes (3-22,3-23) relient le type de produit a qu'il contient ce batch h .

$$\forall i \in ln, \forall h \in tl, \forall j \in c, \quad 3-19)$$

$$csv_{h+1,i-1} \leq cvc_j + vtp \cdot (1 - rc_{h,j,i}) - \sum_{\substack{k \in c \\ k < j}} vrc_{h,k,i}$$

$$\forall j \in c, \forall i \in ln, \forall h \in tl, h \leq i, \quad vrc_{h,j,i} \leq M \cdot rc_{h,j,i} \quad 3-20)$$

$$\forall i \in ln, \forall h \in tl, h \leq i, \forall a \in s, \forall j \in c, \quad vt_{h,a,j,i} \leq M \cdot edp_{h,a} \quad 3-21)$$

$$\forall i \in ln, \forall h \in tl, h \leq i, \forall j \in c, \quad \sum_{a \in s} vt_{h,a,j,i} = vrc_{h,j,i} \quad 3-22)$$

- **Mise à jour des réservoirs au centre**

La Contrainte (3-23) permet de mettre à jour dynamiquement le stock d'un produit a dans un centre j à la fin de chaque nouveau pompage de batch i .

$$\forall a \in s, \forall j \in c, \forall i \in ln, i > li + 1,$$

$$sfl_{a,j,i} = sfl_{a,j,i-1} + \sum_{\substack{h \in tl \\ h \leq i}} vt_{h,a,j,i} - vdc_{a,j,i} \quad 3-23)$$

La Contrainte (3-24) représente la condition initiale

$$\forall a \in s, \forall j \in c,$$

$$sfl_{a,j,li+1} = sip_{a,j} + \sum_{\substack{h \in tl \\ h \leq li+1}} vt_{h,a,j,li+1} - vdc_{a,j,li+1} \quad 3-24)$$

- **Capacités de stockage aux centres**

La Contrainte (3-25) permet de maintenir les niveaux de stock d'un produit dans chaque centre dans des limites acceptables.

$$\forall a \in s, \forall j \in c, \forall i \in ln, \quad smin_{a,j} \leq sfl_{a,j,i} \leq smax_{a,j} \quad 3-25)$$

- **Volume distribué de centre vers les clients finals**

La Contrainte (3-26) garantit que la quantité de produit distribuée par un centre ne dépasse jamais le stock dont il dispose au moment de livraison.

$$\forall a \in s, \forall j \in c, \forall i \in ln, \quad vdc_{a,j,i} \leq sfl_{a,j,i} \quad 3-26)$$

3.5.4 Planification de la livraison multi-période

- **Affectation des batches au période de livraison**

Contrainte (3-27) impose que chaque période définie dans le planning contienne au moins un nouveau batch pompé, cette contrainte assure mieux la satisfaction de demande de chaque période.

$$\forall t \in p, \sum_{i \in ln} lp_{i,t} \geq 1 \quad (3-27)$$

Contrainte (3-28) assure que chaque lot est pompé exactement une fois, et uniquement s'il contient un produit.

$$\forall i \in ln, \sum_{t \in p} lp_{i,t} = \sum_{a \in s} edp_{i,a} \quad (3-28)$$

- **Plage temporelle de livraison**

Les Contraintes (3-29,3-30) garantit que la liaison entre la dure de pompage et de livraison pour être cohérent en période d'ordonnancement.

$$\forall i \in ln, \forall t \in p, t > 1, hdi_i + di_i \geq fp_{t-1} \cdot lp_{i,t} \quad (3-29)$$

$$\forall i \in ln, \forall t \in p, \quad (3-30)$$

$$hdi_i + di_i \leq fp_t + (1 - lp_{i,t}) \cdot (hm - fp_t)$$

- **Satisfaction des demandes par période**

La Contrainte (3-31) vise à garantir au mieux la satisfaction de la demande des centres sur chaque période, en fonction des livraisons planifiées.

$$\forall a \in s, \forall j \in c, \forall i \in ln, i < |ln| - 1, \forall t \in p, \quad (3-31)$$

$$\sum_{\substack{k \in ln \\ k \leq i}} vdc_{a,j,k} \geq \sum_{\substack{tt \in p \\ 1 < tt \leq t}} dpc_{a,j,tt} \cdot (lp_{i,t} + lp_{i+1,t})$$

3.6 Conclusion

La modélisation proposée dans ce chapitre pour l'ordonnancement du transport multi-produit par canalisation à base de MILP en représentation continue représente un outil puissant pour les entreprises pétrolières. Elle intègre les aspects techniques du système, les contraintes logistiques de la fonction de système du transport de la raffinerie jusqu'à le client des centres.

Dans le chapitre 4, nous avons testés notre modèle sur un cas réel existe en Algérie afin de voir la validation de notre proposition pour le monde réel.



Chapitre IV : Cas d'étude et Résultats

4. Cas d'étude et Résultats

4.1 Introduction

L'objectif principal du modèle d'optimisation développé dans cette étude est de déterminer une planification optimale du transport et du stockage des matériaux, en prenant en compte les contraintes de capacité, de volume, de temps et de coûts logistiques. Ce modèle permet de minimiser les coûts globaux tout en assurant la satisfaction des besoins de chaque période et de chaque site.

