

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 01	Généralités sur les pipelines
1.1 Introduction	5
1.2 Généralité sur les pipelines	5
1.2.1 Définitions	5
1.2.2 Les types de pipeline	5
1.2.3 Le transport par oléoducs et gazoducs	5
1.2.4 Composants des réseaux de transport par canalisation	6
1.2.5 Les différentes formes de canalisation	6
1.2.5.1 Les pipelines droits unidirectionnels et bidirectionnels	6
1.2.5.2 Pipeline arborescent	7
1.2.6 Avantages de transport par pipeline	7
1.2.7 La fiabilité du réseau de pipeline	8
1.2.8 Causes de développement des transports par pipeline	8
1.2.9 Utilisation des pipelines	9
1.2.10 Exploitation des pipelines multi-produits	10
1.2.10.1 Le batching	10
1.2.10.2 Le Contaminât ou interface	10
1.2.10.3 Evaluation du volume de contaminât (Longueur de l'interface)	11
1.3 Le contexte industriel	11
1.3.1 Présentation générale de l'entreprise NAFTAL	11
1.3.1.1 Présentation de la canalisation Multi-produit ASR	12
1.3.1.2 Présentation du Centre de Stockage des Carburants de Remchi	13
1.3 Conclusion	13
Chapitre 02	Etat de l'art et approche de résolution
2.1 Etat de l'art et approches de résolution	15
2.1.1 Organisation de transport dans les pipelines multi-produit	15
2.1.1.1 Degré de compatibilité	15
2.1.2 Problème d'optimisation de transport des carburants par pipeline multi-produit	15
2.1.3 Revue de littérature	16
2.1.3.1 L'approche continue et discrète	16
2.1.3.2 Les travaux existants	16
2.2 Les approches de résolution	23
2.2.1 Programmation linéaire en nombre entier	23
2.2.1.1 Définition	23
2.2.1.2 Optimisation en nombres entiers	24
2.2.1.3 Optimisation mixte en nombres entiers	24

2.2.1.1	Conditions d'optimalités d'un problème d'optimisation en nombre entiers	24
2.2.2	Les méthodes exactes	24
2.2.2.1	Méthodes de recherche arborescente par séparation et évaluation	25
2.2.2.2	La méthode de coupes planes (Cutting-plane)	26
2.2.2.3	La méthode (Branch and Bound)	26
2.2.3	Les métaheuristiques	26
2.2.3.1	Recherche Tabou	27
2.2.3.1	Les algorithmes génétiques	29
2.2.3.3	Algorithme glouton	30
2.3	Conclusion	31

Chapitre 03		Problématique et modèle mathématique
3.1	Introduction	33
3.2	Problématique	33
3.3	Modèle mathématique	34
3.3.1	Nomenclature	34
3.3.2	La formulation mathématique	37
3.3.2.1	Hypothèses	37
3.3.2.2	Caractéristiques des batchs	37
3.3.2.3	La fonction objective	37
3.3.2.4	Les contraintes	38
3.4	Conclusion	48

Chapitre 04		Simulation numérique et résultats
4.1	Introduction	50
4.2	Présentation de logiciel d'optimisation CPLEX	50
4.2.1	Historique	50
4.2.2	Les composants de CPLEX	50
4.2.3	Capacités de CPLEX	51
4.2.4	Exemple d'application traité par le solveur CPLEX	52
4.3	Les résultats numériques	54
4.3.1	Les scénarios d'étude	56
4.3.1.1	Les solutions obtenues pour un taux d'injection $\alpha = 1/1000$	56
4.3.1.2	Les solutions obtenues pour un taux d'injection $\alpha = 5/1000$	60
4.3.1.3	Les solutions obtenues pour un taux d'injection $\alpha = 10/1000$	63
4.3.2	Interprétation générale des trois scénarios	66
Conclusion		75

Liste des figures

<i>Figure 1.1</i>	<i>Structure du pipeline droit.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 1.2</i>	<i>Structure du pipeline arborescent.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 1.3</i>	<i>Le marché du transport du pétrole brut par pipeline et navires aux USA.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 1.4</i>	<i>Les expéditions du pétrole par différents modes.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 1.5</i>	<i>Séquence type avec deux produits et une zone de mélange.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 1.6</i>	<i>Profil en long du pipeline multi-produit ASR.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 2.1</i>	<i>Système de transport dans l'oléoduc multi-produit.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 2.2</i>	<i>Modèle S-PPI.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 2.3</i>	<i>Discrétisation de segment de pipeline.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 2.4</i>	<i>le schéma de la méthode de décomposition.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 2.5</i>	<i>un réseau de pipeline.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 2.6</i>	<i>les travaux sur le problème de planification et l'établissement de programme dans le pipeline de programme depuis 2004 jusqu'à 2014.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 2.7</i>	<i>L'organigramme de la recherche tabou.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 2.8</i>	<i>fonctionnement de l'algorithme génétique.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 2.9</i>	<i>Principe d'algorithme glouton.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 3.1</i>	<i>Contribution des pays dans la recherche des problèmes de distribution des produits raffinés via les systèmes de pipeline « RPSDPPS ».....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 3.2</i>	<i>Le contaminât qui résulte entre deux batchs adjacents dans le pipeline.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 4.1</i>	<i>les composants du Cplex.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 4.2</i>	<i>création d'un nouveau projet OPL (1).....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 4.3</i>	<i>création d'un nouveau projet OPL (2).....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 4.4</i>	<i>l'interface du travail.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 4.5</i>	<i>L'exécution du modèle mathématique.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 4.6</i>	<i>Les résultats obtenus par Cplex.....</i>	<i>54</i>

<i>Figure 4.7</i>	<i>Planning optimal de transport multi-produit avec un taux de réinjection $\alpha = 1/1000$....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 4.8</i>	<i>Planning optimal de transport multi-produit avec un taux de réinjection $\alpha = 5/1000$....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 4.9</i>	<i>Planning optimal de transport multi-produit avec un taux de réinjection $\alpha = 10/1000$...</i>	<i>65</i>
<i>Figure 4.10</i>	<i>La solution optimale affichée par Cplex.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 4.11</i>	<i>Niveau de stock du Contaminât type 1 en fonction du taux de réinjection.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 4.12</i>	<i>Niveau de stock du Contaminât type 2 en fonction du taux de réinjection.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 4.13</i>	<i>L'évolution de stock du Contaminât type 1 dans le temps en fonction du taux de réinjection.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 4.14</i>	<i>L'évolution de stock du Contaminât type 2 dans le temps en fonction du taux de réinjection.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 4.15</i>	<i>Niveau de stock au niveau du dépôt 1 tenant compte un tau de réinjection de contaminât de 1‰ au niveau du dépôt 2.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure 4.16</i>	<i>Niveau de stock au niveau du dépôt 1 tenant compte un tau de réinjection de contaminât de 5‰ au niveau du dépôt 2</i>	<i>70</i>
<i>Figure 4.17</i>	<i>Niveau de stock au niveau du dépôt 1 tenant compte un tau de réinjection de contaminât de 10‰ au niveau du dépôt 2.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 4.18</i>	<i>Niveau de stock au niveau du dépôt 2 pour un tau de réinjection de contaminât de 1‰..</i>	<i>72</i>
<i>Figure 4.19</i>	<i>Niveau de stock au niveau du dépôt 2 pour un tau de réinjection de contaminât de 5‰..</i>	<i>72</i>
<i>Figure 4.20</i>	<i>Niveau de stock au niveau du dépôt 2 pour un tau de réinjection de contaminât de 10‰</i>	<i>73</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 4.1</i>	<i>Demandes journalières par dépôt.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 4.2</i>	<i>La capacité et le volume initial des produits et du contaminât par dépôt avec le stock de sécurité.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 4.3</i>	<i>Volume moyen du contaminât qui résulte entre deux produits différents et les séquences interdites.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 4.4</i>	<i>Localisation des dépôts en volume par rapport à la raffinerie.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 4.5</i>	<i>Les conditions initiales des anciens batchs avec ses localisations en volume.....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 4.6</i>	<i>Le volume des nouveaux batchs ($\alpha = 1/1000$).....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 4.7</i>	<i>Niveau de stock des produits du dépôt 1 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 1/1000$).....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 4.8</i>	<i>Niveau de stock des produits du dépôt 2 après chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 1/1000$).....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 4.9</i>	<i>Niveau de stock du contaminât du dépôt2 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 1/1000$).....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 4.10</i>	<i>Le volume des nouveaux batchs ($\alpha = 5/1000$).....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 4.11</i>	<i>Niveau de stock des produits du dépôt 1 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 5/1000$).....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 4.12</i>	<i>Niveau de stock des produits du dépôt 2 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 5/1000$).....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 4.13</i>	<i>Niveau de stock du contaminât du dépôt2 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 5/1000$).....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 4.14</i>	<i>Le volume des nouveaux batchs ($\alpha = 10/1000$).....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 4.15</i>	<i>Niveau de stock des produits du dépôt 1 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 10/1000$).....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 4.16</i>	<i>Niveau de stock des produits du dépôt 2à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 10/1000$).....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 4.17</i>	<i>Niveau de stock du contaminât du dépôt 2à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 10/1000$).....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 4.18</i>	<i>Paramètres de simulation.....</i>	<i>66</i>



Introduction



Introduction :

Actuellement le mode de transport par pipeline a connu une ample importance à l'échelle nationale comme à l'échelle internationale, qui s'explique par une hausse des quantités des produits transportés et des consommations en énergie. Cette situation exige des entreprises de développer davantage leur logistique, voir même de varier leur mode de transport afin de garantir un approvisionnement régulier, pour faire face à la progression de la demande sur le marché. C'est dans cette vision que les entreprises pétrolières algériennes ont abordé un programme d'investissement important, visant à sécuriser l'approvisionnement du pays en produits pétroliers, à travers un maillage intelligent de pipelines, répondant au vrai besoin des différentes zones du pays.

Le mode de transport par canalisation coopère sensiblement à la réduction à la fois des coûts, des délais de livraison, du trafic routier et assure aussi des transports massifs d'hydrocarbures, en veillant au respect de l'environnement avec des conditions les plus strictes de sécurité. S'il n'existait pas ! Il serait inévitable de faire circuler sur les routes, les autoroutes et les rails des milliers de camions et wagons citernes, pour assurer le même transport. [1]

La technologie actuelle est révolutionnée et orientée vers les pipelines multi-produits. Cette dernière présente à son tour l'inconvénient de naissance d'une zone de mélange ou contaminât entre deux produits en contact, et qui circulent séquentiellement dans le pipeline [1]. Le mélange en question est généré à chaque contact produit-produit lors du transport des carburants, donc une séquence de plusieurs batchs favorise proportionnellement plusieurs lots de contaminât, nécessitant un parc important pour leur stockage.

Dans le présent mémoire, nous avons focalisé notre étude sur une canalisation type de l'Entreprise Nationale de Commercialisation des Produits Pétroliers NAFTAL (Filiale à 100% à SONATRACH), il s'agit du pipeline multi-produit ASR (Abréviation d'Arzew, Sidi Bel Abbès et Remchi) qui transporte les carburants à partir de la Raffinerie d'Arzew vers les centres de stockage et de distribution de Sidi Bel Abbès et Remchi. Ces derniers desservent les régions Ouest et Sud-Ouest de l'Algérie en carburants (le Gasoil et les Essences). La demande subséquente de la région, a stipulé l'introduction dans le pipeline ASR, des séquences importantes de plusieurs batchs pour répondre aux besoins de la région, mais ces dernières favorisaient à chaque fois de nombreuses interfaces, zones de naissance des mélanges, amenant à des niveaux élevés du stock de contaminât au niveau du centre carburants de Remchi.

Devant les contraintes de contaminât et la demande importante des carburants, nous avons pensés à porter réflexion sur l'optimisation du transport du multi-produit pétrolier. Nous visons à minimiser le stock du contaminât d'une part, et d'assurer une autonomie de stockage des produits purs au niveau des dépôts de Sidi Bel Abbès et Remchi d'autre part,

afin de faire face à toute pénurie, qui peut être causée par l'indisponibilité des produits au niveau de la source, ou à des éventuelles pannes techniques.

Beaucoup d'investigateurs ont abordé les thématiques relatives aux problèmes d'optimisation du transport multi-produit, où plusieurs méthodes ont été développées et appliquées pour ces types de problèmes, nous citons : les métaheuristiques, l'intelligence artificielle, la programmation linéaire en nombre entier mixte (MILP).

La méthode MILP a fait l'objet de notre choix, cette dernière est habituellement classée comme approche discrète et continue. Nous avons opté pour l'approche continue vue qu'elle est adaptable avec les conditions d'exploitation et de planification du pipeline. Mais contrairement aux travaux des différents investigateurs qui recommandent le retour du contaminant à la source (Raffinerie), nous avons intégré la réinjection du contaminant à des proportions variables dans notre modèle.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

Dans un premier chapitre, des généralités sur les pipelines sont présentées avec les différentes structures, dont le but, est de rapprocher la définition du transport du multi-produit pétrolier. Nous avons présenté ainsi la canalisation ASR, notre site d'étude et les centres carburants que ravitaille cette dernière.

Le deuxième chapitre est dédié principalement à la présentation de l'état de l'art sur les problèmes d'optimisation de transport du multi-produit pétrolier par pipeline. Plus particulièrement, nous nous intéressons aux problèmes abordés et aux approches de résolution proposées dans la littérature.

Dans un troisième chapitre, la problématique est exposée et le modèle d'optimisation est implémenté pour son application au pipeline ASR.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus, des différents scénarios appliqués sur la canalisation ASR en utilisant le solveur CPLEX.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale qui fera la synthèse sur le transport par pipeline multi-produit.



Chapitre 01

Généralités sur les pipelines



1.1 Introduction

Dans l'industrie pétrolière, les pipelines sont considérés comme des moyens essentiels pour le transport d'importants débits d'hydrocarbures sur de grandes distances. Ils sont le mode de transport le plus sûr et le plus économique. L'investissement dans la construction d'un pipeline consiste à consentir une dépense immédiate avec en outre des charges, d'exploitation et de réparation, les moins élevées. Il convient, par conséquent, d'assurer leur longévité et d'éviter au maximum les arrêts imprévus. [2]

Le développement considérable du transport par pipeline a été une des réponses aux nombreux besoins entraînés par l'accroissement de la consommation des hydrocarbures, d'abord pour des raisons économiques, puis du fait des avantages spécifiques qu'il présente (parfaite adaptation au transport du produit liquide, pertes d'énergie minimales, optimisation de tracé, faible sensibilité au relief et aux conditions géographiques et climatiques, emprise au sol presque nulle et adaptation à l'automatisme). [3]

1.2 Généralités sur les pipelines

1.2.1 Définitions :

Un pipeline est un mode de transport des matières fluides réalisé au moyen de conduites constituant généralement un réseau [4], et au sens large, le pipeline est une installation utilisée pour le transport de marchandises, du point de réception au point de livraison.

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, en zone de risque sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial, leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances. [5]

1.2.2 Les types de pipeline :

Selon le produit transporté, les pipelines portent des noms spécifiques : gazoduc, oléoduc, ...etc. Ceux-ci sont assujettis à une réglementation qui leur est propre tout comme le sont les techniques de construction et d'exploitation.

Les principaux systèmes de transport par canalisation concernent [4] :

- Le gaz naturel, transporté par gazoduc ;
- Les hydrocarbures liquides, dont surtout le pétrole, transportés par oléoduc.

1.2.3 Le transport par oléoducs et gazoducs:

- Le transport par pipeline a une caractéristique principale, à partir de laquelle on peut le distinguer parmi les autres modes de transport : il utilise des porteurs stationnaires

dont la cargaison se déplace au lieu de déplacement de transporteur comme les autres modes de transport [4] ;

- Il est généralement le moyen le plus économique à transporter du pétrole ou du gaz naturel sur de grandes distances terrestres ;
- Ce moyen de transport utilise majoritairement des tubes en acier, soudés bout à bout et revêtus par enrobage pour mieux résister à la corrosion et aux agressions chimiques ou mécaniques ;
- Le fluide transporté dans les canalisations se déplace généralement sous pression, à des vitesses variant de 1 à 6m/s. La pression et la vitesse de circulation (ou le débit) sont engendrées par des pompes (Cas des liquides) ou des compresseurs (pour les gaz) ;
- Les oléoducs transportent souvent plusieurs natures de liquides, en séquences appelées « batching ». Entre deux produits en contact, se crée un mélange partiel (Interface). Ce dernier est stocké dans des réservoirs appropriés au niveau d'une station de réception (appelé terminal) ;
- Les gazoducs, à leur tour, transportent des fluides gazeux dont la composition reste stable dans le temps.

1.2.4 Composants des réseaux de transport par canalisation :

Les composants principaux dans les réseaux de pipelines sont les zones opérationnelles et le segment de pipeline. Les zones opérationnelles peuvent être des centres de distribution, des ports ou bien des raffineries, ces zones sont reliées entre eux par un ou plusieurs segments du pipeline, où le transfert des différents types de carburants se fait par les pipelines [4]:

a) Les stations d'injection ou de départ :

Elles constituent les points d'entrée du réseau de transport. Suivant leur configuration et leur position géographique peuvent être des terminaux, des stations d'entrée ;

b) Les stations de compression (pour les gaz) ou stations de pompage (pour les liquides):

Sont réparties régulièrement le long des réseaux de transport pour maintenir la pression et la vitesse du fluide dans les canalisations ;

c) Les postes de livraison :

Permettent de mettre la matière transportée à disposition des destinataires intermédiaires ou finaux.

1.2.5 Les différentes formes de canalisation :

1.2.5.1 Les pipelines droits unidirectionnels et bidirectionnels :

En général, les produits sont transférés à partir des raffineries à des dépôts par pipeline droit (figure 1.1) mais on trouve des cas où le pipeline peut faire le transfert des produits en deux

directions s'appelant des pipelines bidirectionnels. Mais il est remarqué que le nombre des interfaces dans cette situation est très élevé, ce qui mène l'utilisation de ce type de pipeline juste pour un besoin considérable. [6]

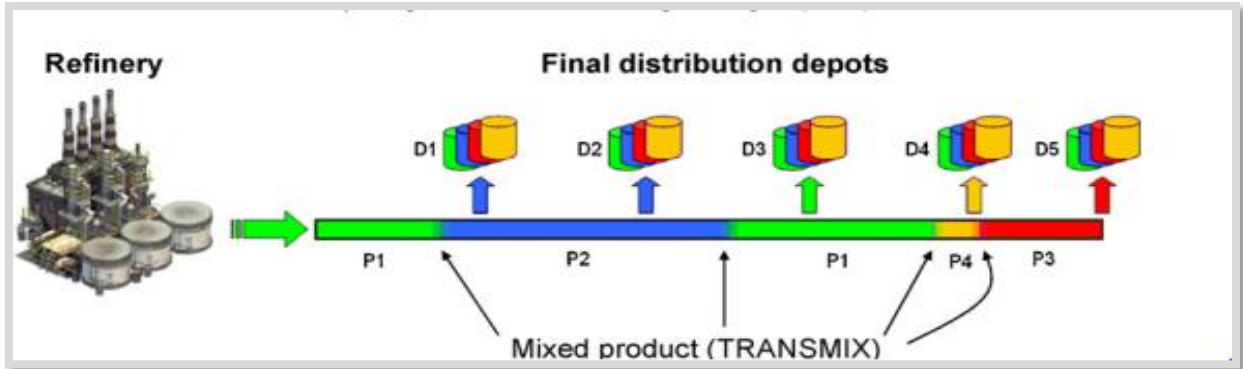


Fig. 1.1 Structure du pipeline droit

1.2.5.2 Pipeline arborescent :

Il prend la forme d'un arbre (figure 1.2). A Chaque branche qui s'appelle « segment », se trouve un dépôt. La planification du pipeline arborescent est très difficile à cause de la structure ramifiée de la canalisation.

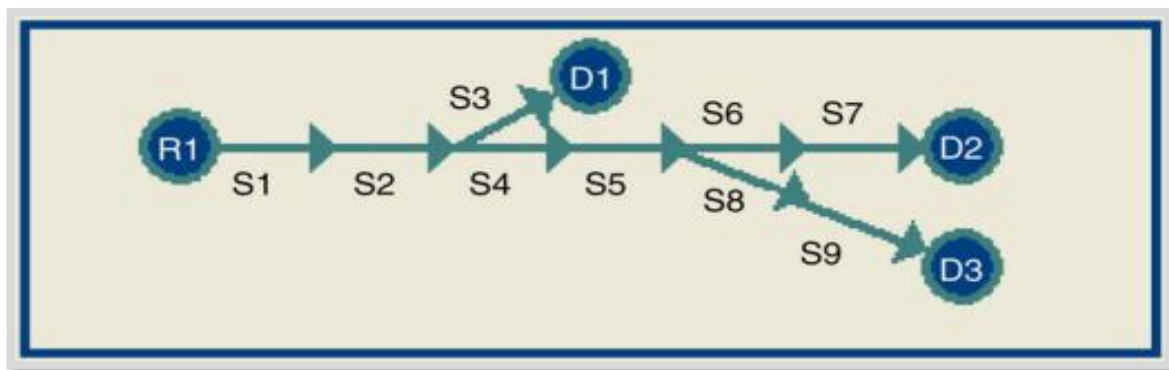


Fig.1.2 Structure du pipeline arborescent

1.2.6 Avantages de transport par pipeline [7] :

Un pipeline présente de nombreux avantages, dont certains sont décisifs, par rapport aux autres moyens de transport. En effet, c'est :

- Un mode de transport massif (Atteint 60 M. litres/Jour par exemple) ;
- Un transport à haut degré de sécurité avec moins de deux incidents pour 10.000 Km de pipeline par an ;

- Un approvisionnement sûr, insensible aux intempéries et aux conditions atmosphériques, fonctionnant 24 heures sur 24 sur tous les jours de l'année ;
- Le mode de transport massif le moins cher sur moyenne et longue distance, ne nécessitant pas d'opération de manutention. A titre de comparaison les coûts moyens par tonne et pour 100 Km sont:
 - Pipeline : 1,8 à 2,1 €
 - Train (2000 T) : 2,7 €
 - Barge : 2,7 à 4,1 €
 - Camion (38 T) : 4,1 €

Donc, le pipeline représente la manière la plus fiable et la plus optimale en terme de coût et capable de délivrer de grands volumes des produit raffinés à partir des raffineries aux dépôts éloignés [8].