Ce chapitre vise à tester notre modèle MILP sur un cas réel algérien, afin d'évaluer sa robustesse. Pour cela, une présentation du problème étudié est fournie dans la section 4.2. Ensuite, la section 4.3 est réservée aux résultats et à leur interprétation.

4.2 Présentation de cas d'étude

Dans ce mémoire, nous avons testé notre proposition de modèle d'ordonnancement opérationnel du système de transport par pipeline, traité dans la thèse de Modélisation, Ordonnancement d'un système de transport multi produits – un cas d'étude Algérien- [72].

La ligne nationale d'approvisionnement en carburants ASR « Arzew - Sidi Bel Abbès - Remchi » constitue notre système d'étude. Cet ouvrage stratégique joue un rôle clé dans le réseau de distribution de Sonatrach. Ce pipeline multi-produits, qui s'étend à travers le nord de l'Algérie, approvisionne une part majeure des stations-service des régions Ouest et Sud-Ouest du pays.

Concrètement, ce système repose sur un pipeline de 166 km de long, capable de transporter jusqu'à 10 000 m³ de carburants. Il relie la raffinerie d'Arzew, située dans la ville d'Oran, à deux centres névralgiques de stockage et de distribution. Le premier se trouve à Sidi Bel Abbès, tandis que le second est implanté à Remchi, dans la wilaya de Tlemcen. Une infrastructure essentielle, donc, pour assurer un approvisionnement fluide des régions concernées.

Les emplacements de la raffinerie et des centres de distribution sont exprimés à l'aide de coordonnées volumétriques, lesquelles indiquent la capacité de transport cumulée du pipeline entre ces différents points. Concrètement, la raffinerie est positionnée à 0 m³, le centre de Sidi Bel Abbès à 6 100 m³, et celui de Remchi à 10 000 m³.

4.2.1 Data utilisée

Notre étude aborde l'ordonnancement opérationnel à long terme, avec un horizon de planification "*HmaxHmax*" de 672 heures (28 jours). Cet horizon est segmenté en quatre périodes distinctes (*T1* à *T4*), chacune clôturée par une échéance fixe correspondant aux dates limites de livraison des commandes clients centres de distribution (voir Tableau 4.1). la date de fin de chaque période est 168h, 336h, 504h et 672h, respectivement.

Tableau 4.1: Demande des centres de distribution des carburants

	Centre 1				Centre 2			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4

P1	6300	8820	8820	8820	22050	22050	22050	22050
P2	1113	2940	1260	2940	5880	5880	5880	5880
P3	63	273	273	273	1107.5	1107.5	1107.5	1107.5
P4	0	0	0	0	1107.5	1107.5	1107.5	1107.5

Le tableau 4.2 présente les capacités des réservoirs des centres. Il indique, pour chaque produit et chaque centre, trois valeurs : la capacité maximale, la capacité minimale et l'état initial du stock.

Tableau 4.2: Capacité : maximum/minimum & stock initial

	Centre1			Centre2		
	Max	Min	Initial	Max	Min	Initial
P₁	5700	540	4400	20900	1980	16600
P₂	1615	153	1006	9025	855	5510
P₃	428	40.5	281	950	90	680
P₄	0	0	0	4750	450	3900

Le tableau 4.3 indique le coût (première valeur) et le volume de contamination résultant de la séquence entre deux produits adjacents. Le symbole "X" signale les séquences interdites.

Tableau 4.3: Coût & volumes des interfaces

	P₁	P₂	P₃	P₄
P₁	0	1.6/28	1.8/30	X
P₂	1.6/28	0	X	0
P₃	1.8/30	X	0	X
P₄	1.8/30	X	X	0

Le débit de pompage de la raffinerie vers le pipeline est de $[0,300]m^3$. La capacité d'alimentation de réservoirs des centres des raffinerie est représentée dans le tableau 4.4.

4.3 Résultats et Interprétation

4.3.1 Présentation des caractéristiques technique de modèle MILP

Pour le codage et l'exécution du modèle d'ordonnancement basé sur la formulation MILP appliquée au cas du pipeline multi-produit ASR, nous avons utilisé le logiciel IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, version 6.3. L'environnement de test s'est appuyé sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core i7-10510U (8 cœurs) cadencé à 1.80 GHz, avec une fréquence turbo pouvant atteindre ~ 2.3 GHz. Les statistiques de performance de la résolution sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 4.5).

Tableau 4.5 :Résultats détaillés de la résolution MILP par CPLEX.

Indicateur	Valeur
Contraintes	8563
Variables totales	4352
Variables binaires	428
Autres variables	3924
Coefficients non nuls	37322
Fonction objectif (minimisée)	727.2
Noeuds explorés	32 231
Noeuds restants	7
Nombre total d'itérations	69 339 257
Objectif moyen	727.2
Solutions entières générées	1

La valeur de la fonction objective obtenue est de 727,2 unités de coût, ce qui représente le coût total de dégradation résultant entre les bordures des batches es lots de produits durant l'horizon de planification

a) Temps de résolution :

Après un temps d'exécution de 10 000 secondes (environ 3 heures, voir figure 4.2), la méthode de résolution a fourni une solution optimale de 727,2 unités de coût. Compte tenu de la complexité du modèle, ce temps de calcul est raisonnable car il permet d'obtenir une solution exacte et réalisable en monde réel.