1.2.7 La fiabilité du réseau de pipeline:

La mission essentielle d'un réseau de transport est d'établir un flot, entre les sources et le nœud de destinations, supérieur ou égal à la demande. Dans ce contexte, les éléments principaux du réseau sont manifestement les oléoducs, donc la réduction des performances de réseau se revient principalement [9]:

- Des pannes intempestives et de l'obsolescence des équipements de pompage.
- De l'encrassement, de la corrosion et de l'évolution de la rugosité interne de la conduite.

1.2.8 Causes de développement des transports par pipeline [10] :

La première cause du développement des transports par pipeline est liée à l'accroissement de la consommation des hydrocarbures et à la part prépondérante qu'ils ont prise dans l'approvisionnement des besoins énergétiques.

La seconde, caractéristique de l'économie du pétrole, tient à des besoins élevés en moyens de transport, car les lieux de production sont généralement très éloignés des centres de consommation.

La troisième cause doit être recherchée dans les avantages spécifiques du transport par conduite :

- Forme liquide et gazeuse des hydrocarbures, convenant parfaitement à l'acheminement par canalisation ;
- Pertes d'énergie minimales (frottement du liquide sur les parois) et contenant fixe (pas de tare ni de retour à vide) ;
- Trajet presque rectiligne (raccourcissement des distances par rapport aux moyens classiques : bateau, wagon) ;

- Insensibilité pratique au relief et aux conditions géographiques (traversée de montagnes, de fleuves, de déserts, de bras de mer) ;
- Emprise au sol quasiment nulle, autorisant les cultures et limitant les servitudes et les nuisances ;
- Parfaite continuité de marche (pas d'entrave atmosphérique ni climatique) ;
- Adaptation très marquée à l'automatisme (main-d'œuvre réduite par l'emploi de techniques d'automatisation très poussées).

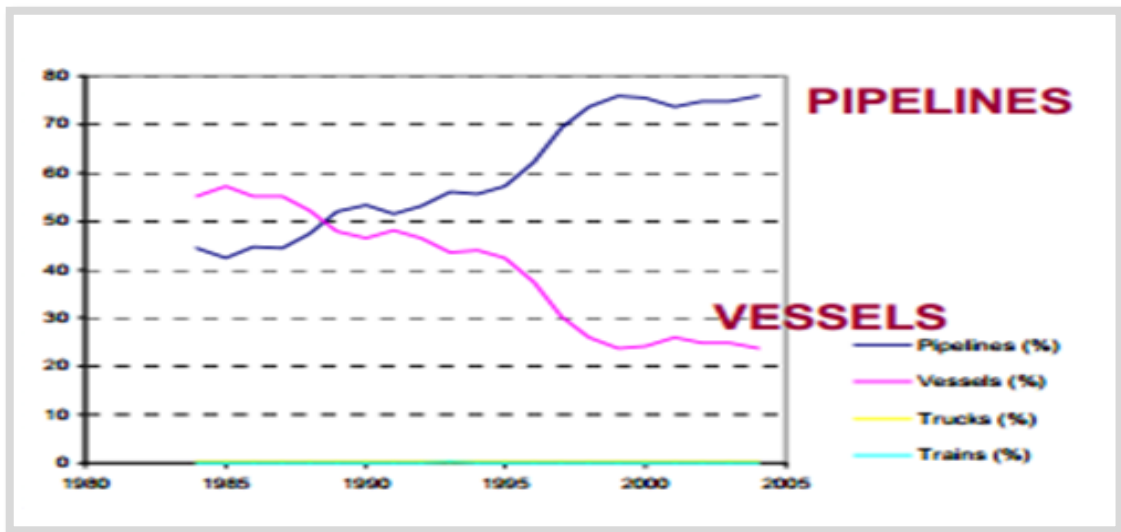


Fig. 1.3 Le marché du transport du pétrole brut par pipeline et navires aux USA [8]

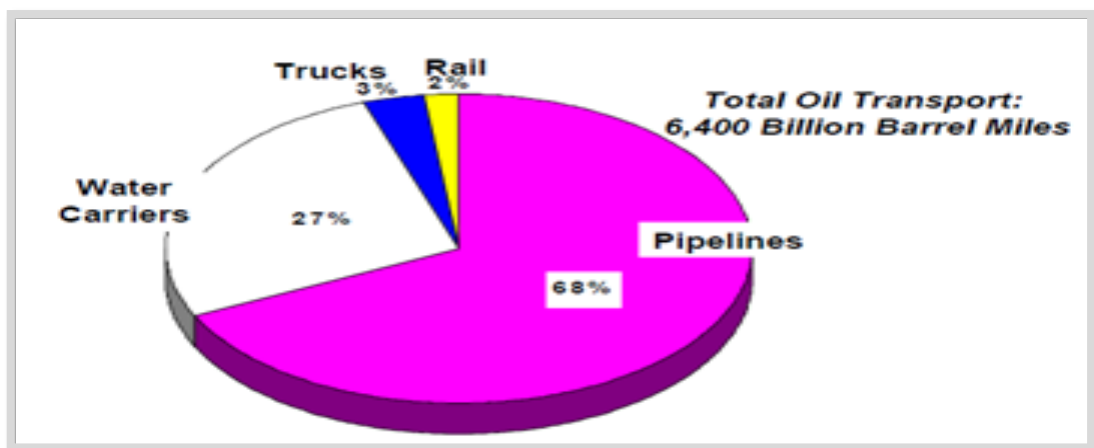


Fig. 1.4 Les expéditions du pétrole par différents modes [11]

1.2.9 Utilisation des pipelines :

Les grands réseaux de pipelines sont destinés à couvrir plusieurs types de besoins [10] :

- **Dans les pays à la fois grands producteurs et grands consommateurs** : la fonction essentielle du pipeline est de relier les gisements pétroliers aux raffineries (cas des États-Unis et de l'ex-U.R.S.S.) ;
- **Dans les pays grands producteurs et exportateurs** : le rôle des conduites est principalement de transporter le pétrole brut depuis les gisements jusqu'aux terminaux de chargement pour navires pétroliers.

1.2.10 Exploitation des pipelines multi-produits [12] :

La souplesse d'exploitation des pipelines multi-produits autorise le transport successif de cargaisons des produits différents.

Les méthodes modernes de conception et d'exploitation de ce type d'ouvrage permettent de transporter sans risque de dégradation des produits aussi divers que :

- Des gaz liquéfiés ;
- Des essences légères ;
- Des carburantes autos ;
- Des carburateurs ;
- Des pétroles bruts.

Toutes fois, les besoins de consommation spécifiques ont parfois conduit à la construction de pipelines adaptés à une gamme particulière de produits.

1.2.10.1 Le batching:

Le batching est une technique de pompage séquentiel consistant à expédier deux ou plusieurs produits pétroliers différents, séparément et dans un ordre déterminé, par une même conduite.

Le batching est plus souvent utilisé lorsque les quantités de produits transportées ne peuvent justifier la construction de canalisations séparées pour chaque produit.

Il permet, entre autres, d'augmenter le taux d'utilisation du pipeline, de diminuer les frais d'investissement et surtout d'améliorer la flexibilité du réseau [12].

1.2.10.2 Le Contaminât ou interface :

Quand les produits distincts sont en contact direct à l'intérieur de la canalisation multi-produit, il y a une certaine altération inévitable de qualité du produit dans la zone de mélange (l'interface entre deux produits). Ces pertes d'interface provoquent des grands problèmes d'exploitation. Les mélanges ne peuvent pas être simplement déclassés, ils doivent passer par des analyses physicochimiques spéciales qui impliquent habituellement de les envoyer de nouveau à une raffinerie où exigent des réservoirs spéciaux pour leur stockage. [12]

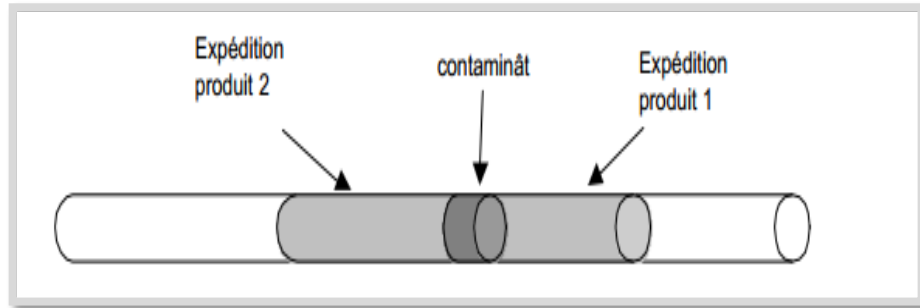


Fig.1.5 Séquence type avec deux produits et une zone de mélange

1.2.10.3 Evaluation du volume de contaminât (Longueur de l'interface) :

De nombreux travaux expérimentaux ont été menés dans le but de prédire l'importance du contaminât et de déterminer les facteurs favorisant l'accroissement du phénomène. Ces travaux ont permis d'établir des formules et des courbes empiriques permettant une prévision correcte du volume de contaminât. De nombreuses relations associent le volume de contaminât à la distance parcourue [9]. Elles sont de la forme :

$$l = KL^n \quad (1.1)$$

Avec,

l : Longueur de l'interface (Contaminât), [m] ;

L : Longueur totale de la conduite, [m] ;

K et n : Constantes dépendant de la nature des produits pompés.

1.3 Le contexte industriel

1.3.1 Présentation générale de l'entreprise NAFTAL :

L'Entreprise Nationale de Commercialisation et de Distribution des produits pétroliers **NAFTAL** est une entreprise algérienne, filiale à 100 % de SONATRACH.

Elle est chargée de la distribution et la commercialisation des produits pétroliers et dérivés sur le marché national, son nom est extrait de deux syllabes bien connues [13]:

- **NAFT** : Terme Universel qui exprime le pétrole ;
- **AL** : Algérie.

NAFTAL a pour mission, la distribution et la commercialisation des produits pétroliers sur le marché national, à savoir : Les carburants (Les essences, le Gasoil, le Kérosène,...), les Gaz pétroliers liquéfiés « GPL », les pneumatiques, les bitumes, les produits spéciaux (Cires, Paraffines, Solvants...).

Elle intervient dans les domaines :

- Distribution, Stockage et Commercialisation des carburants, Lubrifiants, Bitumes et les Pneumatiques

- GPL/carburant, produits spéciaux ;
- Transport des produits pétroliers ;
- Enfûtage du GPL ;
- Formulation de bitumes ;
- Etc...

1.3.1.1 Présentation de la canalisation Multi-produit ASR [1]:

Le pipeline multi-produit ASR se situe à l'ouest de l'Algérie. Son profil s'étend sur une longueur d'environ 168 km, à partir de la raffinerie d'Arzew passant par Sidi Bel Abbès arrivant à la station finale de Remchi (Figure 1.6). Cette dernière réceptionne les carburants liquides en provenance de la raffinerie d'Arzew et alimente les centres de stockage de Sidi Bel Abbès et Remchi.

Ce pipeline est composé de trois tronçons de différents diamètres et longueurs (Figure 1.6).

- Ø12" épaisseur 9.52 mm de la raffinerie d'Arzew à Sidi Bel Abbès sur une distance d'environ 85 km ;
- Ø10" épaisseur 6.35 mm de Sidi Bel Abbès à Sidi Abdelli sur une distance d'environ 56 km ;
- Ø8" épaisseur 6.40 mm de Sidi Abdelli à REMCHI sur une distance d'environ 27 km.

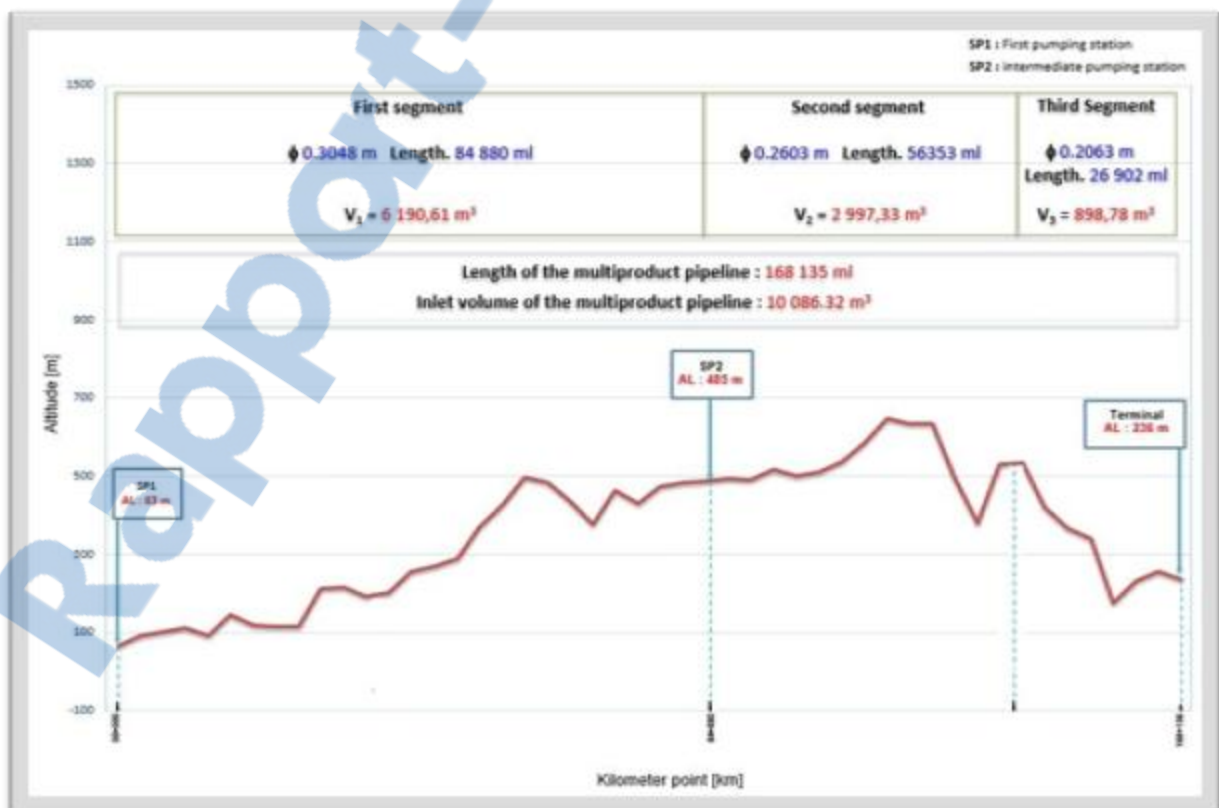


Fig.1.6 Profil en long du pipeline multi-produit ASR

1.3.1.2 Présentation du Centre de Stockage des Carburants de Remchi :

Le centre de stockage et de distribution de Remchi, s'étend sur une superficie de quinze (15) *hectares*. Sa capacité de stockage tout produit confondu est de 38350 *m*³. Cette capacité de stockage le rend le premier, dans la wilaya de Tlemcen à pouvoir assurer son ravitaillement en matière de carburant.

Le Centre assure le stockage et la distribution de quatre (04) produits principaux :

- Essence normale « *EN* » (Carburant « *CA* ») ;
- Essence super « *ES* » (Super Carburant « *SCA* ») ;
- Gasoil « *GO* » ;
- Essence sans plomb « *SP* ».

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons bien présenté des généralités sur les pipelines (les types des pipelines, les composants d'un système de pipeline et ces avantages) et nous avons focalisé surtout sur les pipelines multi-produits et leurs caractéristiques, avec un aperçu sur la notion du contaminât.

Nous avons ainsi décrit le site, lieu de notre stage, dont la canalisation ASR fait l'objet de notre étude d'optimisation.



Chapitre 02

Etat de l'art et approches de résolution



2.1. Etat de l'art et approches de résolution

2.1.1. Organisation de transport dans les pipelines multi-produit :

Pour établir le programme de transport dans un oléoduc multi-produit, il est nécessaire d'avoir communication préalable des paramètres par le client, à savoir :

- Volume et caractéristiques des produits à transporter ;
- Disponibilité en date et en volume, spécifiée par les établissements chargeurs ;
- Capacité de réception disponible, signalée par les dépôts réceptonnaires.

La connaissance de ces différents paramètres permet au service planification de définir dans le cadre du programme d'exploitation, l'ordonnancement des produits et l'importance des cargaisons en fonction de leur compatibilité. [12]

2.1.1.1. Degré de compatibilité :

Le degré de compatibilité d'un produit *A* par rapport à un produit *B* qui se succèdent dans une même canalisation est défini comme la valeur maximale de la concentration du produit *A* dans le produit *B* qui entraîne une modification admissible des caractéristiques la plus vulnérables de *B* au regard de ses spécification. [12]

2.1.2. Problème d'optimisation de transport des carburants par pipeline multi-produit :

Le problème d'optimisation de transport des carburants par pipeline multi-produit considère tout le processus de transport depuis de la raffinerie jusqu'aux clients.

Une raffinerie fournit des produits pétroliers qui doivent être transportés aux clients par l'intermédiaire d'un pipeline, ce dernier est divisé en segments, un dépôt est mis à la fin de chaque segment assurant ainsi le stockage et la distribution des différents produits, afin de satisfaire les demandes des clients.

Un pipeline doit être exploité de la meilleure façon possible, ceci revient à minimiser les coûts d'exploitation associés qui se présentent comme suit :

- Les coûts d'inventaire aux différents réservoirs de stockage ;
- Les coûts de pompage ;
- Les coûts d'interface entre les différents produits dans la canalisation.

Le processus de transport pétrolier est décrit par la figure suivante :

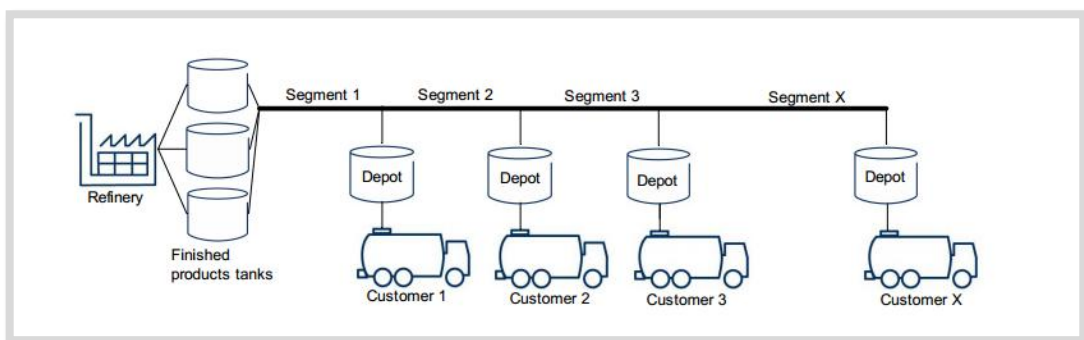


Fig.2.1 Système de transport dans l'oléoduc multi-produit [14]

La minimisation des coûts cités précédemment nécessite la définition d'un programme permettant de spécifier :

- Le volume et le temps de début de pompage du chaque batch dans le pipeline ;
- La distribution des batch dans les différents dépôts ;
- L'endroit et l'ordre des différents batchs dans le pipeline ;
- Les niveaux d'inventaire de tous les réservoirs impliqués dans la raffinerie et les dépôts.

Tout en considérant les contraintes opérationnelles suivantes :

- Les capacités de stockage des produits dans les différents dépôts ;
- la capacité de la canalisation et la cadence de fabrication maximum de la raffinerie ;
- Un et un produit peut être pompé dans la canalisation à la fois ;

L'hypothèse principale impose que le pipeline reste complètement plein à tout moment, et les produits sont incompressibles. [14]

2.1.3. Revue de littérature

2.1.3.1. L'approche continue et discrète :

Dans les deux dernières décennies, plusieurs approches ont été développées pour étudier les problèmes d'établissement du programme de canalisation, tels que des techniques heuristiques basées sur la connaissance, et les approches de programmation mathématique comme, la programmation linéaire en nombres entiers mixtes (*MILP*) ou la programmation non linéaire en nombres entiers mixtes (*MINLP*). Cette dernière peut être habituellement discrète ou continue.

Un modèle est dit discret si l'horizon de planification est divisé en des intervalles et la canalisation est divisée en paquet de même taille où dans chaque intervalle un paquet contient un seul produit. [15]

Le volume de produit déchargé dans les réservoirs des dépôts à partir du pipeline est un multiple du volume d'un paquet. Ce modèle présente des inconvénients puisqu'il permet d'effectuer une seule opération de déchargement dans l'ensemble du système à la fois. [14]

De telles limitations ne sont pas considérées dans les modèles continues où le pompage se fait sans interruption.

2.1.3.2. Les travaux existants :

(Hane et Ratliff, 1995) présentent une formulation discrète *MILP* pour le transport des produits par un pipeline reliant une seule raffinerie à des dépôts. Ce problème est divisé en sous-problèmes facilement résolu par la méthode branch and bound. [16]

(Shah, 1996) étudie le problème du transport de pétrole brut d'un port maritime à une raffinerie par un pipeline simple pour réduire au minimum le coût de possession de produits

dans les réservoirs de dépôt pour un horizon de planification mensuel. L'approche proposée garantit une solution faisable mais non optimale pour le système. [17]

(Sasikumar, 1997) présente une technique basée sur la connaissance de recherche heuristique pour programmer un réseau de pipeline simple avec une seule raffinerie et un seul dépôt au-dessus d'un horizon temporel mensuel pour réduire au minimum l'interface de contaminât et les coûts de pompage. [18]

Inspiré par la planification des canalisations du pétrole, (Ruy Luiz Milidui, 2003) présente le problème de planification d'un simple pipeline avec interface ($S - PPI$) c.-à-d. un pipeline droit multi-produit avec une seule source et une seule destination. Ce modèle se focalise sur la contrainte d'interface. L'auteur prouve que le modèle S-PPI est NP-complet. En plus il assume que la planification de transport dans un réseau de pipeline est assez difficile. [19]

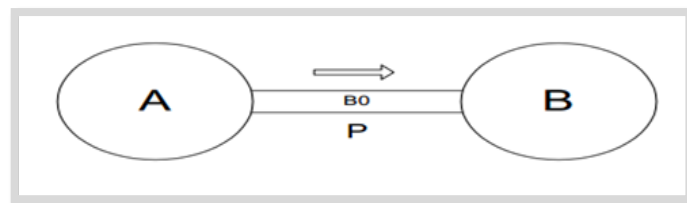


Fig.2.2 Modèle S-PPI

(Pinto et autres, 2000) étudie l'établissement du programme des activités d'une raffinerie, l'auteur a indiqué que les activités de planification peuvent être augmentées la rentabilité annuelle en plusieurs millions de dollars. [20]

(Rejowski et Pinto, 2003) se présentent comme les premiers auteurs à avoir traité le problème d'optimisation de transport des carburants dans le pipeline multi-produit. Ils proposent une représentation ($MILP$) pour résoudre le problème, ils ont utilisé une formulation discrète qui divise également le pipeline en paquet.