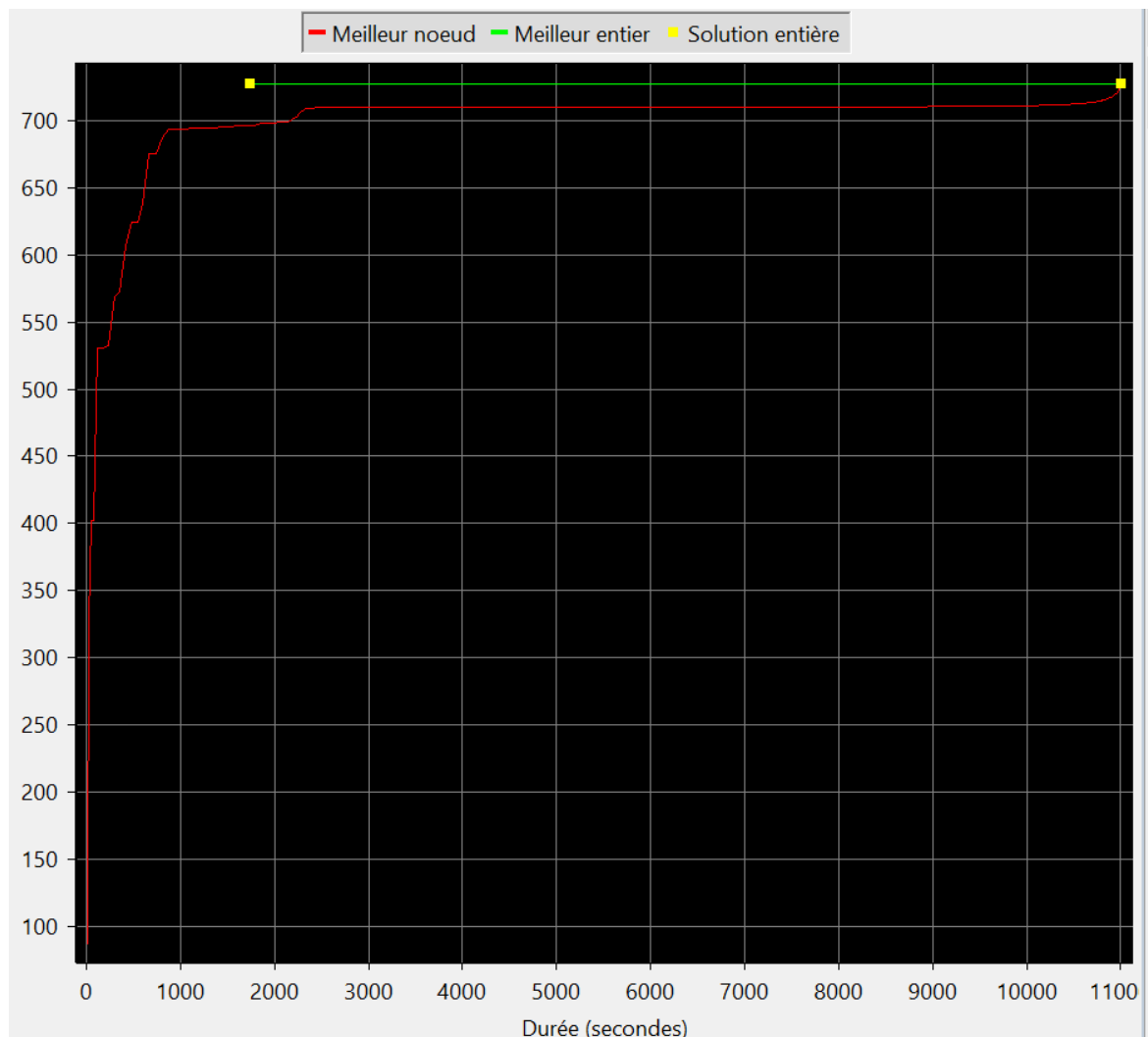


Figure 4.1: évolution de la fonction objective au cours du temps

4.4 Séquence et caractéristiques des injections

a) Affectation des produits au nouveau batches

Le modèle d'optimisation a généré une séquence d'injection depuis la raffinerie vers le pipeline, composée de 15 nouveaux lots (batches). La localisation des produits au sein de ces lots est présentée comme suit :



Figure 4.2: la Séquence de pompage

b) Planning d'ordonnement de pipeline d'ASR

Les valeurs des variables de décision obtenues ont été utilisées pour construire le plan d'ordonnement détaillé des opérations au niveau de la raffinerie d'Arzew, du pipeline, ainsi que des deux centres de distribution (voir Figure 4.3). Cette représentation facilite la compréhension et la communication avec les responsables des compagnies pétrolières.

La Figure 4.4 illustre le planning opérationnel optimal du système de transport par pipeline ASR sur un horizon temporel d'un mois (672 heures). La première ligne de ce plan montre l'état initial du pipeline, qui contient deux anciens lots (batches), h1 et h2, correspondant respectivement aux produits P4 et P1. Les volumes initiaux de ces lots sont :

- h1 : 520 m³ avec une borne supérieure de 10 000 m³
- h2 : 9 480 m³ avec une borne supérieure de 9 480 m³

Le planning fournit l'ensemble des données nécessaires au responsable d'exploitation. La partie gauche de la figure décrit en détail la nouvelle séquence de pompage depuis la raffinerie d'Arzew vers le pipeline : heures de début et de fin de pompage, volumes, types de produits, ainsi que les débits d'injection.