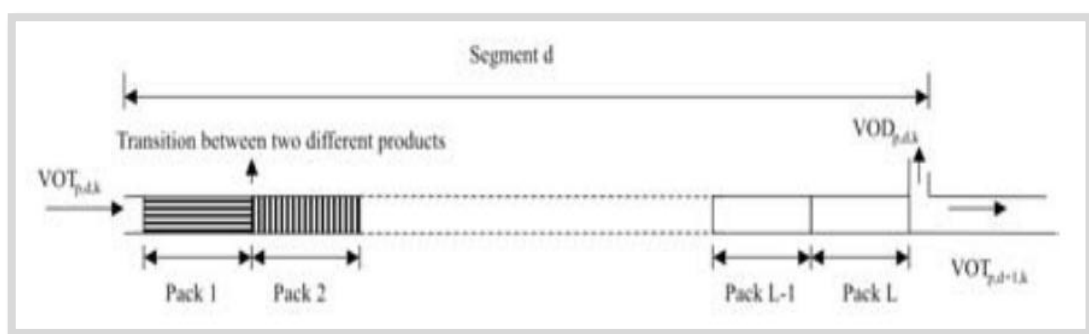


Fig.2.3 Discrétisation de segment de pipeline

Le modèle consiste à minimiser la somme des coûts d'inventaire de stockage dans la raffinerie et dans les dépôts, les coûts d'interfaces entre les différents batchs et les coûts de pompage. [21]

Un an plus tard, les mêmes auteurs ont amélioré leur modèle en ajoutant des contraintes pratiques (Rejowski et Pinto, 2004), ils considèrent dans ce nouveau modèle que le pompage de carburant dans un segment de la canalisation peut seulement être arrêté si le segment stocke exactement un seul type de produit [22], les mêmes auteurs présentent un nouveau modèle en représentation continue en 2008 (Rejowski et Pinto, 2008). [23]

(Cafaro et Cerdá, 2004) proposent le premier modèle en représentation continue du problème d'optimisation de transport des carburants par pipeline multi-produit. Ce même problème est considéré par (Rejowski et Pinto, 2003) tout en introduisant d'autres variables continues tel que le volume du batch, le temps du début et de fin du pompage de chaque produit, ce qui réduit le nombre de variables binaires, les contraintes et les temps de calcul. [24]

(Cafaro et Cerdá, 2008) proposent un modèle de planification du transport d'un pipeline contenant une seule raffinerie et un seul dépôt au-dessus d'un horizon mensuel. L'approche proposée est basée sur une formulation continue efficace (*MILP*) qui permet de déterminer la séquence et les tailles optimales des batchs, l'injection des batchs ce fait par la synchronisation avec les dépôts afin de satisfaire les demandes journalière des différents dépôts, Les résultats trouvés pour plusieurs exemples d'un cas réel sous différents scénarios opérationnels prouvent que la méthode proposée offre une amélioration majeure des programmes de pipeline par rapport aux approches précédentes. [25]

(Mir Hassani et Ghorbanalizadeh, 2008) présentent une approche en nombre entier mixte (*MILP*), pour l'optimisation de transport des carburants dans un pipeline multi-produit et multi-branches, relié à une raffinerie avec plusieurs dépôts qui doivent satisfaire les demandes des clients. Les batchs sont pompés l'un après l'autre sans aucune séparation physique, l'objectif est donc de trouver la meilleure séquence de pompage des batchs afin de minimiser le nombre d'interface, dans le but de satisfaire les demandes des clients et les contraintes opérationnelles tel que la minimisation de contaminât. Les auteurs utilisent une formulation discontinue, donc l'horizon de planification est divisé également en des intervalles et le solveur CPLEX pour la résolution de ce problème. [26]

(Relvas et al., 2009) développent une heuristique qui tente de trouver des séquences de produits les plus souhaitables pour à pomper dans le pipeline, ils utilisent cette heuristique pour un horizon de court à moyen terme. [27]

(Herrán et al., 2010) proposent un modèle discret, en utilisant les mêmes hypothèses et la fonction objectif proposé par (Rejowski et Pinto, 2003). L'apport de ce modèle est ce qu'il implique plusieurs raffineries, des nœuds intermédiaires, et des nœuds de destination, ce qui donne lieu à un grand réseau de transport pétrolier dont la résolution est très complexe. [28]

(P. M. Castro, 2010) aborde le problème d'établissement du programme à court terme de transport par pipeline des produits pétroliers aux centres de distribution servant des marchés locaux. Ils proposent une nouvelle formulation (*MILP*) qui peut être appliquée sur un pipeline arborescent très complexe, La nouveauté concerne la modélisation de la politique de stockage complexe qui est liée à différents flux de produits à l'intérieur de la canalisation. [29]

(MirHassani et al., 2011) présentent un algorithme pour la planification à long terme d'un simple pipeline multi-produit. L'algorithme utilise une représentation continue *MILP* pour déterminer un calendrier à court terme de manière itérative, à venir à un calendrier à long terme, qui vise à minimiser les coûts de pénalité de non utilisation de la capacité du pipeline, les coûts de l'interface, et les coûts résultant de retards dans la fourniture de la demande [30]. (MirHassani et Fani Jahromi, 2011) travaillent sur le problème à court terme de distribution des produits pétroliers par un pipeline arborescent à partir d'une seule raffinerie à plusieurs dépôts. Ils ont proposé une formulation continue (*MILP*) afin de minimiser le coût de stockage dans les dépôts, le coût de contaminât entre les différents produits, et le coût de pompage.[31]

(A. Herrán et autres, 2011) présentent une recherche globale sur les méta-heuristiques pour la planification de transport multi-produit pétrolier dans un système multi-pipeline. L'objectif de se travail est de développer plusieurs méta-heuristique pour améliorer l'efficacité de l'algorithme (*MILP*) utilisé pour la planification de transport multi-produit pétrolier dans un système multi-pipeline, le problème consiste à prévoir l'ordre optimal des produits assignés à chaque nouveau paquet pompé par chaque canalisation du réseau, afin de satisfaire les demandes de produit à chaque destination avant la fin de l'horizon de planification. [32]

Toutes les métaheuristiques proposées sont des combinaisons de méthodes d'amélioration appliquées aux solutions résultant de différentes heuristiques de construction. Ces améliorations sont effectuées en recherchant les voisinages autour de la solution courante en appliquant des méta-heuristiques comme la recherche tabou, recuit simulé.

Des exemples numériques sont résolus afin de montrer les performances des méta-heuristiques par rapport à un solveur commercial standard basé sur *MILP*. Les résultats montrent que les méta-heuristiques peuvent atteindre des meilleures solutions avec un temps d'exécution raisonnable.

(S. A. MirHassani, et al., 2011) proposent un modèle de programmation linéaire en nombre entier mixte pour programmer un oléoduc multi-produit qui relie une raffinerie à quelques centres de distribution. La tâche d'établissement du programme a été effectuée tout en considérant un certain nombre de contraintes tels que la satisfaction de demande quotidienne, forçant des périodes d'arrangement pour le contrôle de qualité des produits, observant des périodes pré-spécifiées d'arrêt, et la détermination de la taille de chaque

batch en considérant le type de produit. L'algorithme de résolution proposé donne une solution proche de l'optimum dans un temps de calcul raisonnable. [33]

(Suelen Neves Boschetto Magatao et al., 2012) présentent une planification et un ordonnancement de distribution de produits dans un réseau de pipeline, ils proposent une approche basée sur la décomposition (*MILP*), une approche hiérarchique a été alors développée pour aborder le problème de planification et d'établissement du programme du réseau de pipeline. Les auteurs ont employé une méthode de décomposition où le problème original a été abordé sous une forme hiérarchique : la première étape est la planification, la deuxième consiste en l'attribution des ressources et de l'ordonnancement des activités, tandis que la dernière consiste à déterminer la synchronisation pour l'utilisation de ressources par ces activités [34]. Cette méthode est schématisée par la figure suivante :

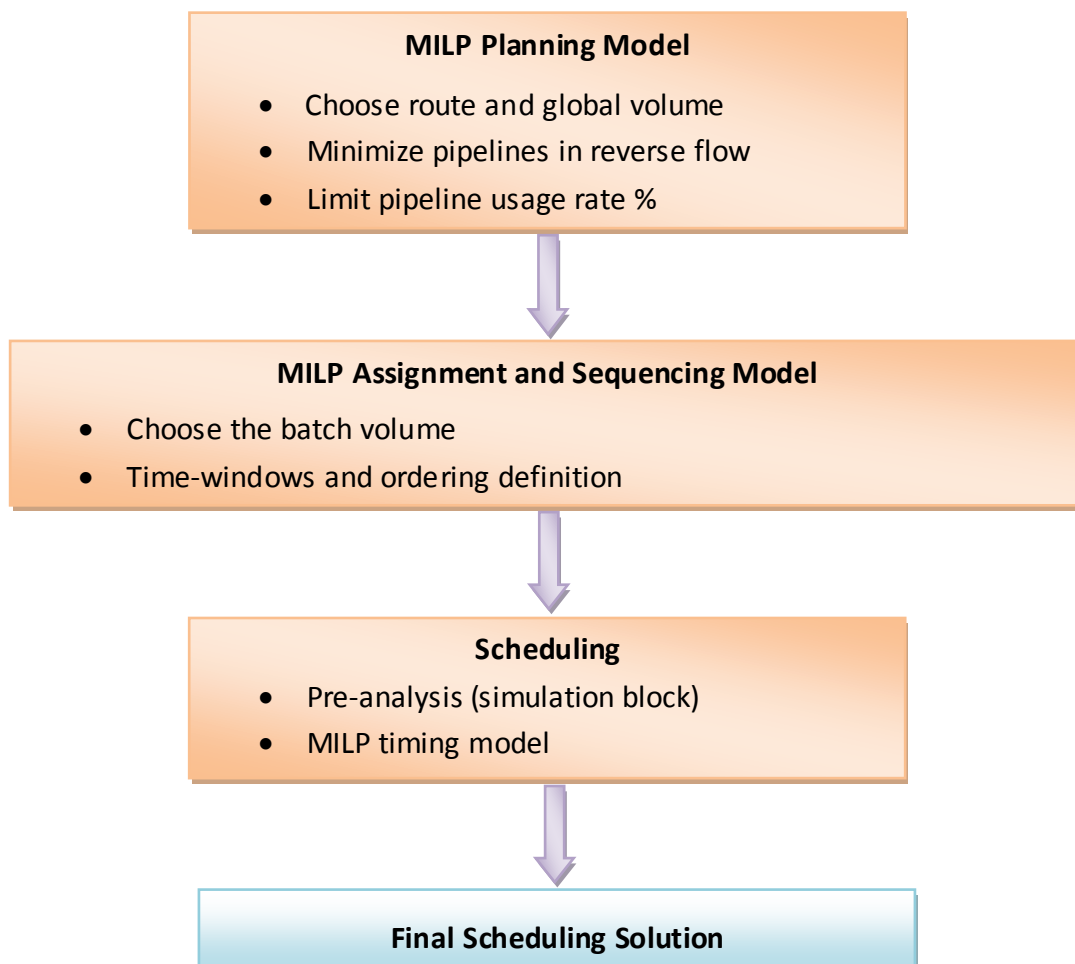


Fig.2.4 Schéma de la méthode de décomposition

(LiangYongtu et al., 2012) proposent une étude sur l'optimisation d'un programme de livraison pour un pipeline multi-produit. La fonction objective considérée consiste à réduire le temps de livraison afin de satisfaire les demandes des clients avant la date due. Un

modèle mathématique d'optimisation est établi à chaque station de livraison. Ensuite, un programme optimal est choisi par une règle heuristique. Cette étude a été développée par un logiciel de simulation et elle a été appliquée à la gestion de plusieurs pipelines multi-produits en Chine. [35]

(Paulo Cesar Ribas et al., 2012) présentent un algorithme micro-génétique multi-objectifs pour l'établissement du programme d'un réseau de pipeline d'un cas réel. Ce travail propose un modèle pour résoudre les sous-problèmes d'ordonnement et de synchronisation, et son objectif principal est de développer une solution hybride basée sur l'algorithme génétique (*GA*) et la programmation linéaire en nombre entier mixtes (*MILP*) pour conduire les différents des différents produits pétroliers dans le réseau de pipeline. [36]

(Diego C. Cafaro, Jaime Cerdá, 2013) présente une formulation rigoureuse pour l'établissement du programme dans un pipeline multi-produit avec un flux réversible. Les auteurs présentent une nouvelle formulation continue pour la planification opérationnelle à court terme des pipelines multi-produit réversibles. Le modèle proposé permet le changement de sens d'écoulement autant de fois selon les besoins pour satisfaire les demandes des clients, le programme cherche à déterminer les instants précis pour l'inversion de flux. Il fournit les programmes d'entrée et de rendement dans un pas à pas, et le produit le plus commode employé comme remplisseur pour pousser les batchs courants hors de la ligne. [37]

(Mariana E. Coccola et al., 2014) proposent une approche de programmation linéaire en nombre entier mixte pour l'établissement du programme optimal des problèmes industriels tels que le traitement des batchs, le cheminement de flotte. Le modèle proposé à donner avec précision le temps de changement, distances de transport, les interfaces entre les produits sans augmenter le nombre de variables binaires, et tout en donnant des résultats informatiques améliorés. Trois études de cas ont été résolues afin de comparer l'efficacité du modèle avec d'autres approches d'optimisation. [38]

(Hossein Mostafaei et Alireza Ghaffari Hadigheh, 2014) présentent une modélisation générale pour l'établissement du programme à long terme des pipelines multi-produit avec des contraintes de livraison. Ce document présente une approche de programmation en nombre entier mixte (*MILP*) pour l'établissement du programme à long terme d'un pipeline multi-produit d'un cas réel reliant une raffinerie unique à plusieurs centres de distribution.

Cette approche permet de considérer différentes échéances pour les demandes en fin de période, la limitation de débit sur des segments de canalisation, et les livraisons simultanées aux centres serveurs de distribution.

Le but de ce modèle est de satisfaire les demandes des produits à différents dépôts, et d'empêcher les interruptions et les relancements inutiles des segments de pipeline. Pour valider l'approche proposée, une paire d'études de cas réels a été résolue. Tous les deux

comportent l'établissement du programme d'une canalisation continue simple transportant quatre produits pétroliers d'une raffinerie unique à cinq dépôts. [15]

(V. G. Cafaro et al., 2015) présentent un modèle d'optimisation pour l'établissement du programme détaillé des pipelines multi-sources. Les auteurs proposent une formulation linéaire en nombre entier mixte (*MILP*) pour l'établissement d'un programme détaillé des pipelines multi-sources ou les injections parallèles des batches et les livraisons des produits aux différents dépôts se fait simultanément. [39]

(S. N. B. Magatao et al., 2015), proposent une approche originale basée sur la décomposition (*MILP*) pour l'établissement d'un programme de distribution dans un réseau de pipeline. Ce travail présente une approche d'établissement du programme des activités opérationnelles dans un grand réseau réel de canalisation, où des dérivés de pétrole et d'éthanol sont transportés et distribués parmi des raffineries, des bornes, des dépôts, et des clients finaux. Le but de la décomposition est de réduire le temps de calcul, L'approche proposée est appliquée à un réseau de canalisation qui inclut 30 canalisations diversifiées bidirectionnelles liées à 14 nœuds (quatre raffineries, deux ports, six dépôts, et deux (02) clients finaux). Des résultats informatiques ont été atteints dans un temps de calcul raisonnable (des secondes à quelques minutes). [40]

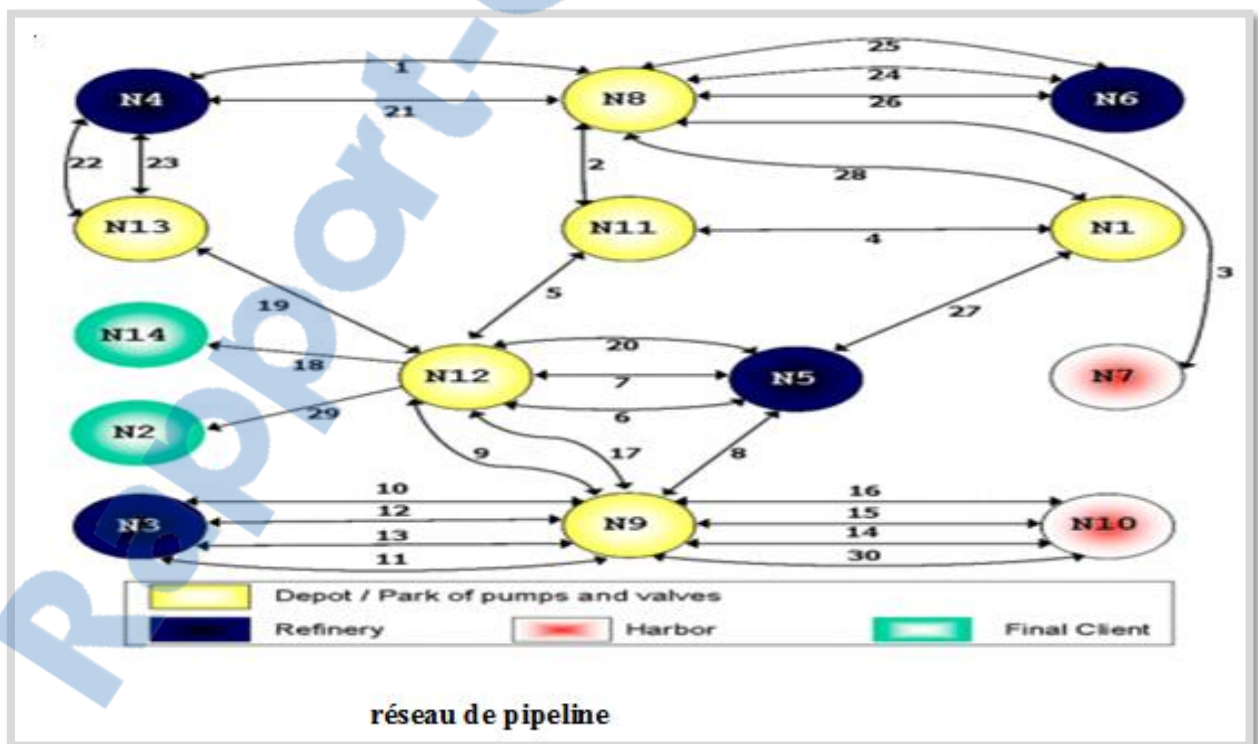


Fig.2.5 un réseau de pipeline

Ils présentent un tableau qui résume les travaux sur le problème de planification et l'établissement de programme dans le pipeline de 2004 à 2014. [40]

paper	problem	(origin/dest/pipe)	approch	representation	(h)	approach ^a
Relvas et al.	sequencing	1/1/1	heuristic	–	744	–
MirHassani and BeheshtiAsl	sequencing	1/1/1	heuristic	–	744	–
Magatão et al.	scheduling	1/1/1	MILP	discrete	150	single model
Relvas et al.	scheduling	1/1/1	MILP	continuous	744	single model
Relvas et al.	scheduling	1/1/1	MILP + heuristics	continuous	744	single model
Cafaro and Cerdá	scheduling	1/1/1	MILP	continuous	744	single model
Magatão et al.	scheduling	1/1/1	MILP + CLP	discrete	144	single model
Relvas et al.	scheduling	1/1/1	MILP	continuous	744	two level
Cafaro and Cerdá	scheduling	1/n/1	MILP	continuous	75	single model
Rejowski and Pinto	scheduling	1/n/1	MILP	discrete	75	single model
Cafaro and Cerdá	scheduling	1/n/1	MILP	continuous	672	horizon rolling
Rejowski and Pinto	scheduling	1/n/1	MINLP	continuous	130	single model
Cafaro et al.	scheduling	1/n/1	MILP + heuristics	continuous	660	p. decomp.
Herrán et al.	scheduling	1/n/1	MINLP	multiperiod	150	single model
MirHassani et al.	scheduling	1/n/1	MILP	multiperiod	504	single model
Cafaro et al.	scheduling	1/n/1	MILP	continuous	660	two level
Ghaffari-Hadigheh and Mostafaei	scheduling	1/n/1	MILP	continuous	168	single model
Mostafaei and Hadigheh	scheduling	1/n/1	MILP	continuous	660	single model
Cafaro et al.	scheduling	1/n/1	MINLP	continuous	660	p. decomp.
Cafaro and Cerdá	scheduling	n/n/1	MILP	continuous	240	single model
MirHassani et al.	scheduling	n/n/1	MILP	continuous	240	single model
MirHassani and Fani Jahromi	scheduling	tree structure	MILP	continuous	720	single model
Cafaro and Cerdá	scheduling	tree structure	MILP	continuous	720	single model
Magatão et al.	planning + sequencing	network	MILP	continuous	720	p. decomp.
Stebel et al.	planning	network	MILP	–	720	single model
Ribas et al.	sequencing	network	GA	–	720	–
Abbasi and Garousi	scheduling	network ^b	MILP	discrete	144	single model
Boschetto et al.	scheduling	network	MILP	continuous	720	p. decomp.
Lopes et al.	scheduling	network	CP	discrete	240	p. decomp.
Cafaro and Cerdá	scheduling	network	MILP	continuous	183	n. decomp.
Souza Filho et al.	scheduling	network	MILP + heuristics	discrete	42	p. decomp.
Fabro et al.	scheduling	network	MILP	continuous	744	p. decomp.

Fig.2.6 Les travaux sur le problème de planification et l'établissement de programme dans le pipeline depuis 2004 jusqu'à 2014.

2.2. Les approches de résolution

2.2.1. Programmation linéaire en nombre entier :

2.2.1.1. Définition :

Dans le problème général de la programmation linéaire, tous les inconnus peuvent varier de façon continue. Si, en revanche, on impose à toutes les variables du problème d'avoir des valeurs entières, on se trouve devant un problème de programmation linéaire à variables «entières» ou en «nombres entiers» pur. Si une partie seulement des variables est soumise à cette contrainte supplémentaire d'intégralité, il s'agit alors d'un problème de programmation linéaire en variables «mixtes». [41]

2.2.1.2. Optimisation en nombres entiers :

Un problème d'optimisation en nombres entiers est un problème d'optimisation dont toutes les variables sont contraintes à ne prendre que des valeurs entières.

2.2.1.3. Optimisation mixte en nombres entiers :

Un problème d'optimisation mixte en nombres entiers (*MILP*) est un problème d'optimisation dont certaines variables sont contraintes à ne prendre que des valeurs entières. [42]

MILP est très utilisé dans les problèmes de planification des pipelines à cause de sa rigueur, sa flexibilité et sa vaste capacité de modélisation. Ce dernier est devenu l'un des modèles les plus utilisés pour ce type de problème. [43]

2.2.1.4. Condition d'optimalités d'un problème d'optimisation en nombres entiers :

Il n'est pas possible de caractériser la solution optimale d'un problème d'optimisation en nombres entiers. Autrement dit, il n'y a pas de conditions d'optimalité pour l'optimisation discrète, cela complique considérablement la résolution du problème.

Il y'a essentiellement deux manières d'aborder le problème,

a) Les méthodes exactes :

En général, tous les problèmes d'optimisation de transport multi-produit des carburants par pipeline peuvent être facilement résolus par un algorithme exact à cause de leur principe qu'est basé sur la programmation linéaire en nombre entier.

Les méthodes exactes utilisées seulement pour des horizons de temps (temps de planification) plus courtes comprenant seulement quelques jours. De cette manière, la taille du modèle reste raisonnable et la solution peut être trouvée [44]. Donc la solution optimale est fournie, mais le temps nécessaire pour la trouver est une fonction exponentielle de la taille du problème.

b) Les méthodes heuristiques :

Les méthodes exactes donnent une solution optimale du problème lorsqu'on fait de la planification sur un horizon de temps court. Le cas échéant, il faut utiliser une méthode approché tel que les heuristiques et les méta-heuristiques. Dans ce cas nous n'avons aucune garantie d'optimalité et aucune mesure de qualité de la solution. Ainsi, les performances de la configuration obtenue sont évaluées empiriquement sur des problèmes connus. [45]

2.2.2. Les méthodes exactes :

Les méthodes exactes, appelées aussi méthodes complètes, permettent de trouver la solution optimale d'un problème d'optimisation en explorant exhaustivement l'ensemble des solutions (ou configurations) possibles [42]. L'exploration énumérative (toutes les solutions sont évaluées une à une) est la technique la plus basique mais elle reste inappropriée aux problèmes combinatoires. Voilà pourquoi des méthodes exactes comme l'algorithme de Séparation & Évaluation (Branch & Bound) explorent l'ensemble des solutions (ou configurations) possibles et éliminent des sous-ensembles de mauvaises solutions à

l'aide de techniques d'élagage. L'avantage d'une telle approche est que les solutions éliminées ne sont pas évaluées <<à la main >>mais de façon globale. [46]

2.2.2.1. Méthodes de recherche arborescente par séparation et évaluation [47] :

L'algorithme de séparation et évaluation, plus connu sous son appellation anglaise Branch and Bound (Land et Doig, 1960), repose sur une méthode arborescente de recherche d'une solution optimale par séparations et évaluations, en représentant les états solutions par un arbre d'états, avec des nœuds, et des feuilles.

Le Branch and Bound est basé sur trois axes principaux :

1. L'évaluation
2. La séparation
3. La stratégie de parcours.

- **L'évaluation :**

L'évaluation permet de réduire l'espace de recherche en éliminant quelques sous-ensembles qui ne contiennent pas la solution optimale. L'objectif est d'essayer d'évaluer l'intérêt de l'exploration d'un sous-ensemble de l'arborescence. Le Branch and Bound utilise une élimination de branches dans l'arborescence de recherche de la manière suivante : la recherche d'une solution de coût minimal, consiste à mémoriser la solution de plus bas coût rencontré pendant l'exploration, et à comparer le coût de chaque nœud parcouru à celui de la meilleure solution. Si le coût du nœud considéré est supérieur au meilleur coût, on arrête l'exploration de la branche et toutes les solutions de cette branche seront nécessairement de coût plus élevé que la meilleure solution déjà trouvée.

- **La séparation :**

La séparation consiste à diviser le problème en sous problèmes. Ainsi, en résolvant tous les sous-problèmes et en gardant la meilleure solution trouvée, on est assuré d'avoir résolu le problème initial. Cela revient à construire un arbre permettant d'énumérer toutes les solutions. L'ensemble de nœuds de l'arbre qu'il reste encore à parcourir comme étant susceptibles de contenir une solution optimale, c'est-à-dire encore à diviser, est appelé ensemble des nœuds actifs.

- **La stratégie de parcours :**

- Largeur d'abord : Cette stratégie favorise les sommets les plus proches de la racine en faisant moins de séparations du problème initial. Elle est moins efficace que les deux autres stratégies présentées ;
- La profondeur d'abord : Cette stratégie avantage les sommets les plus éloignés de la racine (de profondeurs plus élevées) en appliquant plus de séparations au problème initial. Cette voie mène rapidement à une solution optimale en économisant la mémoire ;
- Le meilleur d'abord : Cette stratégie consiste à explorer des sous problèmes possédant la meilleure borne. Elle permet aussi d'éviter l'exploration de tous les

sous-problèmes qui possèdent une mauvaise évaluation par rapport à la valeur optimale.

2.2.2.2. La méthode de coupes planes (Cutting-Plane) [47] :

La méthode de coupes planes a été développée par Schrijver en 1986, elle est destinée à résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire (POC) qui se formulent sous la forme d'un programme linéaire (PL) : $\min \{cTx : Ax \geq b, x \in R^n\}$

Dans le cas, où (POC) est de grande taille pour le représenter explicitement en mémoire ou pour qu'il tienne dans un solveur de programmation linéaire, on utilise une technique qui consiste à enlever une partie de ces contraintes et de résoudre le problème relaxé (POCR). La solution optimale de (PL) est contenue dans l'ensemble de solutions réalisables de cette relaxation. Pour un problème de minimisation la solution optimale du problème (POCR) est inférieure ou égale à la solution optimale donnée par (POC).

Cette méthode consiste à résoudre un problème relaxé, et à ajouter itérativement des contraintes du problème initial. On définit une contrainte pour le problème de minimisation par le couple (s, s_0) où $s \in R^n$ et $s_0 \in R$, cette contrainte est dite violée par la solution courante x si pour tout $y \in \{x : Ax \geq b\}$ on a $sTx < s_0$ et $sTy \geq s_0$, on appelle alors ces contraintes des coupes planes. On arrête l'algorithme lorsqu'il n'y a plus de contraintes violées par la solution courante, on obtient ainsi une solution optimale pour le problème initial.

La méthode des coupes planes est peu performante mais sa performance est améliorée lorsqu'elle est combinée avec la méthode "Branch and Bound".

2.2.2.3. La méthode (Branch and Cut) [47] :

La méthode des coupes planes n'est pas toujours efficace face aux problèmes difficiles. De même, bien que l'algorithme du "Branch and Bound" puisse être très performant pour une certaine classe de problèmes, pour cela on utilise la méthode "Branch and Cut" qui combine entre l'algorithme du "Branch and Bound" et de la méthode des coupes planes. Pour une résolution d'un programme linéaire en nombres entiers, la méthode "Branch and Cut" commence d'abord par relaxer le problème puis appliquer la méthode des coupes planes sur la solution trouvée. Si on n'obtient pas une solution entière alors le problème sera divisé en plusieurs sous-problèmes qui seront résolus de la même manière.

2.2.3. Les métaheuristiques :

Les métaheuristiques sont une branche de l'optimisation en informatique et mathématiques appliquées. Elles sont apparues au début des années 1980 dans le but de résoudre au mieux les problèmes dits d'optimisation difficile. En effet, celles-ci s'appliquent à toutes sortes de problèmes discrets, et elles peuvent s'adapter aussi aux problèmes continus ou mixtes. Elles partent de principes plus génériques que les heuristiques et sont susceptibles de s'appliquer à un cadre plus large de problèmes, tandis qu'une heuristique est

particulière pour un problème donné [48]. d'autres appelées métaheuristiques, ont le grand avantage d'être capable de s'adapter à différents types de problèmes combinatoires de plus grandes tailles ainsi que de très nombreuses applications qu'il était impossible de traiter auparavant (Laporte et Osman, 1996). Ces métaheuristiques constituent un ensemble de règles et de mécanismes généraux ayant comme fonction de contrôler et de guider la recherche de solutions dont la qualité est au-delà de ce qu'il aurait été possible de trouver à l'aide d'une simple heuristique. L'objectif de cette section n'est pas d'exposer toutes les métaheuristiques existantes, mais de présenter de manière générale les métaheuristiques les plus usitées pour le problème de transport par pipeline multi-produit. Parmi lesquels nous pouvons citer les algorithmes génétiques (genetic algorithms), et la recherche tabou... . Toutes ces métaheuristiques sont inspirées par des analogies: avec la biologie nous retrouvons les algorithmes génétiques et avec la mémoire humaine, nous retrouvons la recherche tabou

Les métaheuristiques forment un ensemble de méthodes utilisées en recherche opérationnelle pour résoudre des problèmes d'optimisation réputés difficiles. On peut distinguer deux approches en métaheuristiques :

- Les approches trajectoire : Ces algorithmes partent d'une solution initiale (obtenue de façon exacte, ou par tirage aléatoire).
- Les approches population (évolutionnaires) : Elles consistent à travailler avec un ensemble de solutions simultanément, que l'on fait évoluer graduellement. L'utilisation de plusieurs solutions simultanément permet naturellement d'améliorer l'exploration de l'espace des configurations.

2.2.3.1. Recherche Tabou :

La recherche tabou (*TS*) est une méthode de recherche locale combinée avec un ensemble de techniques permettant d'éviter d'être piégé dans un minimum local ou la répétition d'un cycle. La recherche tabou est introduite principalement par Glover (Glover, 1986), Hansen (Hansen, 1986), Glover et Laguna dans (Glover et Laguna, 1997). Cette méthode a montré une grande efficacité pour la résolution des problèmes d'optimisation difficiles. [47]

Le principe de base de la méthode tabou est simple, partant d'une solution initiale, son processus itératif, tente de converger vers la solution optimale en remplaçant à chaque itération la solution courante par la meilleure solution trouvée dans son voisinage. [48]

Ce passage d'une solution à une autre se fait en deux étapes, la première consiste à engendrer un ensemble de solutions voisines de la solution courante en un seul mouvement élémentaire, pour ensuite en choisir la meilleure après une évaluation de la fonction objectif du problème pour chacune des configurations construites, ce choix est adopté même si elle est moins bonne que la solution actuelle, c'est le cas lorsque tous les points du voisinage ont une valeur plus élevée; c'est grâce à ce mécanisme d'acceptation de la détérioration de la fonction objectif que la méthode tabou permet d'éviter des minimums locaux. [47]

Le danger est alors de revenir à une configuration déjà retenue ou de cycles entre deux solutions. Pour éviter ce phénomène, le mécanisme consiste à interdire, d'où le nom de tabou, l'accès aux dernières solutions explorées dont les informations sont conservées dans une liste tabou qui est une mémoire à court terme et va servir à empêcher tout déplacement vers les dernières solutions visitées. [48]

Nous mettons en œuvre une liste tabou (Tabou List) T de longueur k contenant les k dernières solutions visitées, ce qui ne donne pas la possibilité à une solution déjà trouvée d'être acceptée et stockée dans la liste tabou. Alors le choix de la prochaine solution est effectué sur un ensemble des solutions voisines en dehors des éléments de cette liste tabou. Quand le nombre k est atteint, chaque nouvelle solution sélectionnée remplace la plus ancienne dans la liste. La construction de la liste tabou est basée sur le principe FIFO, c'est-à-dire premier entré, premier sorti. Comme critère d'arrêt on peut par exemple fixer un nombre maximum d'itérations sans amélioration de la meilleure solution obtenue, ou bien fixer un temps limite après lequel la recherche doit s'arrêter. [48]

Cependant, la liste tabou peut restreindre l'espace de recherche ou interdire des mouvements qui peuvent améliorer la fonction objective. Pour pallier à ces inconvénients, certaines conditions appelées critère d'aspiration qui peuvent être définies de plusieurs manières sont mises en place pour lever l'interdiction d'utilisation d'un mouvement si par exemple ce dernier conduit à une solution de qualité meilleure à celle de la solution trouvée.

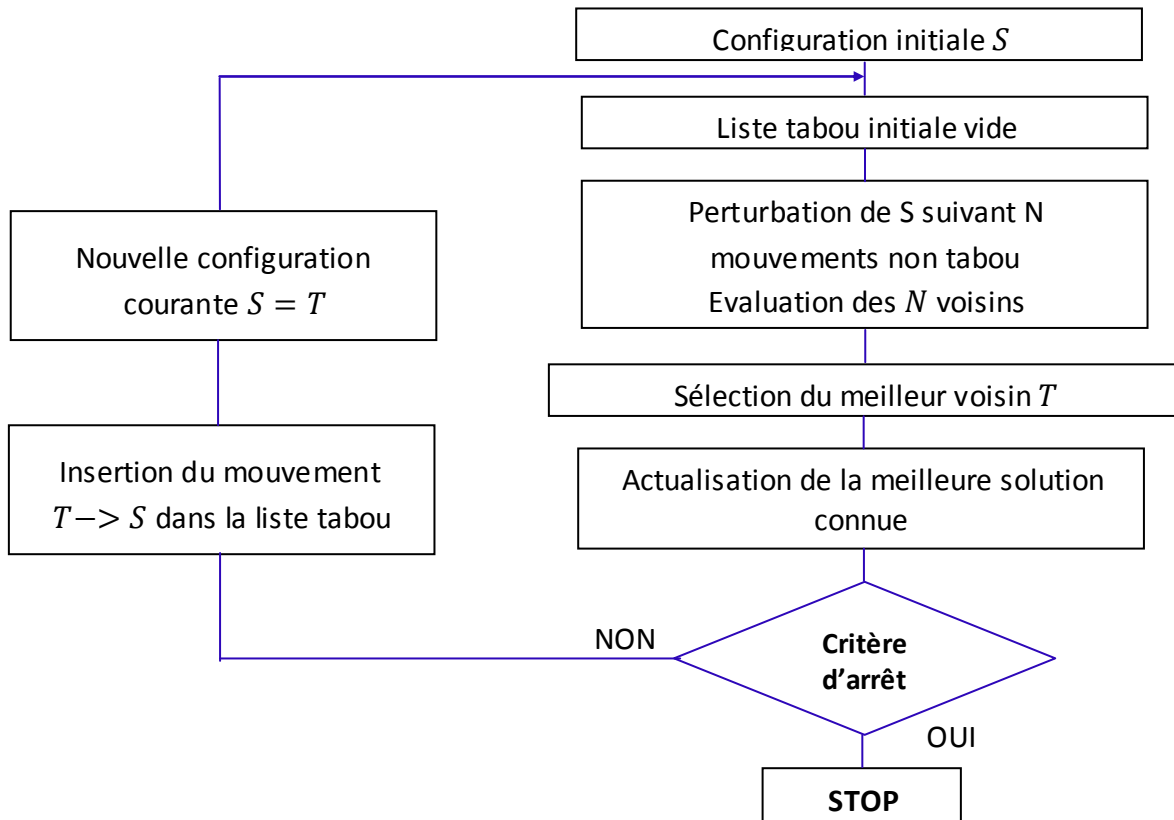


Fig.2.7 l'organigramme de la recherche tabou (Dréo, 2004)

2.2.3.2. Les algorithmes génétiques :

La génétique est une branche de la biologie qui étudie la transmission des caractères héréditaires chez les êtres vivants. Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes itératives de recherche probabiliste qui s'inspirent de cette science et plus précisément de l'évolution naturelle des espèces en exploitant la simulation des mécanismes de variation et de sélection effectués dans les processus évolutifs naturels pour résoudre des problèmes. [47]

La première description du processus des algorithmes génétiques qui sont le type d'algorithme le plus connu et le plus utilisé des algorithmes évolutionnaires a été donnée par Holland en 1975, puis approfondie par Goldberg. [47]

Les AG utilisent des croisements, sélections et mutations pour faire évoluer vers l'optimum une population de solutions représentées sous forme de chromosomes. Ainsi, à chaque itération deux chromosomes-parents de la population sont sélectionnés en favorisant les plus prometteurs selon une mesure appelée fitness, puis croisés pour obtenir un ou deux chromosomes-enfants combinant les caractéristiques des parents. [46]

L'algorithme génétique commence par générer une population initiale d'individus, pour chacun d'entre eux nous calculons la fitness (qui représente la valeur de la fonction objectif ou fonction d'évaluation de la solution associée à l'individu considéré), et nous appliquons par la suite un opérateur de sélection pour la reproduction. Ces opérateurs seront soumis ensuite à un opérateur de croisement (Le croisement génère des individus, qui sont le résultat de la combinaison de deux solutions parents) qui va combiner les individus sélectionnés pour donner naissance à de nouvelles solutions (nouveaux individus). Les individus résultants peuvent être mutés par un opérateur de mutation (La mutation est une modification aléatoire d'un individu, c'est un opérateur qui permet d'ajouter de la diversité à la population). Les trois opérateurs sélection, croisement, et mutation permettent de générer une nouvelle population d'individus (dite nouvelle génération). Nous évaluons la fitness des individus obtenus. De génération en génération, on obtient des individus plus performants que ceux des anciennes générations. Le processus s'arrête lorsqu'un critère d'arrêt est atteint. [49]

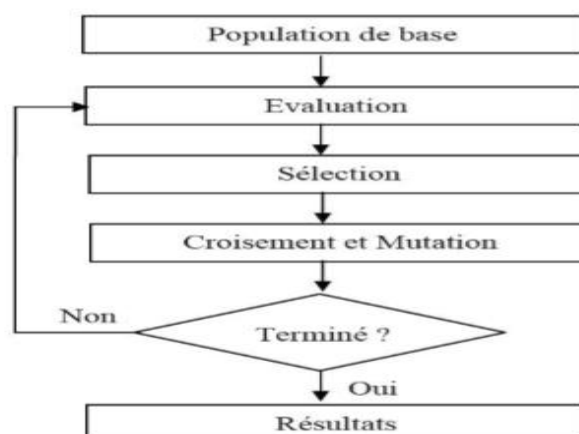


Fig.2.8 fonctionnement de l'algorithme génétique

2.2.3.3. Algorithme glouton :

Un algorithme glouton (greedy algorithm) en anglais, parfois appelé aussi algorithme gourmand est un algorithme qui suit le principe de faire, étape par étape, un choix optimum local. Dans certains cas cette approche permet d'arriver à un optimum global. En algorithmique, et plus précisément en optimisation combinatoire, de nombreux algorithmes fonctionnent en faisant une série d'étapes, avec des choix. Une méthode classique est la programmation dynamique qui permet de tester tous les choix. Cependant, les complexités des algorithmes de ce type sont parfois trop grandes et l'on choisit d'autres méthodes. L'une de ces méthodes est de choisir localement la meilleure solution : ce sont les algorithmes gloutons. [48]

Cet algorithme a de nombreuses caractéristiques, résumées comme suit [49] :

- Le choix localement de la solution optimale est simple à faire.
- L'algorithme (et le code) sont souvent simples.
- La preuve de la validité de l'algorithme est difficile. Il faut montrer que la suite des choix localement optimaux donne une solution globalement optimale.

En partant du point A et en cherchant à monter selon la plus forte pente, un algorithme glouton trouvera le maximum local m, mais pas le maximum global figure 2.9.

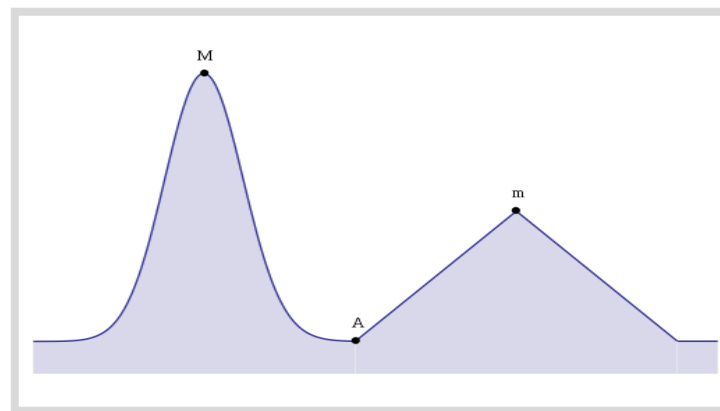


Fig.2.9 Principe d'algorithme glouton

➡ Dans ce travail de Master, nous nous sommes intéressés à la méthode continue ou l'injection du batch se fait sans interruption, nous avons utilisé comme approche de modélisation de la programmation linéaire en nombres entiers mixtes, notre principale objective consiste à trouver la séquence optimale des produits à injecter tout en minimisant le volume de contaminant avec la satisfaction des demandes clients avant la date due, Nous essayerons aussi d'assurer une autonomie de stock pour pallier aux ruptures en cas d'arrêt de production.

Notre objectif est donc de trouver la meilleure réponse à la question suivante : quand et combien se fait l'injection et la réception de chaque batch i qui contient le produit p ?

Le contaminât peut être traité de deux façon différentes, ce dernier est soit envoyé une deuxième fois à la raffinerie pour la reproduction où bien il est réinjecté dans certains types de carburants.

Contrairement aux travaux existants qui considèrent l'opération de reproduction de contaminât, l'apport de notre travail consiste à stocker le contaminât dans des réservoirs spécifiques et de le réinjecté dans les réservoirs de certains carburants avec un taux de correction prédéfini. Donc nous avons contrôlé dans notre modèle proposé le niveau de stock des réservoirs du contaminât et les opérations de réinjection.

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur les problèmes de transport dans les pipelines avec une description générale sur le problème d'optimisation de transport des carburants par pipeline multi-produit, nous avons donc cités plusieurs travaux traitant ce problème ainsi que les différentes approche utilisées pour sa résolution notamment les méthodes exactes et les métaheuristiques.