En raison du flux continu des produits, une mise à jour constante du contenu du pipeline est requise. La partie centrale de la figure représente l'état du pipeline à la fin de chaque opération de pompage, avec la localisation, les volumes et le type de produit dans chaque batch

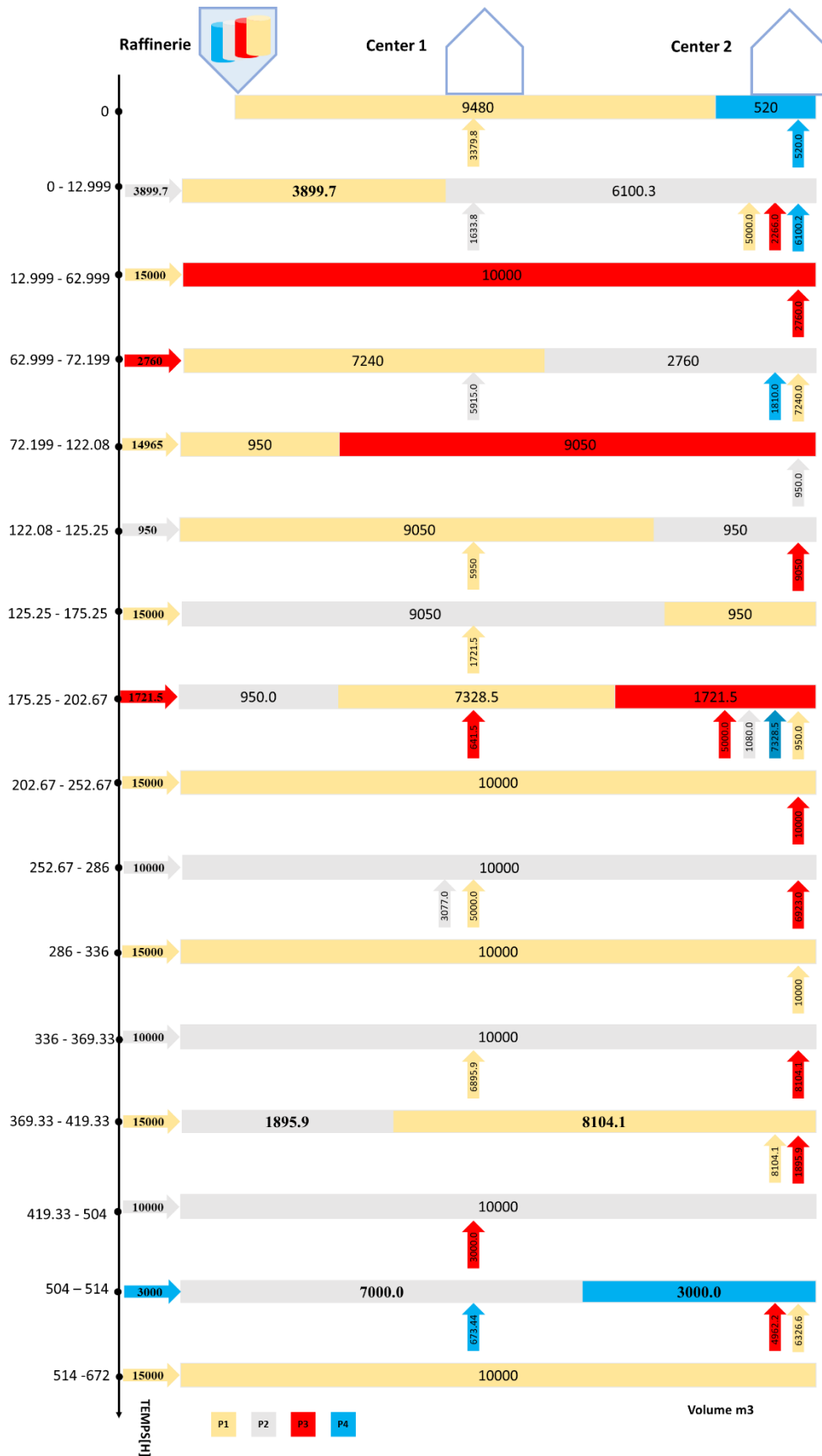


Figure 4.5: Planning d'ordonnancement de pipeline d'ASR

c) Volumes des nouveaux batches

Le tableau 4.6 représente les volumes de chaque nouveau batch pompé de la raffinerie vers le pipeline.

Tableau 4.6 : Volumes des nouveau injectés

Nouveau batch	Volume (m^3)
Lot 1	3899.7
Lot 2	15000
Lot 3	2760
Lot 4	14965
Lot 5	950
Lot 6	15000
Lot 7	1721.5
Lot 8	15000
Lot 9	10000
Lot 10	15000
Lot 11	10000
Lot 12	15000
Lot 13	10000
Lot 14	3000
Lot 15	15000

d) Temps d'injection des nouveaux batches

Le tableau 4.7 et figure 4.5 donne les détails nécessaires pour ordonnancer le début de pompage pour chaque nouveau lot et leur durée afin d'assurer les demandes des clients des centres au temps souhaitées.