Chapitre 03

Problématique et modèle
mathématique



3.1. Introduction

Les pipelines sont utilisés pour le transport de bruts de différentes origines, et lorsqu'il s'agit ainsi de produits finis, tels que : les essences, le gasoil, le GPL,...etc. On est souvent amené à pomper successivement dans la même canalisation deux ou plusieurs fluides différents dans une séquence bien déterminée, au lieu de réserver à chaque fluide des longueurs importantes de canalisations qui lui sont appropriées et qui rendent le réseau de pipelines trop encombrant, engendrant plus de dépenses en matière d'exploitation et de maintenance. [1]

Les travaux d'établissement du planning d'approvisionnement optimal pour un pipeline multi-produit ont suscité l'attention des chercheurs depuis la dernière décennie, ces derniers ont abordé le programme de transport par canalisation sur des grands réseaux de pipelines dans différents pays comme, le Brésil, le Portugal, les Etats-Unis, l'Espagne et l'Inde. Ils ont utilisé différentes approches comme la programmation en nombres entiers mixtes, la simulation, les heuristiques et l'intelligence artificielle pour la résolution de ce problème.

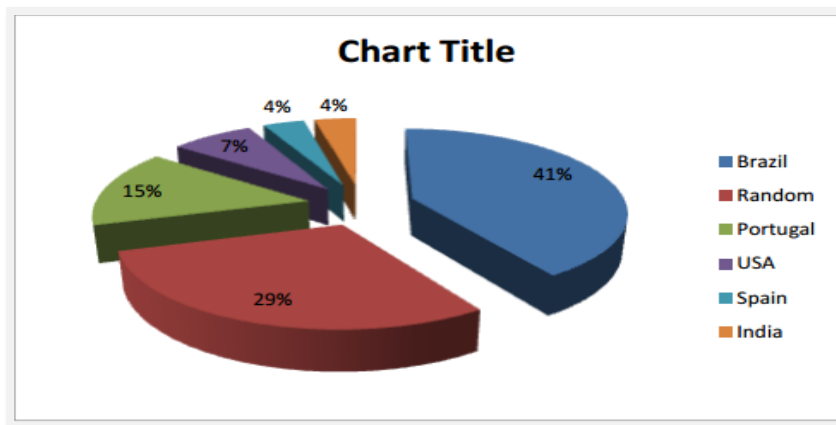


Fig. 3.1 Contribution des pays dans la recherche des problèmes de distribution des produits raffinés via les systèmes de pipeline « RPSDPPS » [52]

3.2. Problématique

L'établissement d'un programme ou d'un planning optimal pour l'exploitation d'un oléoduc multi-produit consiste à définir principalement la séquence de produits à injecter, le volume de chaque produit, et le temps du début et de fin de chaque injection d'un nouveau batch, tout en respectant les contraintes de satisfaction des clients et de minimisation du volume de contaminant, des contraintes opérationnelles,...etc.

Dans notre travail on s'intéresse au pipeline multi-produit ASR, reliant la raffinerie d'Arzew aux centres de stockage et de distribution de Sidi Bel Abbès et de Remchi. Ce dernier dessert ces centres en carburants à savoir : Le Gasoil, L'Essence Super, L'Essence sans plomb et L'Essence Normale.

Comme expliqué précédemment, l'inconvénient du transport par un oléoduc multi-produit réside dans la génération des zones de contaminant stocké dans des réservoirs spéciaux de

tailles limités avant d'être réinjecté dans les réservoirs des carburants. De ce fait, si le planning d'approvisionnement est mal fait surtout dans le cas où les sorties journalières sont amplifiés on ne trouve pas assez d'espace de stockage de contaminât dans le dernier dépôt de Remchi où le contaminât est recueilli. Ce problème provoque l'arrêt de réception dans la canalisation aux différents dépôts, ce qui influe sur la satisfaction des demandes clients.

Donc pour pallier à ce problème, nous proposons dans ce travail un programme d'établissement d'un planning d'approvisionnement dans l'oléoduc multi-produit(ASR) avec la réinjection de contaminât, qui vise à optimiser les séquences des produits à injectés (les batchs) afin de satisfaire les demandes journalière des clients et minimiser la contamination tout en respectant un ensemble de contraintes.

3.3. Modèle mathématique :

3.3.1. Nomenclature :

a) Les ensembles :

I	L'ensemble des batchs ($I^{ancien} \cup I^{nouveau}$)
I^{ancien}	L'ensemble des batchs qui sont dans le pipeline à l'état initial (à $t = 0$)
$I^{nouveau}$	L'ensemble des nouveaux batchs qui seront injectés dans l'horizon de planification
J	L'ensemble des dépôts
P	L'ensemble des produits pétroliers
T	L'ensemble des périodes du temps dans l'horizon de planification
K	L'ensemble des types de contaminât

b) Les paramètres :

$mix(p, p')$	Volume du contaminât entre deux batchs successif qui contient le produit p et p' .
$BM(p, p')$	Matrice booléenne qui donne les séquences possibles et les séquences interdites des produits dans le pipeline.
$dp_{p,j,t}$	La demande du produit p à la période t dans le dépôt j .
dd_t	La date due de la période t .
$cap_{p,j}$	La capacité de stock du produit p dans le dépôt j .

$SS_{p,j}$	Le stock de sécurité du produit p dans le dépôt j .
$hmax$	Horizon de temps de planification (heure).
$shint_{p,j}$	Niveau de stock initial du produit p dans le dépôt j à $t = 0$.
$qint_h$	Le volume initial des anciens batchs qui sont dans le pipeline à l'état initial (à $t = 0$).
vd_j	Le volume du pipeline (à partir de la raffinerie jusqu'au dépôt j).
vt	Le volume total du pipeline à partir de la raffinerie jusqu'au dernier dépôt.
$capcont_k$	La capacité de stock du contaminât.
$nvscont0_k$	Le niveau de stock initial du contaminât à $t = 0$.
$VRmin_p / VRmax_p$	Le débit d'injection du produit p (maximum et minimum) à l'origine du pipeline.
$VDmin_j / VDmax_j$	Le débit de réception (maximum et minimum) dans le dépôt j ,
M	une grande valeur ($M \gg 0$).
$\lambda_{p,p'}$	Le pourcentage du volume du contaminât qui résulte entre un produit p et p' dans le pipeline qui est soustrait du volume du batch contenant le produit p .
α	Le taux d'injection du contaminât dans les carburants.

c) Les variables de décision :

- Les variables continus :

L_i	La durée de pompage ou d'injection du batch i .
$L_{i,j}$	La durée de réception dans le dépôt j durant l'injection d'un nouveau batch i .
S_i	Le temps de début du pompage du batch i
$INV_{i,p,p'}$	Le volume d'interface entre le batch i et le batch $i + 1$ qui contient respectivement le produit p et p' .
$vm_{h,j,i}$	Le volume du batch h livré au dépôt j à partir du pipeline durant l'injection du batch i .

Q_i	Le volume initial d'un nouveau batch i .
$vp_{i,p}$	Le volume initial d'un nouveau batch i qui contient le produit p .
$w_{h,i}$	Le volume du batch h à la fin du pompage du batch i .
$F_{h,i}$	La limite supérieure du batch h à la fin de l'injection du batch i (est donné par le volume du pipeline à partir de la raffinerie jusqu'à la limite supérieure du batch h).
$nvs_{p,j,i}$	Le niveau de stock du produit p dans le dépôt j à la fin de l'injection du batch i .
$vom_{p,j,i}$	Le volume du produit p livré aux clients à partir du dépôt j durant l'injection du batch i .
$vmp_{h,p,j,i}$	Le volume du batch h qui contient le produit p livré au dépôt j à partir du pipeline durant l'injection du batch i .
$vsq_{h,p,j,i}$	Le volume du batch h qui contient le produit p sans contamination livré au dépôt j à partir du pipeline durant l'injection du batch i .
$nvscont_{k,i}$	Le niveau de stock du contaminât de type k à la fin de l'injection du batch i .
$contaminat_{h,p',i}$	Le volume du contaminât entre le batch h et $h - 1$ qui est stocké dans le dernier dépôt durant l'injection du batch i .

- **Les variables binaires :**

$y_{i,p}$	Égale à 1 si le batch i contient le produit p , et 0 si non.
$x_{h,j,i}$	Égale à 1 si le dépôt j peut recevoir un volume du batch h durant l'injection de i , et 0 si non.
$\omega_{i,t}$	Égale à 1 si l'injection du batch i est terminée dans la période t , et 0 si non.
$z_{h,j,i}$	Égale à 1 si le dépôt j commence à recevoir un volume du batch h durant l'injection d'un nouveau batch i , et 0 si non.
$N_{h,j,i}$	Égale à 1 si le dépôt j reçoit un volume durant l'injection d'un nouveau batch i et 0 si non.

3.3.2. La formulation mathématique :

3.3.2.1. Hypothèses

Pour la formulation de notre modèle mathématique basée sur la programmation linéaire en nombres entiers mixtes, nous nous sommes basées sur les hypothèses suivantes :

- Un seul pipeline unidirectionnel, assure le transport de plusieurs produits pétroliers à partir d'une raffinerie vers plusieurs centres de distribution.
- Les différents produits pétroliers se déplacent dans le pipeline sans aucune séparation physique entre eux.
- Le pipeline est toujours plein, par conséquent on suppose que les produits sont incompressibles donc si on veut recevoir une quantité de produits par l'ensemble des dépôts, il est nécessaire d'injecter la même quantité à l'origine du pipeline.
- La longueur de l'horizon de planification est fixe.
- Le volume du contaminant entre deux différents type de produit est supposé fixe.
- Le contaminant est stocké dans des réservoirs spéciaux, avant qu'il soit injecté dans les réservoirs des carburants avec un faible pourcentage.
- Les demandes des produits journalières doivent être satisfaites avant la fin de la journée.

3.3.2.2. Caractéristiques des batchs :

Chaque nouveau batch i qui est planifié pour être injecté dans le pipeline est représenté par les variables suivantes :

- Allocation du produit p au batch i $y(i, p)$ (variable binaire) ;
- La taille initiale du batch (Q_i);
- Le temps du pompage (L_i);
- Le temps du départ de l'injection (S_i);
- Le temps de fin de l'injection ($S_i + L_i$) ;
- La période du temps où l'injection du batch est terminée ($\omega(i, t)$ variable binaire).

3.3.2.3. La fonction objective :

La fonction objectif consiste à minimiser le volume total du contaminant qui résulte entre les différents batchs dans le pipeline.

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} INV_{i,p,p'}$$

3.3.2.4. Les contraintes :

1. Contraintes sur les séquences de pompage et l'allocation des produits aux batches :

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{nouveau} \quad (3.1)$$

Chaque nouveau batch i contient au maximum un seul produit. La variable de décision binaire $y_{i,p}$ prend la valeur 1 si le batch i contient le produit p , et 0 sinon.

Le nombre optimal des nouveaux batches à injecter n'est pas connu à l'avance, un nombre de batch maximum $|I^{nouveau}|$ est donc prédéfinie. Par conséquent, le résultat obtenu donne lieu à des batches fictifs ne contenant aucun produit, c.à.d. des batches non injectés.

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{nouveau} \quad (3.2)$$

Le batch $i - 1$ est injecté avant le batch i , et si le batch $i - 1$ ne contient aucun produit,

$$\sum_{p \in P} y_{i-1,p} = 0, \text{ donc nécessairement, } \sum_{p \in P} y_{i,p} = 0.$$

$$\sum_{i \in I^{nouveau}} L_i \leq hmax \quad (3.3)$$

La somme de la longueur de pompage L_i de tout les nouveaux batches ne doit pas dépassée l'horizon de planification $hmax$.

$$S_i \geq S_{i-1} + L_{i-1} \quad \forall i \in I^{nouveau} \quad (i \geq 2) \quad (3.4)$$

L'injection du batch i ne peut commencer qu'après la fin de l'injection du batch $i - 1$.

2. Contrainte de contaminât entre deux batches consécutifs :

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} INV_{i,p,p'} \geq mix(p,p') * (y_{i,p} + y_{i+1,p'} - 1) \quad \forall i \in I, i < |I|, p,p' \in P \quad (3.5)$$

Comme nous avons déjà expliqué précédemment, dans les pipelines multi-produits le pompage des différents produits se fait successivement sans aucune séparation physique. Nous supposons dans notre travail que le volume de contaminât entre deux produit p et p' est fixe, la valeur de contaminât entre les différents types des produits est donné par la matrice constante $mix(p,p')$.

La variable de décision $INV_{i,p,p'}$ représente le volume de contaminât entre le batch i et le batch $i + 1$ qui contiennent respectivement les produits p et p' , ceci dit que si le batch i contient le produit p ($y_{i,p} = 1$) et le batch $i + 1$ contient le produit p' ($y_{i+1,p'} = 1$), alors la valeur de $INV_{i,p,p'}$ prend la valeur de $mix(p,p')$.

3. Contrainte sur les séquences interdites dans le pipeline :

$$y_{i,p} + y_{i+1,p'} \leq 1 + BM(p,p') \forall i \in I, i < |I|, p, p' \in P \quad (3.6)$$

A cause des caractéristiques chimiques des produits pétroliers, certains produits ne peuvent pas être adjacents dans le pipeline.

La matrice booléenne prédéfinie $BM(p,p')$ donne les séquences possibles et les séquences interdites, alors si le produit p peut suivre le produit p' $BM(p,p')=1$, sinon $BM(p,p')=0$.

4. Contrainte sur la conservation de volume dans le pipeline :

$$\sum_{h \in I, h \leq i} \sum_{j \in J} vm_{h,j,i} = Q_i \quad \forall i \in I^{nouveau} \quad (3.7)$$

Nous avons supposé précédemment que le pipeline est toujours plein et que les produits sont incompressibles, ceci dit que si on injecte un nouveau batch i de volume Q_i dans le pipeline, le volume des batchs transférés à l'ensemble des dépôts durant l'injection de ce batch i doit être égale à Q_i .

5. Contraintes sur le volume des batchs dans le pipeline à la fin de l'injection d'un nouveau batch i :

$$w_{h,i+1} = w_{h,i} - \sum_{j \in J} vm_{h,j,i+1} \quad \forall i \in I^{nouveau} (i < |I|), h \in I, (h \leq i) \quad (3.8.a)$$

Le volume du batch h à la fin de l'injection du batch $i + 1$ est égale au volume qui reste dans le pipeline à la fin de l'injection du batch i moins le volume transféré aux différents dépôts durant l'injection du batch $i + 1$.

$$w_{h,i} = qint_h - \sum_{j \in J} vm_{h,j,i} \quad \forall h \in I^{ancien}, i \in I^{nouveau} (i = 1) \quad (3.8.b)$$

Durant l'injection du 1^{er} nouveau batch ($i = 1$), la quantité restante des batchs conservés dans le pipeline à l'état initial ($t = 0$) est égale à la quantité initiale moins les volumes transférés aux dépôts de chaque batch h .

$$w_{i,i} = Q_i - \sum_{j \in J} vm_{i,j,i} \quad \forall i \in I^{nouveau} \quad (3.8.c)$$

Le volume du batch i à la fin de son pompage est égal à la quantité initiale de ce batch moins la quantité transférée aux différents dépôts durant l'injection de batch i en question.

6. Contraintes sur la localisation des batchs dans le pipeline à la fin de l'injection du batch i :

$$F_{h,i} = vt - \sum_{k \in I, k \leq h-1} w_{k,i} \quad \forall i \in I^{nouveau}, h \in I (h \geq 2, h \leq i) \quad (3.9.a)$$

La borne supérieure de chaque batch h avec $h \leq i$ (c.-à-d. les batchs qui sont déjà injectés) à la fin de l'injection d'un nouveau batch est égale au volume total du pipeline (vt) moins le volume total des batchs qui précèdent ce batch dans le pipeline.

$$F_{h,i} = vt \quad \forall i \in I^{nouveau}, h \in I^{ancien} (h = \text{le premier batch}) \quad (3.9.b)$$

Pour le premier ancien batch qui est dans le pipeline à l'état initial, la borne supérieure de ce batch $F(1, i)$ est égale au volume total du pipeline (vt).

7. Contraintes sur les conditions de réception du batch dans le dépôt j :

$$vm_{h,j,i} \leq M * x_{h,j,i} \quad \forall i \in I^{nouveau}, h \in I, j \in J \quad (3.10.a)$$

La variable binaire $x_{h,j,i}$ indique si le dépôt j peut recevoir un volume du batch h durant l'injection d'un nouveau batch i ou non. La contrainte (3.10.a) garantit que si $x_{h,j,i} = 0$ c.-à-d. le dépôt j ne peut pas recevoir un volume à partir du batch h alors le volume transféré au dépôt j à partir du batch h ($vm_{h,j,i}$) est égale à 0.

$$vmp_{h,p,j,i} \leq M * y_{i,p} \quad \forall h \in I, p \in P, j \in J, i \in I^{nouveau} \quad (3.10.b)$$

$$vm_{h,j,i} = \sum_{p \in P} vmp_{h,p,j,i} \quad \forall h \in I, j \in J, i \in I^{nouveau} \quad (3.10.c)$$

La variable de décision $vmp_{h,p,j,i}$ donne la quantité du produit p associée au batch h transférée au dépôt j durant l'injection du batch i .

7.1. La première condition :

7.1.1 Pour le dépôt final :

$$F_{h,i} \geq vd_j * x_{h,j,i} \quad \forall i \in I^{nouveau}, h \in I (h \leq i), j \in J (j = |J|) \quad (3.10.d)$$

La borne supérieure (ou le front) du batch h ($F_{h,i}$) doit être supérieure ou égale à vd_j qui est le paramètre désignant la localisation du dépôt en volume (c'est le volume du tronçon du pipeline compris entre la raffinerie et le dépôt j).

Donc si $F_{h,i} \leq vd_j$, le dépôt j ne peut pas recevoir un volume à partir du batch h durant l'injection de batch i , alors $x_{h,j,i} = 0$.

7.1.2 Pour les dépôts intermédiaires :

$$F_{h,i} - \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} INV_{h-1,p,p'} \geq vd_j \quad \forall i \in I^{nouveau}, h \in I (h \leq i, h > 1), j \in J (j < |J|) \quad (3.10.e)$$

Pour le dépôt intermédiaire qui ne reçoit que du produit pur, contrairement au dépôt final qui reçoit du contaminât, la borne supérieure est considérée par la déduction du volume de contaminât généré entre le batch h et $h - 1$, cette dernière doit être supérieure à son tour ou égale à vd_j .

7.2. La deuxième condition :

$$F_{h+1,i-1} \leq vd_j + vt * (1 - x_{h,j,i}) \quad \forall i \in I^{nouveau}, h \in I (h \leq i, h < |I|), j \in J \quad (3.10.f)$$

La borne supérieure du batch $h + 1$ qui vient après le batch h dans le pipeline doit être inférieure ou égale à vd_j .

8. Contraintes de séparation entre le produit et le contaminât dans le dernier dépôt.

$$z_{h,j,i} = x_{h,j,i} \quad \forall h \in I, i \in I^{nouveau} (i = \text{le premier nouveau batch}), j \in J \quad (3.11.a)$$

$$z_{h,j,i} \geq x_{h,j,i} - \sum_{k \in I^{nouveau}, k=1}^{i-1} x_{h,j,k} \quad \forall h \in I, i \in I^{nouveau}, j \in J \quad (3.11.b)$$

$$\sum_{i \in I^{nouveau}} z_{h,j,i} \leq 1 \quad \forall h \in I, j \in J \quad (3.11.c)$$

La variable de décision binaire $z_{h,j,i} = 1$ si la réception du batch h commence durant l'injection du batch i , sinon $z_{h,j,i} = 0$.

Exemple :

Supposons que nous disposons de (04) nouveaux batchs, on veut savoir durant quelle injection commence la réception du batch 2 ($h = 2$) dans le dépôt j :

$$x_{2,j,i} = (x_{2,j,i1} = 0, x_{2,j,i2} = 1, x_{2,j,i3} = 1, x_{2,j,i4} = 1)$$

$$\text{Donc } z_{2,j,i} = (z_{2,j,i1} = 0, z_{2,j,i2} = 1, z_{2,j,i3} = 0, z_{2,j,i4} = 0)$$

$$\begin{aligned} \text{contaminat}_{h,p,p',i} &\geq \text{mix}_{p,p'} * (y_{h-1,p} + y_{h,p'} + z_{h,j,i} - 2) \\ \forall i \in I^{\text{nouveau}}, h \in I(h \leq i), j \in J, (j = |J|), p, p' \in P \end{aligned} \quad (3.12.a)$$

Cette contrainte donne le volume de contaminât transféré au dernier dépôt durant l'injection d'un nouveau batch i .

Pour connaître si le contaminât entre le batch $h - 1$ et le batch h qui prennent respectivement les produits p et p' est recueilli par le dépôt durant l'injection du batch i , il faut que $y_{h-1,p} = 1, y_{h,p'} = 1$ et le dépôt j commence à recevoir le batch h durant l'injection du batch i .

$$\sum_{i \in I^{\text{nouveau}}} \text{contaminat}_{h,p,p',i} \leq \sum_{p \in P} \text{INV}_{h-1,p,p'} \quad \forall h \in I, p, p', p'' \in P \quad (3.12.b)$$

Cette contrainte assure que le contaminât prend la valeur $\text{INV}_{h-1,p,p'}$.

$$\begin{aligned} \text{vsq}_{h,p,j,i} &= \text{vmp}_{h,p,j,i} - \text{contaminat}_{h,p,p',i} * \lambda_{p,p'} - \text{contaminat}_{h+1,p,p'',i} * \lambda_{p,p''} \\ \forall p, p' \in P, h \in I, i \in I^{\text{nouveau}}, j \in J, (j \neq |J|) \end{aligned} \quad (3.12.c)$$

Dans le dernier dépôt on doit séparer le volume total $\text{vmp}_{h,p,j,i}$ du contaminât.

La variable ($\text{vsq}_{h,p,j,i}$) donne le volume de carburant transféré au dernier dépôt sans contamination.

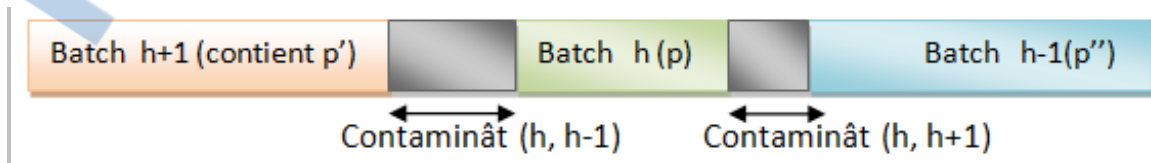


Fig.3.2 Le contaminât qui résulte entre deux batchs adjacents dans le pipeline

9. Contraintes sur le niveau de stock dans les dépôts :

a) Pour les dépôts intermédiaires :

$$nvs_{p,j,i} = vint_{p,j} + \sum_{h \in I, h \leq i} vmp_{h,p,j,i} - vom_{p,j,i}$$

$$\forall p \in P, j \in J(j < |J|), i \in I^{nouveau} \quad (i = \text{premier nouveau batch}) \quad (3.13.a)$$

A la fin de l'injection du premier nouveau batch, le niveau de stock du produit p dans le dépôt j $nvs_{p,j,i}$ est égal au niveau du stock initial $vint_{p,j}$ plus la somme des quantités des batchs h qui prennent le produit p transféré au dépôt j durant l'injection du batch 1 moins la quantité livrée aux clients pendant le temps de pompage de ce batch $vom_{p,j,i}$.

$$nvs_{p,j,i} = nvs_{p,j,i-1} + \sum_{h \in I, h \leq i} vmp_{h,p,j,i} - vom_{p,j,i}$$

$$\forall p \in P, j \in J(j < |J|), i \in I^{nouveau} \quad (3.13.b)$$

En général, le niveau de stock du produit p dans le dépôt j à la fin du pompage du batch i est égale au niveau de stock de ce produit à la fin du pompage du batch précédent $i - 1$ plus la somme du volume du produit p transféré au dépôt j durant l'injection du batch i moins la quantité livrés aux clients pendant le temps de pompage de ce batch ($vom_{p,j,i}$).

b) Pour le dépôt final :

- Pour les produits 3 (Ca) et 4 (sp) qui ne subissent pas une opération de correction, c.-à-d. les produits pour lesquels il n'y a pas de réinjection de contaminant dans leurs réservoirs correspondants. Le niveau de stock des ces produits à la fin de l'injection du batch i est égale au niveau du stock à la fin de l'injection du batch $i - 1$ plus le volume du produit p transféré au dépôt j durant l'injection du batch i ($vsq_{h,p,j,i}$) moins la quantité livrés aux clients pendant le temps de pompage de ce batch.

$$nvs_{p,j,i} = nvs_{p,j,i-1} + \sum_{h \in I, h \leq i} vsq_{h,p,j,i} - vom_{p,j,i}$$

$$\forall p \in P(p \notin \{p_1, p_2\}), j \in J(j = |J|), i \in I^{nouveau} \quad (3.13.c)$$

$$nvs_{p,j,i} = vint_{p,j} + \sum_{h \in I, h \leq i} vsq_{h,p,j,i} - vom_{p,j,i}$$

$$\forall p \in P(p \notin \{p_1, p_2\}), j \in J(j = |J|), i \in I^{nouveau} \quad (i = 1^{er} \text{ nouveau batch}) \quad (3.13.d)$$

Cette contrainte donne le niveaux de stock des produits (SP, CA) dans le dernier dépôt à la fin de l'injection du batch 1.

- Pour les produits qui subissent une opération de correction (GO, SCA), un facteur de correction α est défini représentant le pourcentage d'injection de contaminant par mètre cube de produit p :

$$nvs_{p,j,i} = nvs_{p,j,i-1} + (1 + \alpha) \sum_{h \in I, h \leq i} vsq_{h,p,j,i} - vom_{p,j,i}$$

$$\forall p \in P(p = 1, p = 2), j \in J(j = |J|), i \in I^{nouveau} \quad (3.13.e)$$

Concernant le GO, SCA , un petit volume α de contaminant est ajouté à chaque réception d'un mètre cube de produit.

$$nvs_{p,j,i} = vint_{p,j} + (1 + \alpha) \sum_{h \in I, h \leq i} vsq_{h,p,j,i} - vom_{p,j,i}$$

$$\forall p \in P(p = 1, p = 2), j \in J(j = |J|), i \in I^{nouveau} \quad (i = 1^{er} \text{ nouveau batch}) \quad (3.13.f)$$

Cette contrainte donne le niveau de stock des produits (GO, SCA) dans le dernier dépôt à la fin de l'injection du batch 1.

$$cap_{p,j} \leq nvs_{p,j,i} \leq cap_{p,j} \quad \forall p \in P, j \in J, i \quad (3.14)$$

Le niveau de stock du produit p dans le dépôt j doit être toujours inférieur ou égale à la capacité de ce produit dans ce dépôt et supérieure ou égale à le stock de sécurité.

$$vom_{p,j,i} \leq nvs_{p,j,i} \quad \forall p \in P, j \in J, i \in I^{nouveau} \quad (3.14)$$

Le volume du produit p sortie aux clients à partir du dépôt j dans chaque opération de pompage doit être toujours inférieur ou égale au niveau de stock du produit p à cette opération de pompage du batch i .

10. Contrainte sur la période de temps où l'injection de batch i est terminée :

Nous considérons dans ce travail que les produits doivent être livrés aux clients avant la date due, ces quantités doivent être livrés en tenant compte des sorties journalières que nous avons avant la fin de la journée qui représente ainsi la date due, donc notre horizon de planification est composé de plusieurs période qui sont les jours et la date due de chaque période qui est la fin de la journée

$$dd_t = (dd_1 = 24, dd_2 = 48, \dots, dd_T).$$

La variable de décision binaire $\omega_{i,t} = 1$ si le pompage du batch i est terminé dans la période $t(dd_{t-1} - dd_t)$ et 0 sinon.

$$\sum_{t \in T} \omega_{i,t} = \sum_{p \in P} y_{i,p} \quad i \in I^{nouveau} \quad (3.15.a)$$

Si le pompage d'un nouveau batch i est terminé dans la période t c'est-à-dire, $dd_{t-1} \leq (S_i + L_i) \leq dd_t$, les deux contraintes suivantes doivent être satisfaites :

$$S_i + L_i \geq dd_{t-1} * \omega_{i,t} \quad \forall i \in I^{nouveau}, t \in T \quad (3.15.b)$$

$$S_i + L_i \geq dd_t + (1 - \omega_{i,t}) * (hmax - dd_t) \quad \forall i \in I^{nouveau}, t \in T \quad (3.15.c)$$

11. Contrainte de la satisfaction des demandes journalières :

$$\sum_{l=1, l \in I^{nouveau}}^i vom_{p,j,l} \geq \sum_{k=1, k \in T}^t dp_{p,j,k} * (\omega_{i,t} - \omega_{i+1,t})$$

$$\forall p \in P, j \in J, t \in T, i \in I^{nouveau} \quad (3.16.a)$$

Supposons que le batch i est de dernier nouveau batch qui est injecté dans la période t donc $\omega_{i,t} = 1$ et $\omega_{i+1,t} = 0$, par conséquent la quantité du produit p qui est transféré à partir du dépôt j à l'ensemble des clients durant l'injection des nouveaux batchs $(1, 2, 3, \dots, i-1, i)$ doit être supérieure ou égale à la quantité demandée accumulée $(t1..t)$ du produit p .

$$\sum_{i \in I^{nouveau}} vom_{p,j,i} = \sum_{t \in T} dp_{p,j,t} \quad \forall p \in P, j \in J \quad (3.16.b)$$

Cette contrainte assure que le volume du produit p transféré à partir du dépôt j dans toutes les opérations de pompage est égal à exactement la demande totale de ce produit durant l'horizon de planification.

12. Le niveau de stock du contaminât :

a) Niveau de stock du contaminât type 1 :

c'est le contaminât due au mélange du gasoil (GO) qui est dans le premier batch $h-1$ et un essence (CA , SCA ou SP) qui est dans le batch suivant h , notons que la réinjection de ce type de contaminât se fait dans les réservoirs du gasoil (GO).

$$nvscont_{k,i} = nvscont_{k,i-1} + \sum_{h \in I, h \leq i} \sum_{p' \in P} contaminat_{h,p,p',i} - \alpha * \sum_{h \in I, h \leq i} vsq_{h,l,j,i} \quad (3.17.a)$$

$$\forall i \in I^{nouveau}, p \in P (p = 1(GO)), l \in P (l = 1(GO)), j \in J, (j = |J|), k \in C (k = 1)$$

Le niveau de stock du contaminât de type 1 à la fin de l'injection du batch i est égal au niveau de stock à la fin de l'injection du batch $i-1$ plus la quantité du contaminât de type 1 transféré au dépôt j durant l'injection moins la quantité réinjecté dans le gasoil.

$$nvscont_{k,i} = nvscont_{p,i} + \sum_{h \in I, h \leq i} \sum_{p' \in P} contaminat_{h,p,p',i} - \alpha \sum_{h \in I, h \leq i} vsq_{h,l,j,i} \quad (17.b)$$

$$\forall i \in I^{nouveau} \quad (i = 1^{er} \text{ nouveau batch}), p \in P(p = 1(GO)), l \in P(l = 1(GO)),$$

$$j \in J, (j = |J|), k \in C(k = 1)$$

Cette contrainte donne le niveau de stock du contaminât de type 1 à la fin de l'injection du premier nouveau batch.

b) Contaminât type 2 :

c'est le contaminât due au mélange d'une essence (*CA*, *SCA* ou *SP*) qui est dans le premier batch $h - 1$ et du Gasoil (*GO*) qui est dans le batch suivant h , notons que la réinjection de ce type de contaminât se fait dans les réservoirs de l'essence super (*SCA*).

$$nvscont_{k,i} = nvscont_{k,i-1} + \sum_{h \in I, h \leq i} \sum_{p' \in P} contaminat_{h,p,p',i} - \alpha * \sum_{h \in I, h \leq i} vsq_{h,l,j,i} \quad (3.17.a)$$

$$\forall i \in I^{nouveau}, p' \in P(p' = 1(GO)), l \in P(l = 2(SCA)), j \in J, (j = |J|), k \in C(k = 2)$$

Le niveau de stock du contaminât de type 2 à la fin de l'injection du batch i est égal au niveau de stock à la fin de l'injection du batch $i - 1$ plus la quantité du contaminât de type 2 transféré au dépôt j durant l'injection moins la quantité réinjecté dans le stock du produit *SCA*.

$$nvscont_{k,i} = nvscont_{p,i} + \sum_{h \in I, h \leq i} \sum_{p' \in P} contaminat_{h,p,p',i} - \alpha * \sum_{h \in I, h \leq i} vsq_{h,l,j,i} \quad (3.17.b)$$

$$\forall i \in I^{nouveau} \quad (i = 1^{er} \text{ nouveau batch}), p' \in P(p' = 1(GO)), l \in P(l = 2(SCA)),$$

$$j \in J, (j = |J|), k \in C(k=2)$$

Cette contrainte donne le niveau de stock du contaminât de type 2 à la fin de l'injection du premier nouveau batch.

$$nvscont_{k,i} \leq capcont_k \quad \forall k \in C, i \in I^{nouveau} \quad (3.18)$$

Pour chaque pompage, le niveau de stock du contaminât ne peut pas dépasser la capacité de stockage.

13. Contrainte sur le débit d'injection et le débit de réception :

$$N_{h,j,i} = x_{h,j,i} \quad \forall h \in I, i \in I^{nouveau}$$

$$(i = \text{le premier nouveau batch}), j \in J \quad (3.19.a)$$

$$\sum_{h \in I} N_{h,j,i} \leq 1 \quad \forall i \in I^{nouveau}, j \in J \quad (3.19.b)$$

$$N_{h,j,i} \geq x_{h,j,i} - \sum_{k \in I, k=1}^{h-1} x_{k,j,i} \quad \forall h \in I, i \in I^{\text{nouveau}}, j \in J \quad (3.19.c)$$

La variable de décision binaire $N_{h,j,i}$ indique si le dépôt j reçoit un volume durant l'injection du batch i ou non.

$$\sum_{p \in P} vp_{i,p} = Q_i \quad \forall i \in I^{\text{nouveau}} \quad (3.20)$$

$$vp_{i,p} \leq M * y_{i,p} \quad \forall i \in I^{\text{nouveau}}, p \in p' \quad (3.21)$$

Les deux contraintes précisent le type de produit injecté dans le batch i .

$$\frac{\sum_{p \in P} vp_{i,p}}{VR_{\max_p}} \leq L_i \leq \frac{\sum_{p \in P} vp_{i,p}}{VR_{\min_p}} \quad \forall i \in I^{\text{nouveau}} \quad (3.22)$$

Cette contrainte donne la durée d'injection du batch i qui contient le produit p .

$$\frac{\sum_{h \in I} vm_{h,j,i}}{VD_{\max_j}} \leq L_{i,j} \leq \frac{\sum_{h \in I} vm_{h,j,i}}{VD_{\min_j}} \quad \forall i \in I^{\text{nouveau}}, j \in J \quad (3.23)$$

Cette contrainte donne la durée de réception du produit p par le dépôt j durant l'injection de ce dernier.

$$L_{i,j} \leq L_i \leq \sum_{j \in J} L_{i,j} \quad \forall i \in I^{\text{nouveau}}, j \in J \quad (3.24.a)$$

$$L_{i,j} \leq L_{i,j'} + M * \left(2 - \sum_{h \in I} N_{h,j,i} - \sum_{h \in I} N_{h,j',i} \right) \quad i \in I^{\text{nouveau}}, j, j' \in J \quad (3.24.b)$$

$$L_i \leq \frac{L_{i,j}}{|J|} + M * \left(|J| - \sum_{j \in J} \sum_{h \in I} N_{h,j,i} \right) \quad i \in I^{\text{nouveau}}, j \in J \quad (3.24.c)$$

Ces trois contraintes assurent que la durée d'injection et la durée de réception de chaque dépôt actif durant l'injection du batch i sont égaux.



Pour la résolution de ce modèle mathématique nous avons choisi le logiciel Cplex qui permet de résoudre les problèmes d'optimisation linéaire en nombre entiers mixtes de grandes tailles, Cplex est capable de traiter des problèmes contenant plusieurs dizaines de milliers de variables et plusieurs centaines de milliers de contraintes.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté notre problématique qui consiste en la résolution d'un problème de transport dans l'oléoduc multi-produit pour le cas de l'ASR. Notons que nous nous sommes basé sur la programmation linéaire en variables mixtes pour la modélisation de notre problème. Ainsi, le modèle mathématique obtenu est présenté avec une explication détaillée des différentes contraintes. La résolution de ce problème est faite en utilisant le logiciel Cplex.



CHAPITRE 04

Simulation numérique et résultats



4.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer les performances de l'approche proposée dans notre travail d'optimisation. Pour ce faire, nous étudions trois scénarios sur un cas réel de la canalisation multi-produit ASR. Nous avons opté pour le mode de réception simultanée, ce dernier permet à plusieurs dépôts de faire la réception à la fois. Rappelons que notre objectif est de déterminer la séquence optimale pour chaque scénario, en minimisant le volume du contaminant, et différemment des travaux dans la littérature, nous avons introduit le processus de réinjection de contaminant à des proportions différentes, selon le type de ce dernier, 1 ou 2.

Nous avons fait appel au solveur CPLEX 12.2 pour la résolution de notre modèle.

4.2 Présentation de logiciel d'optimisation CPLEX

CPLEX (édité par la société ILOG) est un solveur de programmation linéaire, c'est-à-dire un logiciel permettant de résoudre des problèmes d'optimisation linéaire. Plusieurs types d'algorithmes de résolution sont disponibles, en particulier l'algorithme du simplexe et un algorithme de points intérieurs. [50]

Il existe deux manières d'utiliser CPLEX, la première consiste à travailler de manière interactive en invoquant un interpréteur de commande dédié et la seconde consiste à appeler directement les fonctionnalités du moteur depuis son propre code, que ce soit du C, du C++ ou du Java. [51]

4.2.1 Historique :

CPLEX a été initialement développé par l'équipe de *Robert Bixby* pour disposer d'un solveur performant pour résoudre des instances du problème de voyageur de commerce (TSP chez nos voisins d'outre-manche) de grande taille. Jusqu'à la version 6.0, il a été commercialisé par la société CPLEX. En 1996, cette société a été rachetée par ILOG pour étoffer son éventail de produits destinés à l'Aide à la Décision.

4.2.2 Les composants de CPLEX :

Les composants d'ILOG CPLEX sont illustrés dans la figure 4.1.

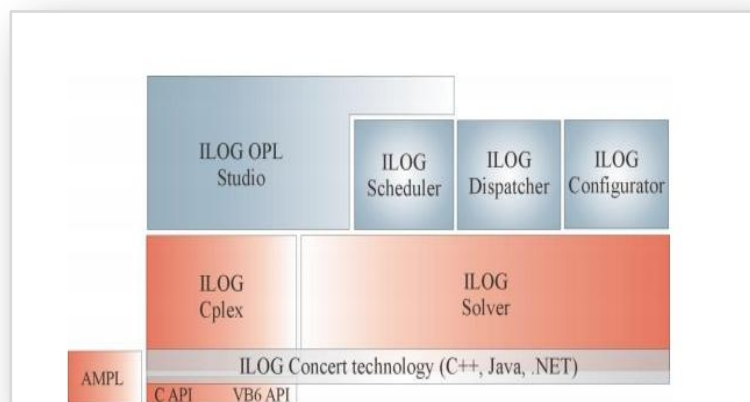


Fig. 4.1 Les composants du CPLEX

- **LOG CPLEX :**
Le cœur du système résout des problèmes de programmation mathématique.
- **ILOG Solver :**
La partie principale du système résout des applications en utilisant la Programmation par contraintes.
- **ILOG Concert Technology :**
Les bibliothèques contiennent les fonctionnalités du système. Elles sont disponibles pour les langages C++, Java et .NET.
- **ILOG Scheduler :**
Fournit des extensions pour résoudre des problèmes de planification.
- **WILOG Dispatcher :**
Fournit des extensions pour la résolution de problèmes de tournées de véhicules.
- **ILOG Configurator :**
Ce module contient des utilitaires pour l'optimisation des ventes en ligne (problèmes de e-commerce).
- **ILOG OPL Studio :**
OPL est un langage pour la modélisation des problèmes d'optimisation. Il interagit directement avec les modules ILOG Cplex, ILOG Solver et ILOG Dispatcher.
- **AMPL :**
C'est un autre langage pour la modélisation, qui interagit avec le module ILOG CPLEX (AMPL a été développé par les laboratoires Bell).
- **C et VB6 APIs :**
Ce sont des bibliothèques pour des utilisateurs du langage C et de l'environnement VB6. Elles permettent de les interfacer avec le module ILOG CPLEX.

4.2.3 Capacités de CPLEX :

Initialement, CPLEX est un solveur de programmes linéaires. A ce titre, il repose donc sur une implémentation performante du simplexe primal. Il dispose également du simplexe dual et du simplexe de réseau. Il peut aussi résoudre des programmes linéaires mixtes, en combinant le simplexe, le branch and bound et la génération de coupes. Depuis peu, il intègre également une technique à base de points intérieurs et peut traiter des problèmes quadratiques. Actuellement, CPLEX est un des solveurs les plus performants disponibles, sinon le plus performant. Il peut ainsi traiter des problèmes contenant plusieurs dizaines de milliers de variables et plusieurs centaines de milliers de contraintes. Pour les problèmes mixtes, la limite est sensiblement plus basse, mais elle dépend grandement du type de problèmes et du modèle appliqué.

Les problèmes traités par la suite d'optimisation ILOG sont : les programmes linéaires et linéaires mixtes, les programmes quadratiques et quadratiques mixtes, les programmes avec contraintes quadratiques et avec contraintes quadratiques mixtes.[51]

4.2.4 Exemple d'application traité par le solveur CPLEX :

Nous illustrons l'utilisation du Solveur CPLEX par un petit exemple, qui consiste à résoudre le problème (p) suivant :

$$(p) \begin{cases} \min f(x, y) \\ (x, y) \in H \end{cases}$$

Où : $f(x, y) = 1.12 * x + 0.15 * y$

$$H = \{(x, y) \in R^2 \mid \begin{cases} 60 * x + 60 * y \geq 300 \\ 12 * x + 6 * y \geq 36 \\ 10 * x + 30 * y \geq 90 \end{cases}\}$$

Les différentes étapes de résolution du problème (p) sous le solveur CPLEX sont comme suit :

- Créer un nouveau projet OPL dans **IBM ILOG CPLEX OPTIMIZATION STUDIO**

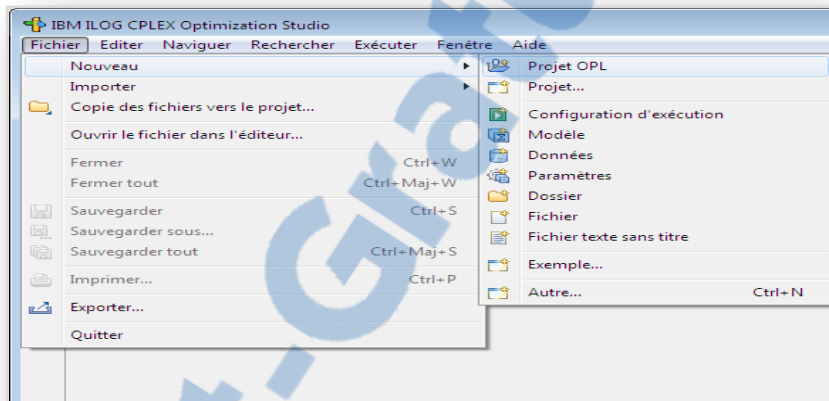


Fig.4.2 Création d'un nouveau projet OPL (1)

- Choisir la création d'un modèle et la création d'un fichier data, donc deux interfaces :
 - La première interface est celle du data, où les données sont introduites (les valeurs numériques des paramètres).
 - La deuxième interface est celle du model, où les paramètres les variables de décision, la fonction objectif et les contraintes sont introduites.