Tableau 4.7 : Début et durée d'injection de chaque lot

Lot	Début (s)	Durée (l)
Lot 1	0	12.999
Lot 2	12.999	50
Lot 3	62.999	9.2
Lot 4	72.199	49.883
Lot 5	122.08	3.1667
Lot 6	125.25	50
Lot 7	175.25	5.7383
Lot 8	202.67	50
Lot 9	252.67	33.333

Lot 10	286	50
Lot 11	336	33.333
Lot 12	369.33	50
Lot 13	419.33	84.667
Lot 14	504	10
Lot 15	514	158

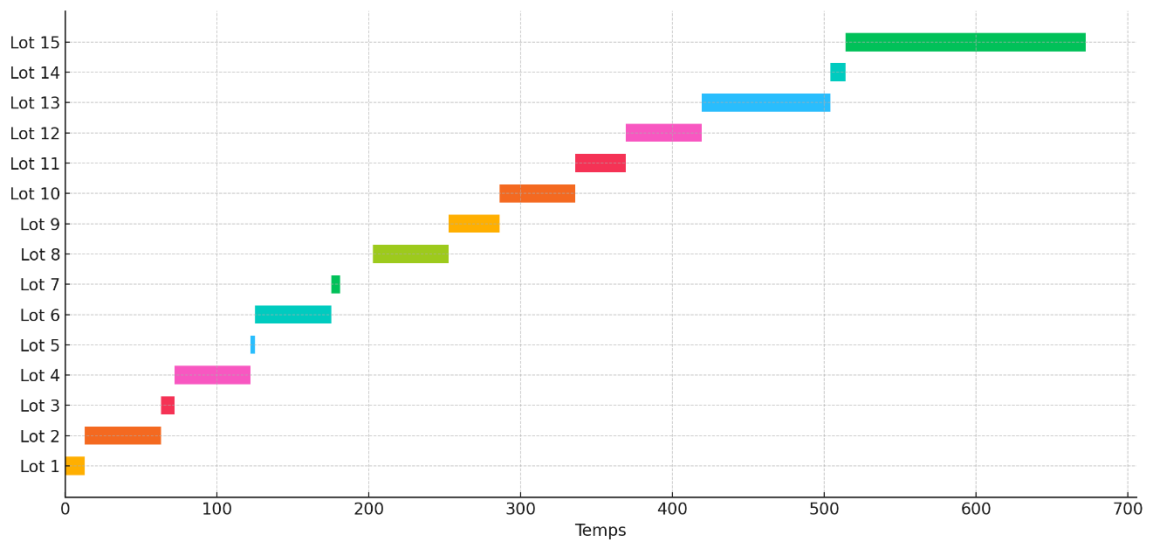


Figure 4.5 : Diagramme de Gantt représentant les injections dans le pipeline

4.5 Évolution des stocks et livraisons

a) Suivi des niveaux de stock dans les centres de distribution

La figure de 4- 6 représente les variations des niveaux de stock des réservoirs dans chaque centre de distribution, pour chaque produit, durant l'horizon de planification. À travers ces graphiques, le gestionnaire peut suivre les opérations en cours dans le réservoir : soit une réception de volume, soit une distribution aux clients des centres, soit aucune activité.



Figure 4.6 : Évolution du stock dans les centres

b) Volume Transféré des centres aux marchés

Les graphiques suivants (figure 4.7) permettent d'identifier les volumes distribués par les centres aux marchés locaux pour chaque type de produit.