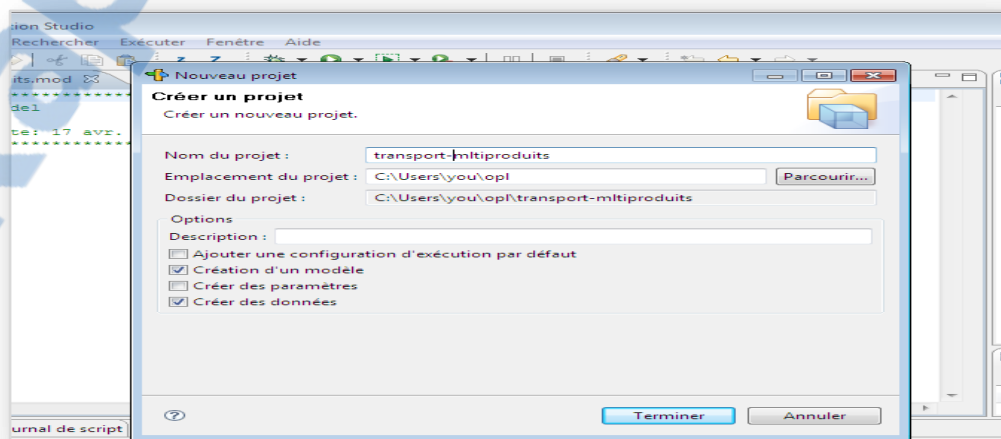


Fig.4.3 Création d'un nouveau projet OPL (2)

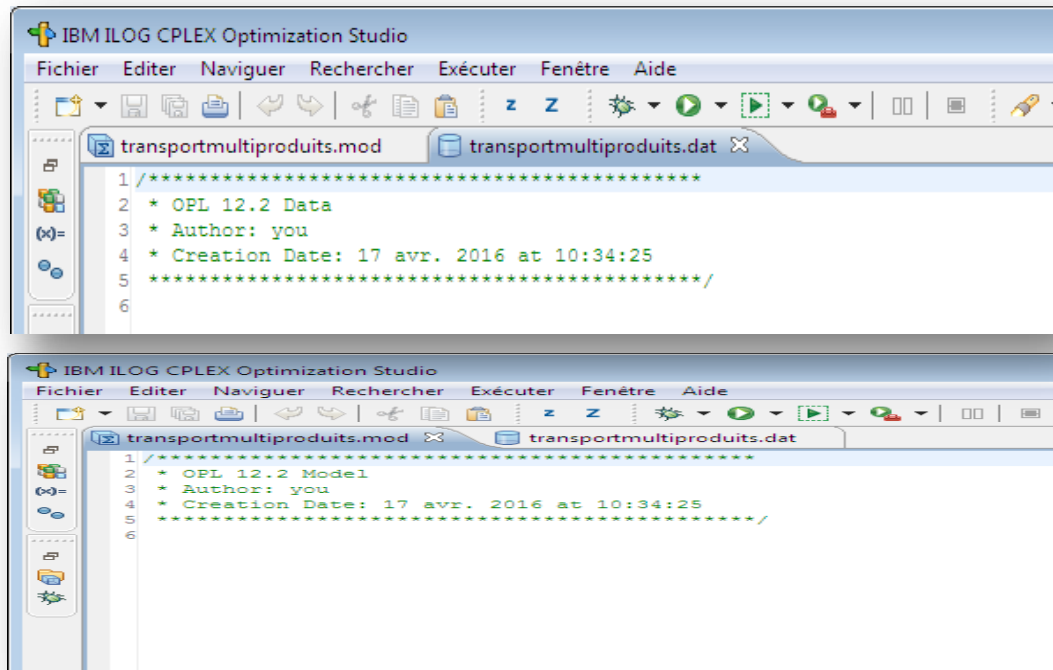


Fig. 4.4 L'interface de travail

Le modèle sur CPLEX du problème (p) est le suivant :

Les variables

dvar float x ;

dvar float y ;


minimize $1.12 * x + 0.15 * y$

subject to {

$60 * x + 60 * y \geq 300$;

$12 * x + 6 * y \geq 36$;

$10 * x + 30 * y \geq 90$; }

- Après l'établissement de programme et les données nécessaires, il est temps d'exécuter le modèle. Une nouvelle configuration d'exécution est choisie et puis toute de suite elle est exécutée à l'aide de l'icône .

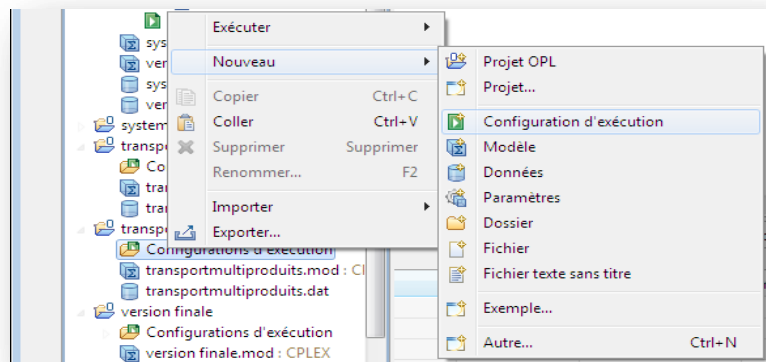


Fig. 4.5 L'exécution du modèle mathématique

- Après l'exécution de programme, on aura les résultats que montre la figure suivante

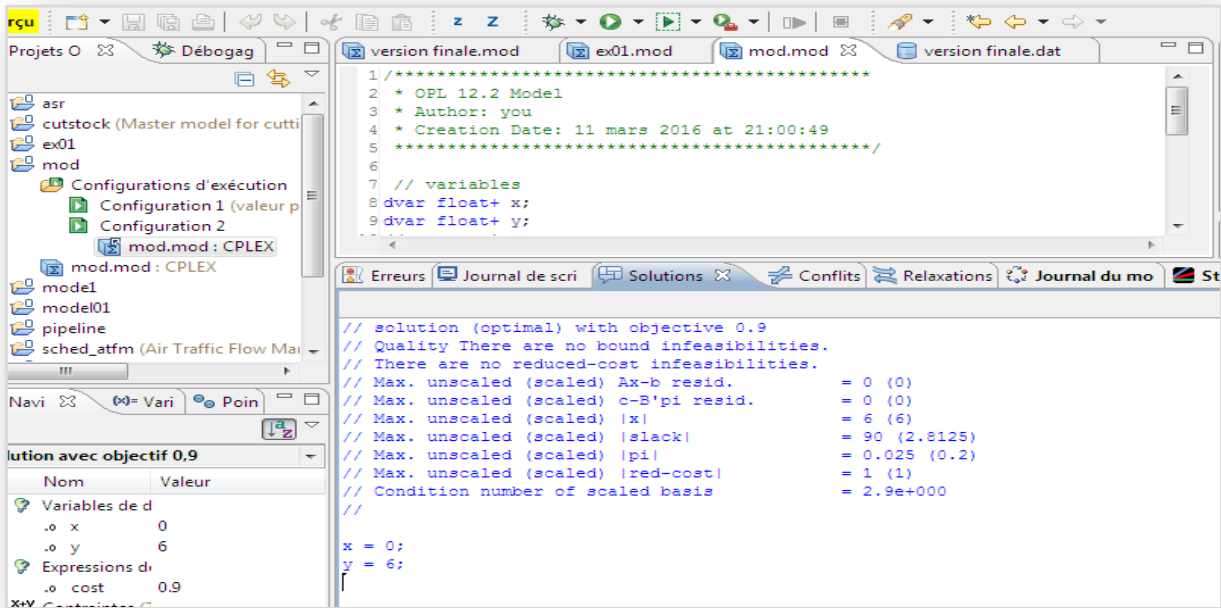


Fig.4.6 Les résultats obtenus par CPLEX

4.3 Les résultats numériques

L'approche proposée dans notre mémoire est adaptée sur le pipeline unidirectionnel (ASR) reliant la raffinerie d'Arzew aux centres de stockage et de distribution de Sidi-Bel-Abbès (dépôt 1) et de Remchi (dépôt 2).

Le pipeline ASR transporte quatre produits pétroliers :

1. P1 : Gasoil,
2. P2 : Essence Super (Appelé aussi Super Carburant),
3. P3 : Essence Normal
4. P4 : Essence sans plomb.

L'horizon d'optimisation est choisi sur une décade (10 jours). Les paramètres et les données utilisées dans le modèle d'optimisation sont récapitulés dans les tableaux 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4 :

Produit	Demande journalière [m^3]	
	Dépôt 1 (Sidi Bel Abbès)	Dépôt 2 (Remchi)
Gasoil (GO)	1 200	3000
Essence Super (SCA)	400	800
Essence Normale (CA)	80	150
Essence Sans plomb (SP)		150

Tableau 4.1 Demandes journalières par dépôt



Produit	Dépôt 1			Dépôt 2		
	Capacité [m ³]	Stock initial[m ³]	Stock de sécurité[m ³]	Capacité [m ³]	Stock initial[m ³]	Stock de sécurité[m ³]
Gasoil (GO)	6000	814	1200	22000	5572,4	4400
Essence Super (SCA)	1700	809	340	9500	3394,6	1900
Essence Normale(CA)	450	196	90	1000	996	200
Essence Sans plomb (SP)				5000	3284,7	1000
Contaminât (Type 1)				500	396,5	
Contaminât (Type 2)				500	405	

Tableau 4.2 La capacité et le volume initial des produits et du contaminât par dépôt avec le stock de sécurité

	GO	SCA	CA	SP
GO		28	30	
SCA	28			0
CA	30			
SP	30			

Tableau 4.3 Volume moyen du contaminât qui résulte entre deux produits différents et les séquences interdites

Volume (Raffinerie-dépôt 1) [m ³]	Volume (Raffinerie-dépôt 2) [m ³]
6200	10 100

Tableau 4.4 Localisation des dépôts en volume par rapport à la raffinerie

A l'état initial ($t = 0$), le pipeline contient deux batchs, le premier est de l'essence super et le deuxième est le gasoil.

Le tableau 4.5 résume les conditions initiales des anciens batchs qui sont dans le pipeline à l'instant($t = 0$), c'est-à-dire le volume des deux batchs *SCA* et *GO*, ainsi que la localisation de ses derniers tenant compte le volume entre la raffinerie et la borne supérieure du batch.

Batch	Contenance du pipeline à l'état initial	
	Volume[m ³]	Localisation[m ³]
Batch 01 (SCA)	520	10100
Batch 02 (GO)	9580	9580

Tableau 4.5 Les conditions initiales des anciens batches avec ses localisations en volume

4.3.1 Les scénarios d'étude:

Dans notre cas d'étude nous considérons que les deux dépôts peuvent faire la réception à la fois.

Les débits, d'injection et de réception de chaque dépôt varie comme suit :

- ✓ La raffinerie : $220 \div 300 (m^3/h)$
- ✓ Dépôt 1 : $70 \div 100 (m^3/h)$
- ✓ Dépôt 1 : $150 \div 220 (m^3/h)$

Selon trois scénarios, différenciés par des taux de réinjection de contaminât, tels que :

- ✓ **Scénario 01** : Taux de réinjection de contaminât $\alpha = 1/1000$
- ✓ **Scénario 01** : Taux de réinjection $\alpha = 5/1000$
- ✓ **Scénario 01** : Taux de réinjection $\alpha = 10/1000$

4.3.1.1 Les solutions obtenues pour un taux de réinjection $\alpha = 1/1000$

La fonction objective : $228 m^3$

Le tableau 4.6 résume la séquence optimale donnée par la variable de décision ($y_{i,p}$), ainsi que le volume de chaque batch qu'on doit injecter le long de la décade.

N° du batch	Volume du batch [m ³]			
	GO	SCA	CA	SP
Batch 1	0	5215	0	0
Batch 2	13909	0	0	0
Batch 3	0	0	1568.5	0
Batch 4	5061.2	0	0	0
Batch 5	0	10000	0	0
Batch 6	15000	0	0	0
Batch 7	0	5280	0	0
Batch 8	0	0	0	2554.8

Tableau .4.6 Le volume des nouveaux batches ($\alpha = 1/1000$)

Le tableau 4.6 montre que chaque batch contient un et un seul produit. Le volume du batch représente la quantité du produit qui doit être injectée à partir de la raffinerie dans une période de 10 jours, afin d'assurer une autonomie de stock projetée à 20%, satisfaire les demandes des clients, et minimiser au maximum le contaminât.

Le programme décadaire est composé de huit (08) batchs pour répondre aux attentes précitées, d'où la séquence optimale :

$$SCA^{(1)} - GO^{(2)} - CA^{(3)} - GO^{(4)} - SCA^{(5)} - GO^{(6)} - SCA^{(7)} - SP^{(8)}.$$

Le tableau 4.7 donne le niveau de stock des différents produits dans le dépôt 1 à la fin de chaque opération de pompage, c'est-à-dire à la fin de l'injection d'un nouveau batch, et cela après le mouvement des produits (Entrées et Sorties des produits durant l'injection de ce batch).

Batch	GO		SCA		CA	
	Volume [m^3]	%	Volume [m^3]	%	Volume [m^3]	%
Initial	814	13,6	809	47,6	196	43,6
Batch 1	1273,3	21,2	409	24,1	116	25,8
Batch 2	1855,9	30,9	1700	100	116	25,8
Batch 3	1200	20	1600	94,1	90	20
Batch 4	1928,3	32,1	1600	94,1	290,65	64,6
Batch 5	2430,8	40,5	800	47,1	410	91,1
Batch 6	3000	50	1142,7	67,2	205	45,6
Batch 7	2400	40	1085,4	63,8	170	37,8
Batch 8	1200	20	685,36	40,3	90	20

Tableau .4.7 Niveau de stock des produits du dépôt 1 à chaque injection du nouveau bath ($\alpha = 1/1000$)

On remarque que le stock au niveau du dépôt 1 durant toutes les opérations de pompage est supérieur ou égale à 20% (l'autonomie de stock choisie comme indicateur de seuil minimal d'optimisation).

Le tableau 4.8 représente le niveau du stock de chaque produit au niveau du dépôt 2 à la fin d'injection d'un nouveau batch.

Batch	GO		SCA		CA		SP	
	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%
Initial	5572,4	25,3	3394,6	35,7	996	99,6	3284,7	65,7
Batch 1	5597,2	25,4	3101,1	32,6	905,55	90,6	3131,7	62,6
Batch 2	5915,3	26,9	5900	62	905,55	90,6	2684,7	53,7
Batch 3	6940,7	31,5	5900	62	905,55	90,6	2684,7	53,7
Batch 4	7233,5	32,9	3500	36,8	455,55	45,6	2684,7	53,7
Batch 5	7153,1	32,5	1900	20	1000	100	2684,7	53,7
Batch 6	4400	20	9500	100	550	55	2384,7	47,7
Batch 7	4842,6	22	7995,1	84,2	550	55	1934,7	38,7
Batch 8	4400	20	7195,1	75,7	400	40	1784,7	35,7

Tableau .4.8 Niveau de stock des produits du dépôt 2 après chaque injection du nouveau bath ($\alpha = 1/1000$)

Nous remarquons qu'à chaque nouvelle injection du batch, le niveau du stock au niveau du dépôt 2 est toujours supérieur ou égale à 20%.

Le tableau 4.9 récapitule l'évolution du stock des deux types de contaminât à la fin de l'injection de chaque nouveau batch dans le dépôt 2.

Batch	Contaminât Type 1		Contaminât Type 2	
	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%
Initial	396.5	79.3	405	81
Batch 1	393,48	78,7	432,5	86,5
Batch 2	415,25	83,1	429,7	86
Batch 3	414,23	82,1	429,7	86
Batch 4	410,85	82,2	429,7	86
Batch 5	434,94	87	459,7	92
Batch 6	461,54	92,3	451,2	90,2
Batch 7	456,26	91,3	451,2	30,2
Batch 8	453,7	90,7	451,2	90,2

Tableau 4.9 Niveau de stock du contaminât du dépôt2 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 1/1000$)

La figure 4.7 schématise un planning décadaire, illustrant le mouvement des produits (Injection des batches, Entrées & Sorties des produits au niveau des dépôts) avec les différents débits d'injection et de réception.

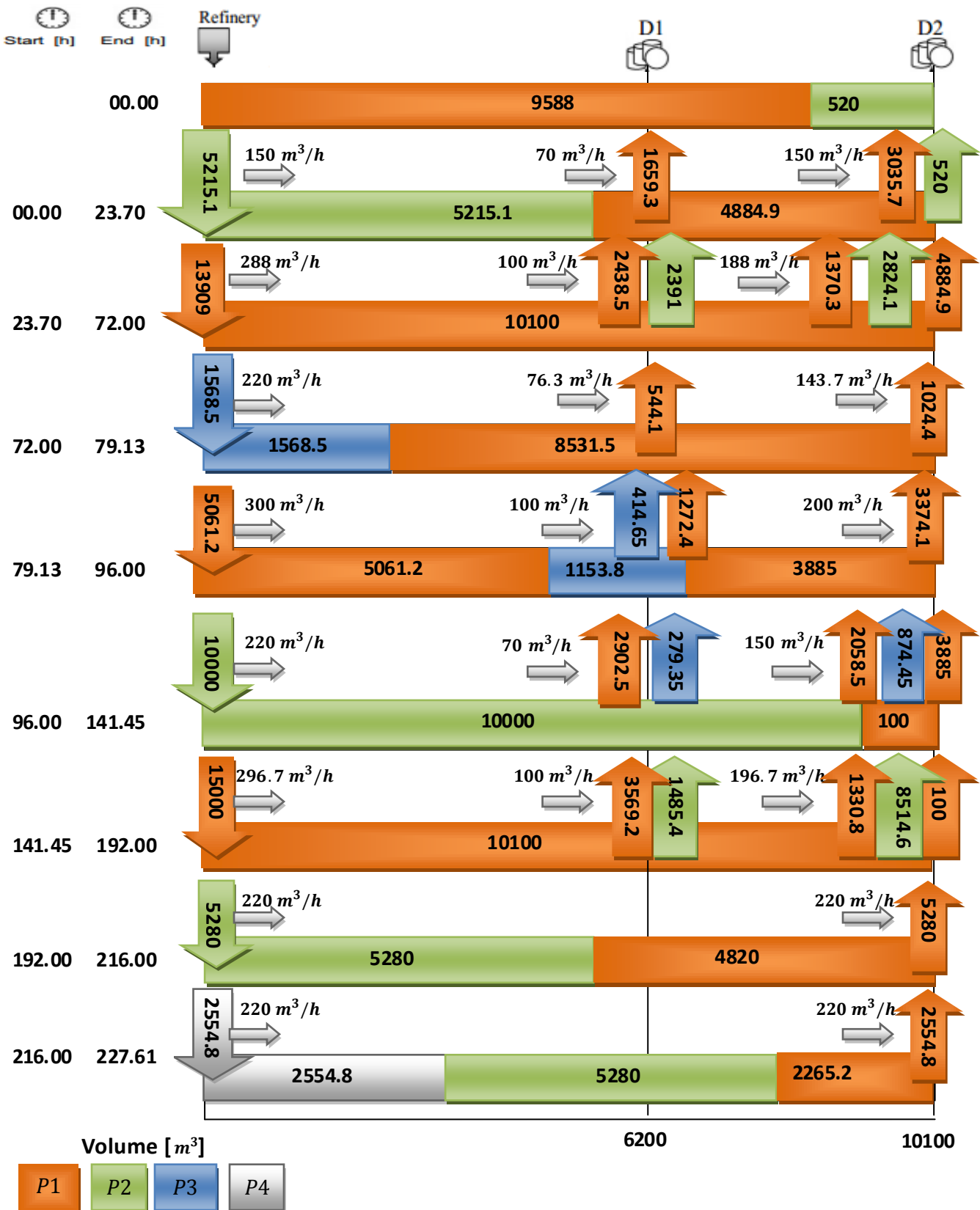


Fig.4.7 Planning optimal de transport multi-produit avec un taux de réinjection $\alpha = 1/1000$

La première opération de pompage commence par l'injection du batch 1(SCA) avec une quantité de 5215.1 m³. Cette opération débute à l'instant 0 et prend fin après 23h 42mn :

Le dépôt 1 reçoit $1659.3 m^3$ du *GO* à partir de l'ancien batch 2, or que le dépôt 2 reçoit $520m^3$ du *SCA* à partir de l'ancien batch 1, et $3035.7 m^3$ du *GO* à partir d'ancien batch 2. A la fin de l'opération de l'injection du batch 1, la contenance de la canalisation est : $5215.1m^3$ en *SCA* du nouveau batch 1 et $4884.9 GO$ de l'ancien batch 2.

Les autres opérations se poursuivent de la même façon.