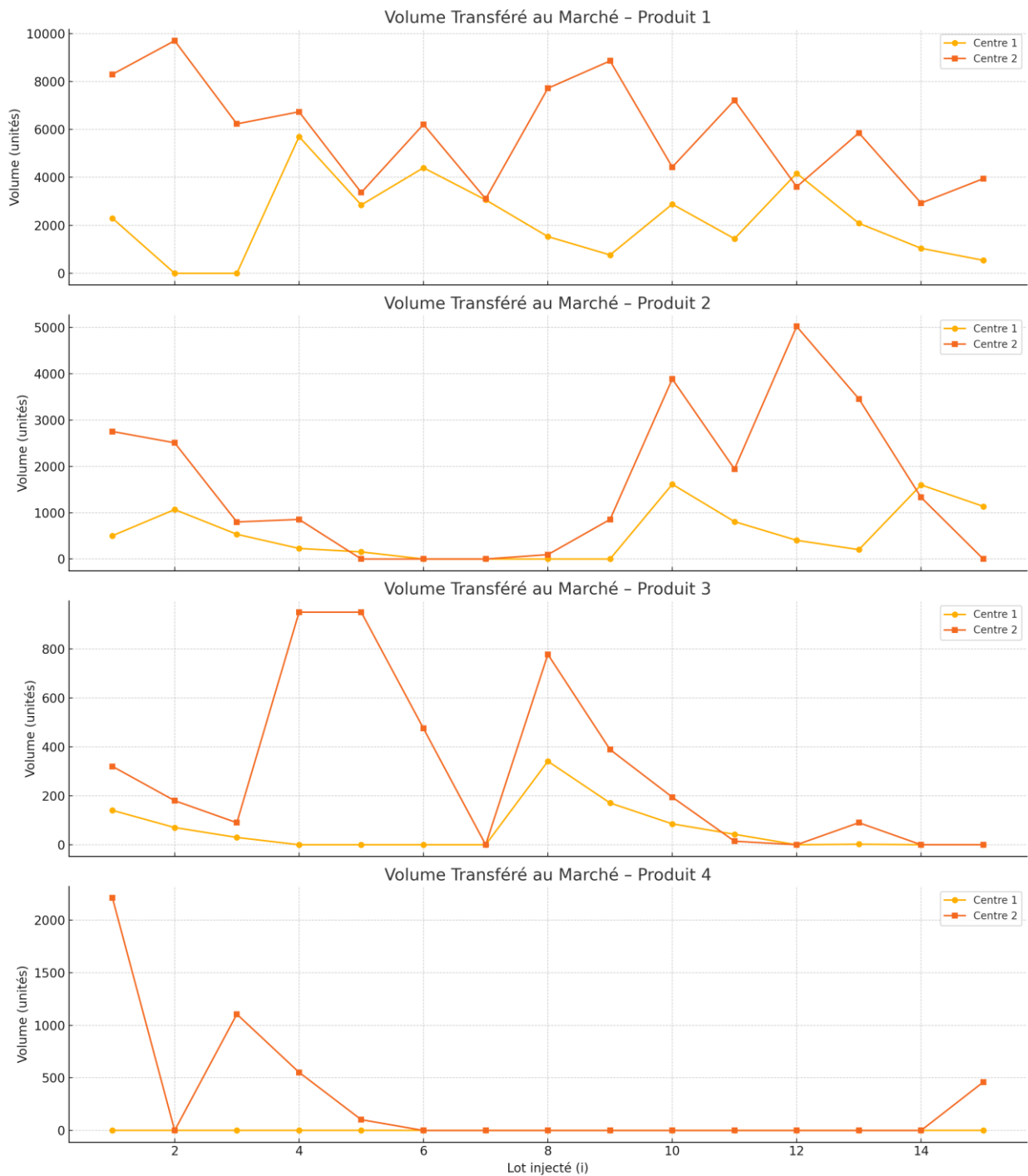


Figure 4.7 : Volumes distribuer par centre, produit aux clients finals

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé notre modèle d'optimisation pour la planification des injections de carburant dans un système multiproduit et multi-dépôts, via l'étude de cas du pipeline ASR situé au nord de l'Algérie. Cette canalisation assure la distribution de quatre types de carburant entre une raffinerie et deux centres de stockage-distribution localisés à différents endroits. Ces centres disposent d'une zone de stockage pour approvisionner les marchés locaux. Le modèle proposé aide les gestionnaires de l'entreprise à prendre des décisions, telles que la

détermination des séquences de pompage (incluant leurs caractéristiques : date de début, durée et volume à injecter). Il fournit également toutes les décisions nécessaires à la gestion des centres en termes de réception, stockage et distribution.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire a permis d'apporter une contribution méthodologique et appliquée à l'amélioration des performances du système de transport des carburants, à travers l'étude approfondie du transport multi-produits par pipeline. Dans un contexte où la maîtrise des flux logistiques devient un levier stratégique de compétitivité, notamment dans des secteurs aussi sensibles que celui de l'énergie, la capacité à planifier, ordonnancer et optimiser les séquences de transport est essentielle pour garantir à la fois la qualité de service, la réduction des coûts, et la minimisation des risques environnementaux.

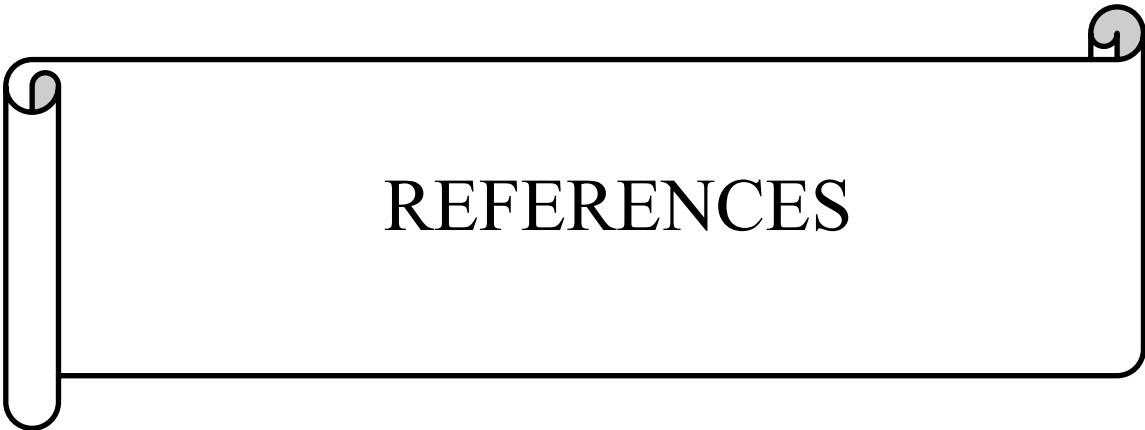
L'étude a débuté par une analyse globale de l'industrie pétrolière, en soulignant la place centrale qu'occupe le transport dans la chaîne d'approvisionnement. Ensuite, à travers un état de l'art structuré, nous avons identifié les approches classiques et les récentes avancées scientifiques dans le domaine de l'ordonnancement des systèmes de pipelines. Cette synthèse a mis en lumière la définition de contexte de modélisation proposée de ce mémoire.

La partie centrale du mémoire a porté sur la formulation d'un modèle mathématique permettant d'optimiser l'ordonnancement et l'affectation des produits dans un pipeline multi-produits. Ce modèle, formulé sous forme de programme linéaire en nombres mixtes (MILP), intègre plusieurs contraintes réalistes telles que la capacité des stocks, les priorités de livraison, la gestion des interfaces et les délais imposés. L'objectif poursuivi était double : réduire les volumes de pertes générées par les interfaces, tout en assurant la satisfaction maximale des besoins des dépôts.

Les résultats obtenus à partir du cas d'étude analysé ont validé la pertinence de l'approche adoptée. Ils ont démontré qu'une planification optimisée permet non seulement de mieux utiliser les ressources logistiques disponibles, mais aussi de réduire les coûts opérationnels liés à la dégradation des produits.

En guise d'ouverture, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. D'abord, l'introduction de paramètres stochastiques permettrait de mieux prendre en compte les incertitudes de la demande et les aléas opérationnels. Ensuite, l'extension du modèle à des réseaux de pipelines interconnectés avec plusieurs points d'injection et de réception offrirait une représentation encore plus fidèle de la réalité industrielle. Enfin, l'intégration de techniques d'intelligence artificielle, comme les algorithmes d'apprentissage automatique, pourrait ouvrir la voie à des solutions plus rapides et plus adaptatives en environnement complexe.

Ainsi, au-delà de la seule amélioration des performances techniques, ce travail s'inscrit dans une vision plus large de transition vers une logistique pétrolière plus intelligente, plus économe et plus durable.



REFERENCES

Références

- [1] : OPEC – World Oil Outlook 2045, 2021.
- [2] : Stevens, P. (2008). The coming oil supply crunch. London : Chatham House.
- [3] :Nnadili, B. N. (2006). “Supply and demand planning for crude oil procurement in refineries.” Thèse de doctorat, MIT.
- [4] : Lisitsa, S., Levina, A., & Lepekhin, A. (2019). Supply-chain management in the oil industry. In E3S Web of Conferences (Vol. 110, p. 02061). EDP Sciences.
- [5] :Hassen, K., & Szucs, D. (2012). Supply chain optimization in the oil industry: A case study of MOL Hungarian Oil and gas PLC.
- [6] :Rejowski, R., & Pinto, J. M. (2008). “Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling.” *Computers & Chemical Engineering*, 32(11), 2750-2766.
- [7] :Frittelli, J. (2014). “U.S. Rail Transportation of Crude Oil: Background and Issues for Congress.” CRS Report R43390, Congressional Research Service.
- [8] :Green, K. P., & Jackson, T. (2015). “Safety in the Transportation of Oil and Gas: Pipelines or Rail?” *Fraser Institute Research Bulletin*.
- [9] : Cafaro, V., Cafaro, D. C., Mendez, C. A., & Cerda, J. (2011). Discrete-event simulation guides pipeline logistics.
- [10] :https://www.opec.org/opec_web/en/press_room/5532.htm#:~:text=producing%20countries%20were%20the%20United,oil%20demand%20in%20OPEC%20Member
- [11] :Hussain, R. A. E. D., Assavapokee, T. I. R. A. V. A. T., & Khumawala, B. A. S. H. E. E. R. (2006). Supply chain management in the petroleum industry: challenges and opportunities. *International Journal of Global Logistics & Supply Chain Management*, 1(2), 90-97.
- [12] : Yergin, D. (2011). The prize: The epic quest for oil, money & power. Simon and Schuster.
- [13] : Sampson, A. (1975). The seven sisters: the great oil companies and the world they made. (No Title).
- [14] : Tolf, R. W. (2020). The Russian Rockefellers: the saga of the Nobel family and the Russian oil industry. Hoover Press.
- [15] : Mitchell, T. (2011). Carbon Democracy: Political Power in the Age of Oil.
- [16] : Jaffe, A. M., & Soligo, R. (2007). The international oil companies.
- [17] : Bamberg, J. (2000). British Petroleum and Global Oil 1950-1975: The Challenge of Nationalism (Vol. 3). Cambridge University Press.
- [18] : Fattouh, B., & Sen, A. (2015). Saudi Arabia oil policy: more than meets the eye?.
- [19] : <https://www.energyinst.org/statistical-review>

- [20] : <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=fr>
- [21] : <https://publications.opec.org/asb>
- [22] : Gary, J. H., Handwerk, J. H., Kaiser, M. J., & Geddes, D. (2007). Petroleum refining: technology and economics. CRC press.
- [23] : Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y. (2018). Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices. Gulf professional publishing.
- [24] : Leffler, W. L., Pattarozzi, R., & Sterling, G. (2011). Deepwater petroleum exploration & production: a nontechnical guide. (No Title).
- [25] [source : www.ibm.com]
- [26] : 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
- [27] : [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.
- [28] : W. H. T. Meira, L. Magatão, S. Relvas, A. P. Barbosa-Póvoa, F. Neves Jr, and L. V. Arruda, “A heuristic 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.
- [29] : S. Vlot, “Batch scheduling of multi-product pipeline networks,” 2017.
- [30] : [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.
- [31] : 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.
- [32] : 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.
- [33] : M. V. Magalhaes, E. T. Fraga, and N. Shah, “Refinery scheduling,” 2004.
- [34] : [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.
- [35] : R. Techo and D. Holbrook, “Computer scheduling worlds biggest product pipeline,” *PIPELINE & GAS JOURNAL*, vol. 201, no. 5, pp. 27–32, 1974.
- [36] : 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.

- [37] : 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.
- [38] : 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.
- [39] : —, "Efficient milp formulations and valid cuts for multiproduct pipe line scheduling," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, no. 8, pp. 1511–1528, 2004.
- [40] : 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.
- [41] : 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.
- [42] : 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.
- [43] : 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.
- [44] : 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.
- [45] : 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.
- [46] : 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.
- [47] : 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.
- [48] : —, "Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 48, no. 14, pp. 6675–6689, 2009.
- [49] : 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.
- [50] : 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.

[51] :S. MirHassani, S. Moradi, and N. Taghinezhad, “Algorithm for long-term scheduling of multiproduct pipelines,” *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 50, no. 24, pp. 13899–13910, 2011.

[52] : 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.

[53] : 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.

[54] : 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.

[55] : 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.

[56] : 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.

[57] :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.

[58] : 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.

[59] : 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.

[60] : 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.

[61] : 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.

[62] : 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.

[63] : 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.

[64] :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.

[65] : 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.

[66] :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.

[67] : 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.

[68] : S. MirHassani and M. Ghorbanalizadeh, “The multi-product pipeline scheduling system,” *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 891–897, 2008.

[69] : 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.

[70] : 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.

[71] :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.

[72] : Abdellaoui, W. (2021). *Modélisation, ordonnancement d’un système de transport multi-produits-un cas d’étude Algérie* (Doctoral dissertation, Université aboubakr belkayed, Tlemcen, Algérie).

Résumé :

Ce mémoire s'attache à concevoir et implémenter un modèle d'optimisation visant à améliorer la performance du transport de carburants dans un système multiproduit et multi-dépôts par pipeline. En s'appuyant sur une approche de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP), le modèle permet de générer un ordonnancement optimal des injections, avec à la clé une réduction sensible des volumes contaminés et des pertes qui en découlent.

Après un état des lieux rigoureux de la littérature consacrée aux réseaux de transport pétrolier, le modèle est appliqué à un cas d'étude concret : le pipeline ASR, qui relie la raffinerie d'Arzew aux centres de Sidi Bel Abbès et Remchi. Les simulations, menées à l'aide du solveur IBM ILOG CPLEX, révèlent des gains notables en matière de gestion des stocks, de réduction des contaminations, ainsi qu'une planification des livraisons plus fluide et mieux maîtrisée.

Au-delà de ce cas spécifique, ce travail propose un véritable outil d'aide à la décision, robuste et adaptable à différents contextes logistiques. Il ouvre également des perspectives intéressantes vers des approches dynamiques comme le Rolling Horizon, en réponse aux incertitudes croissantes qui affectent la demande et les opérations terrain.

Abstract:

This thesis is dedicated to the development and implementation of an optimization model aimed at enhancing the efficiency of fuel transportation within a multi-product, multi-depot pipeline network.

Leveraging a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) framework, the proposed model generates an optimal injection scheduling plan, significantly minimizing product contamination volumes and the resulting operational losses.

Following a comprehensive review of existing literature on petroleum transport networks, the model is applied to a real-world case study involving the ASR pipeline, which connects the Arzew refinery to the distribution centers of Sidi Bel Abbès and Remchi. Simulations conducted using the IBM ILOG CPLEX solver demonstrate substantial improvements in inventory management, reduction in inter-product contamination, and more streamlined, controlled delivery planning.

Beyond this specific application, the proposed model serves as a robust decision-support tool, adaptable to various logistical configurations. Furthermore, the study opens promising avenues for incorporating dynamic planning techniques—such as the Rolling Horizon approach—to better address increasing uncertainties in demand and field operations.

Mot clé : chaîne logistique pétrolière transport modale MILP multi produits pipeline

المخلص

يركز هذا البحث على تصميم وتنفيذ نموذج رياضي لتحسين أداء نظام نقل الوقود في بيئة تتضمن تنوعًا في المنتجات وتعددًا في نقاط التخزين، باستخدام منهجية البرمجة الخطية المختلطة بالأعداد الصحيحة. يهدف النموذج إلى توليد خطة فعالة لجدولة عمليات الحقن، مع تقليل الكميات الملوثة والخسائر الناتجة عنها بشكل ملموس.

بعد إجراء تحليل دقيق وشامل للدراسات السابقة المتعلقة بشبكات نقل المنتجات النفطية، تم اختبار النموذج على حالة واقعية متمثلة في أنبوب النقل الرابط بين مصفاة أرزيو ومركزي التوزيع في سيدي بلعباس ورمشي. وقد أظهرت نتائج التجارب،

التي تم تنفيذها بواسطة أداة حل متقدمة، تحسينات واضحة في إدارة المخزون، وتقليل نسب تلوث المنتجات، وتحقيق تنظيم أكثر سلاسة وفعالية في عمليات التوصيل.

وعلاوة على هذه الحالة التطبيقية، يقدم هذا العمل أداة عملية لدعم اتخاذ القرار، تمتاز بالمرونة والقدرة على التكيف مع ظروف مختلفة في مجال الخدمات اللوجستية. كما يفتح المجال نحو استخدام أساليب تخطيط ديناميكية متقدمة، مثل الأسلوب المتدرج زمنياً، من أجل مواجهة التقلبات المتزايدة في الطلب والظروف التشغيلية على أرض الواقع.

Mot clé : chaîne logistique pétrolière transport modale MILP multi produits pipeline