4.3.1.2 Les solutions obtenues pour un taux d'injection $\alpha = 5/1000$

N° du batch	Volume du batch [m^3]			
	<i>GO</i>	<i>SCA</i>	<i>CA</i>	<i>SP</i>
Batch 1	0	5280	0	0
Batch 2	13640	0	0	0
Batch 3	0	0	1368.5	0
Batch 4	5333,9	0	0	0
Batch 5	0	10000	0	0
Batch 6	14716	0	0	0
Batch 7	0	5000,3	0	0
Batch 8	0	0	0	3000

Tableau .4.10 Le volume des nouveaux batchs ($\alpha = 5/1000$)

Batch	<i>GO</i>		<i>SCA</i>		<i>CA</i>	
	Volume [m^3]	%	Volume [m^3]	%	Volume [m^3]	%
Initial	814	13.6	809	47.6	196	43.6
Batch 1	1294	21,6	409	24,1	116	25,8
Batch 2	2424	40,4	770	45,3	90	20,0
Batch 3	1794,2	29,9	385	22,6	90	20,0
Batch 4	3084,8	51,4	340	20,0	363,38	80,8
Batch 5	2400	40,0	800	47,1	410	91,1
Batch 6	2399,7	40,0	1200	70,6	205	45,6
Batch 7	1200,3	20,0	1200	70,6	170	37,8
Batch 8	1200	20,0	800	47,1	90	20,0

Tableau .4.11 Niveau de stock des produits du dépôt 1 à chaque injection du nouveau bath ($\alpha = 5/1000$)

Batch	GO		SCA		CA		SP	
	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%
Initial	5572,4	25,3	3394,6	35,7	996	99,6	3284,7	65,7
Batch 1	5653,7	25,7	3101,1	32,6	905,55	90,6	3131,7	62,6
Batch 2	5241,9	23,8	7244,7	76,3	905,55	90,6	2684,7	53,7
Batch 3	6940,7	31,5	7244,7	76,3	905,55	90,6	2684,7	53,7
Batch 4	5855,7	26,6	4844,7	51,0	455,55	45,6	2684,7	53,7
Batch 5	6000	27,3	3244,7	34,2	800	80,0	2684,7	53,7
Batch 6	4783,2	21,7	7992,3	84,1	400	40,0	2384,7	47,7
Batch 7	5590,7	25,4	7992,3	84,1	350	35,0	1934,7	38,7
Batch 8	4400	20,0	7195,1	75,7	200	20,0	1784,7	35,7

Tableau 4.12 Niveau de stock des produits du dépôt 2 à chaque injection du nouveau bath ($\alpha = 5/1000$)

Batch	Contaminât Type 1		Contaminât Type 2	
	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%
Initial	396,5	79,3	405	81
Batch 1	381,1	76,2	430,5	86,1
Batch 2	385,0	77,0	409,9	82,0
Batch 3	381,0	76,2	437,9	87,6
Batch 4	363,2	72,6	437,9	87,6
Batch 5	362,5	72,5	467,9	93,6
Batch 6	372,6	74,5	432,3	86,5
Batch 7	347,6	69,5	432,3	86,5
Batch 8	338,6	67,7	432,3	86,5

Tableau 4.13 Niveau de stock du contaminât du dépôt 2 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 5/1000$)

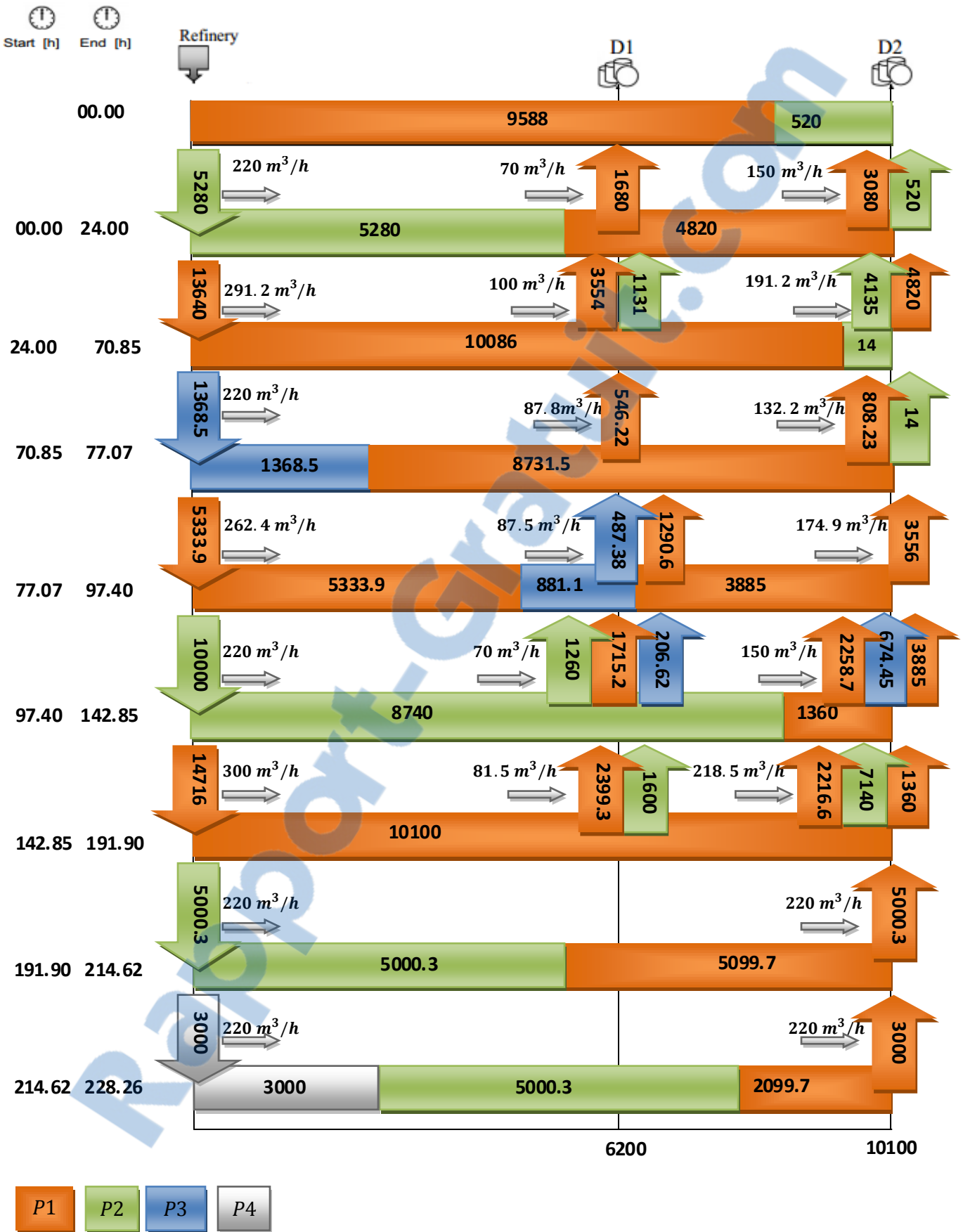


Fig.4.8 Planning optimal de transport multi-produit avec un taux de réinjection $\alpha = 5/1000$

4.3.1.3 Les solutions obtenues pour un taux d'injection $\alpha = 10/1000$

N° du batch	Volume du batch [m^3]			
	<i>GO</i>	<i>SCA</i>	<i>CA</i>	<i>SP</i>
Batch 1	0	4984,6	0	0
Batch 2	13829	0	0	0
Batch 3	0	0	1368,5	0
Batch 4	5333,9	0	0	0
Batch 5	0	10000	0	0
Batch 6	15000	0	0	0
Batch 7	0	4542,8	0	0
Batch 8	0	0	0	3000

Tableau4.14 Le volume des nouveaux batchs($\alpha = 10/1000$)

Batch	<i>GO</i>		<i>SCA</i>		<i>CA</i>	
	Volume [m^3]	%	Volume [m^3]	%	Volume [m^3]	%
Initial	814	13,6	809	47,6	196	43,6
Batch 1	1200	20	409	24,1	116	25,8
Batch 2	4517,5	75,3	800	47,1	90	20
Batch 3	4908,4	81,8	400	23,5	90	20
Batch 4	3174,2	52,9	400	23,5	214	47,6
Batch 5	2400	40	800	47,1	410	91,1
Batch 6	4800	80	921,1	54,2	340	75,6
Batch 7	2400	40	642,17	37,8	170	37,8
Batch 8	1200	20	400	23,5	90	20

Tableau4.15 Niveau de stock des produits du dépôt 1 à chaque injection du nouveau batch($\alpha = 10/1000$)

Batch	GO		SCA		CA		SP	
	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%
Initial	5572,4	25,3	3394,6	35,7	996	99,6	3284,7	65,7
Batch 1	5465,6	24,8	3105,7	32,7	905,55	90,6	3134,7	62,7
Batch 2	7841	35,6	4508,9	47,5	905,55	90,6	3134,7	62,7
Batch 3	4400	20	4508,9	47,5	455,555	45,6	2684,7	53,7
Batch 4	6168,6	28	4508,9	47,5	455,55	45,6	2684,7	53,7
Batch 5	6343,5	28,8	2908,9	30,6	800	80,0	2384,7	47,7
Batch 6	4470,6	20,3	9500	100	400	40,0	1934,7	38,7
Batch 7	4529,6	20,6	8316	87,5	350	35,0	1934,7	38,7
Batch 8	4400	20,0	7516	79,1	200	20,0	1784,7	35,7

Tableau4.16 Niveau de stock des produits du dépôt 2 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 10/1000$)

Batch	Contaminât Type 1		Contaminât Type 2	
	Volume [m ³]	%	Volume [m ³]	%
Initial	396.5	79.3	405	81
Batch 1	367,9	73,6	427,9	85,6
Batch 2	344,8	69,0	390,3	78,1
Batch 3	335,3	67,1	418,3	83,7
Batch 4	299,8	60,0	418,3	83,7
Batch 5	268,7	53,7	448,3	89,7
Batch 6	270,9	54,2	371,0	74,2
Batch 7	225,5	45,1	371,0	74,2
Batch 8	197,1	39,4	371,0	74,2

Tableau 4.17 Niveau de stock du contaminât du dépôt 2 à chaque injection du nouveau batch ($\alpha = 10/1000$)

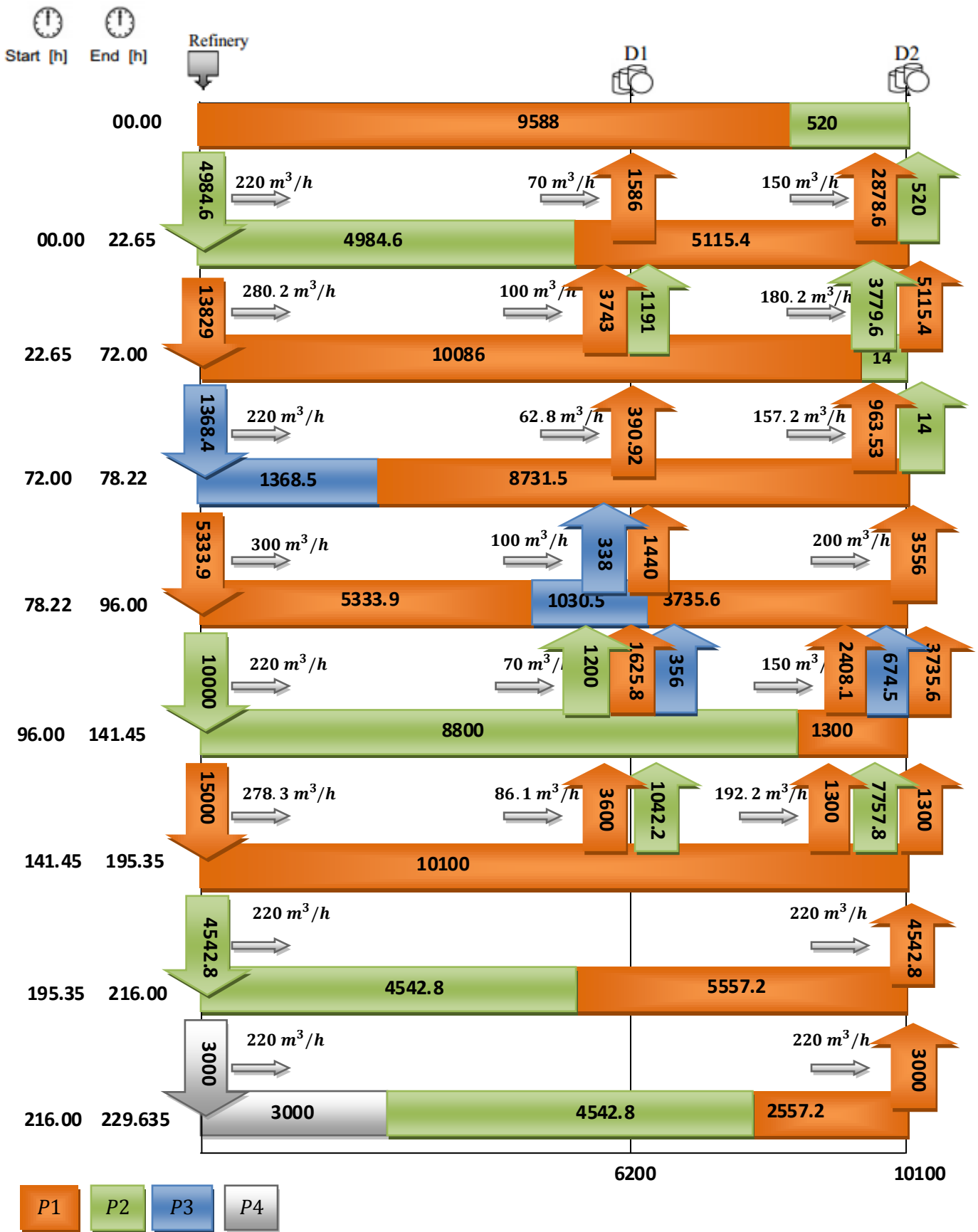


Fig.4.9 Planning optimal de transport multi-produit avec un taux de réinjection ($\alpha = 10/1000$)

4.3.2 Interprétation générale des trois scénarios :

- La figure 4.10 illustre le résultat de simulation type affiché par le solveur Cplex. La simulation est exécutée sur une unité Intel(R) Core (TM) i7 – 3770 de CPU 3.40 GHZ :

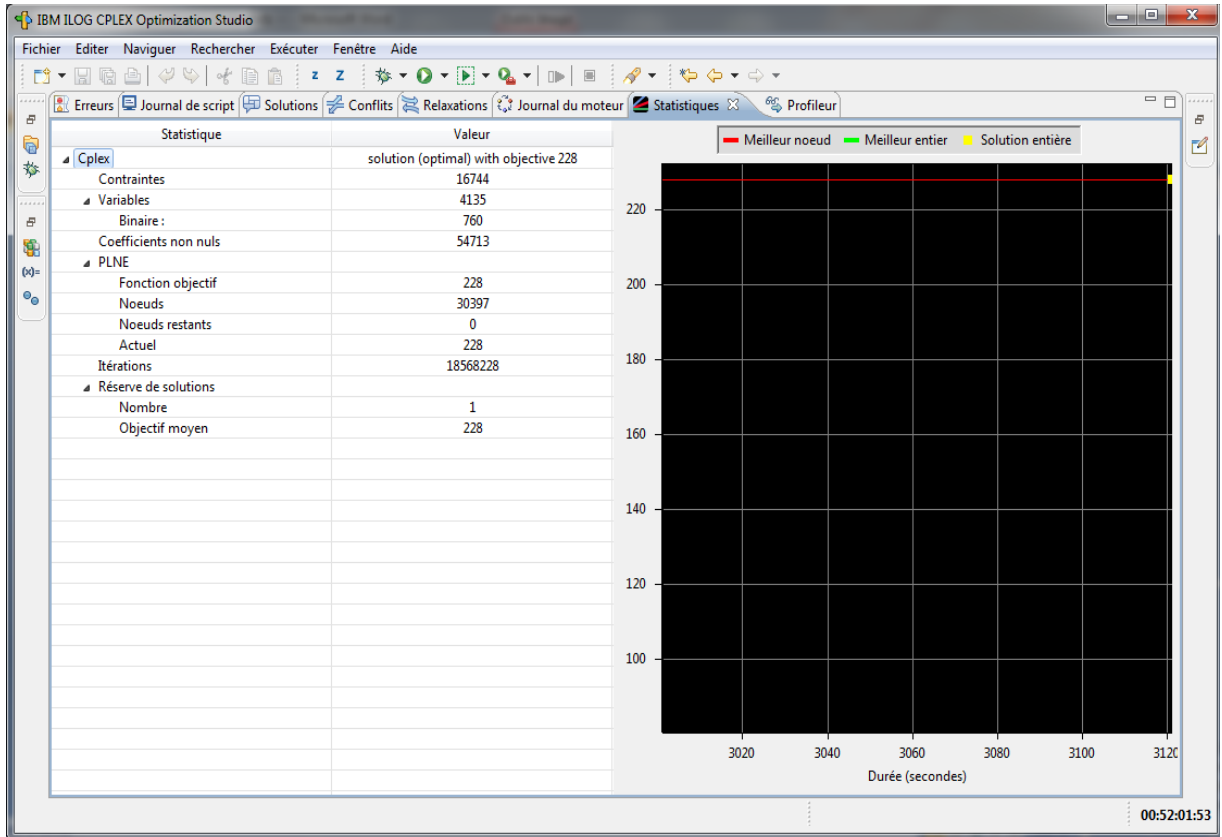


Fig.4.10 La solution optimale affichée par Cplex

Les différents paramètres de simulation sont regroupés dans le tableau 4.18

	Variables de décision		Contraintes	Temps (CPU)	Fonction objectif
	Binaires	Continue			
Scénario 1	760	3375	16744	3121 s	228
Scénario 2	760	3375	16744	3012 s	228
Scénario 3	760	3375	16744	2922 s	228

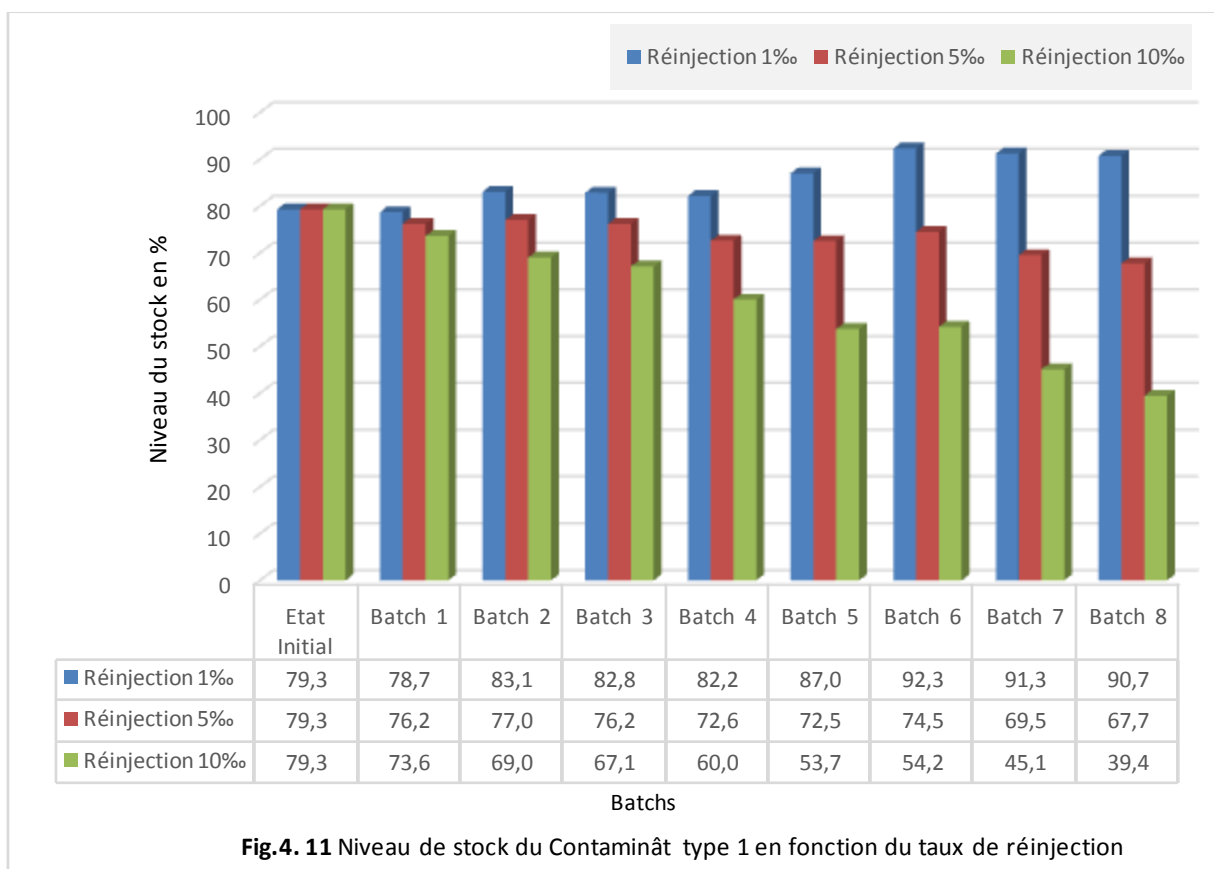
Tableau 4.18 Paramètres de simulation

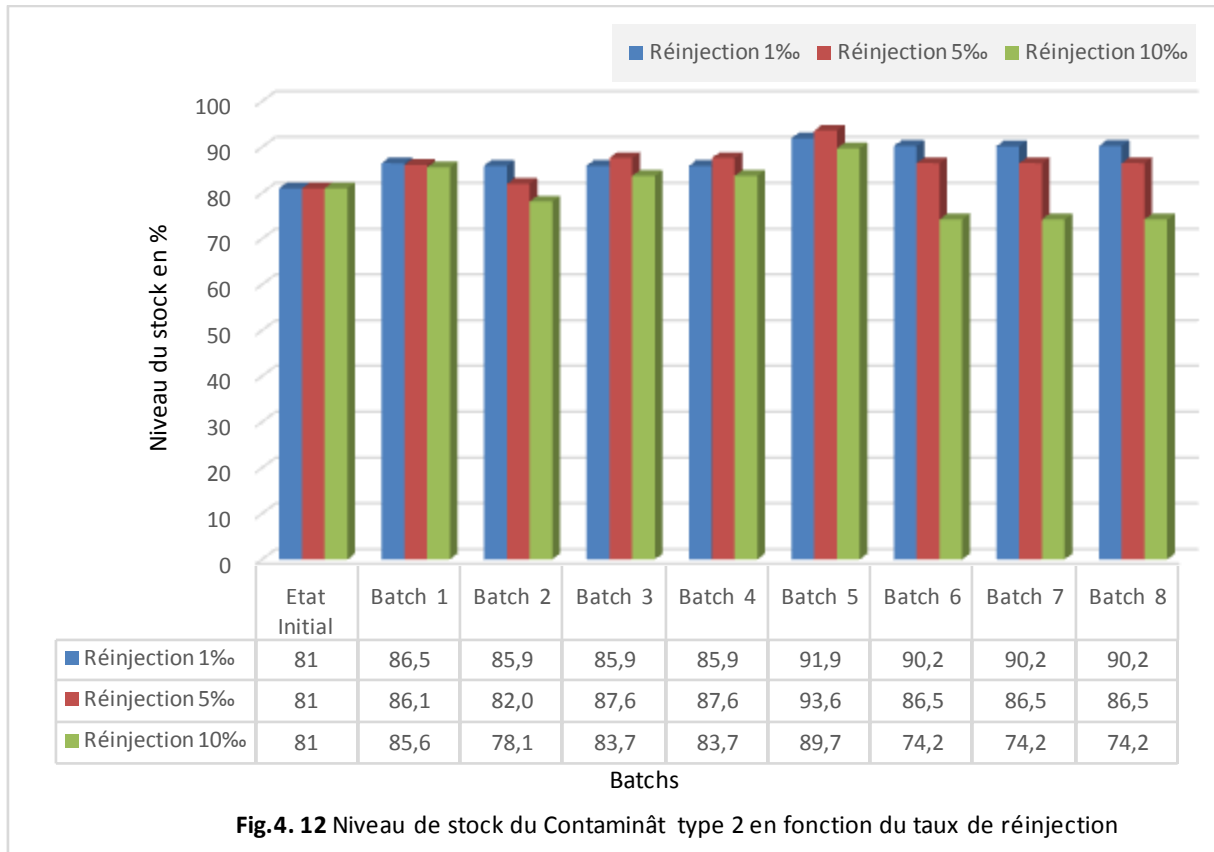
- Pour les trois scénarios, le planning optimal est réalisé avec les séquences de pompage représentées par les figures 4.7, 4.8, 4.9 à des taux d'injection respectifs 1/1000, 5/1000 et 10/1000 qui seront exécutés sur une décade.

Pour chaque scénario, nous avons enregistré six (06) opérations (injection du nouveau batch) dont la réception se fait simultanément dans les deux dépôts, et deux opérations correspondant aux derniers batchs 7 (SCA) et 8 (SP) dont la réception se fait d'une façon unique.

Il est bien remarqué que le Gasoil (Produit P1) et le Super Carburant (Produit 2) sont injectés avec des grandes quantités, car ces deux derniers représentent 93% de la demande totale de la région de tous les produits confondus.

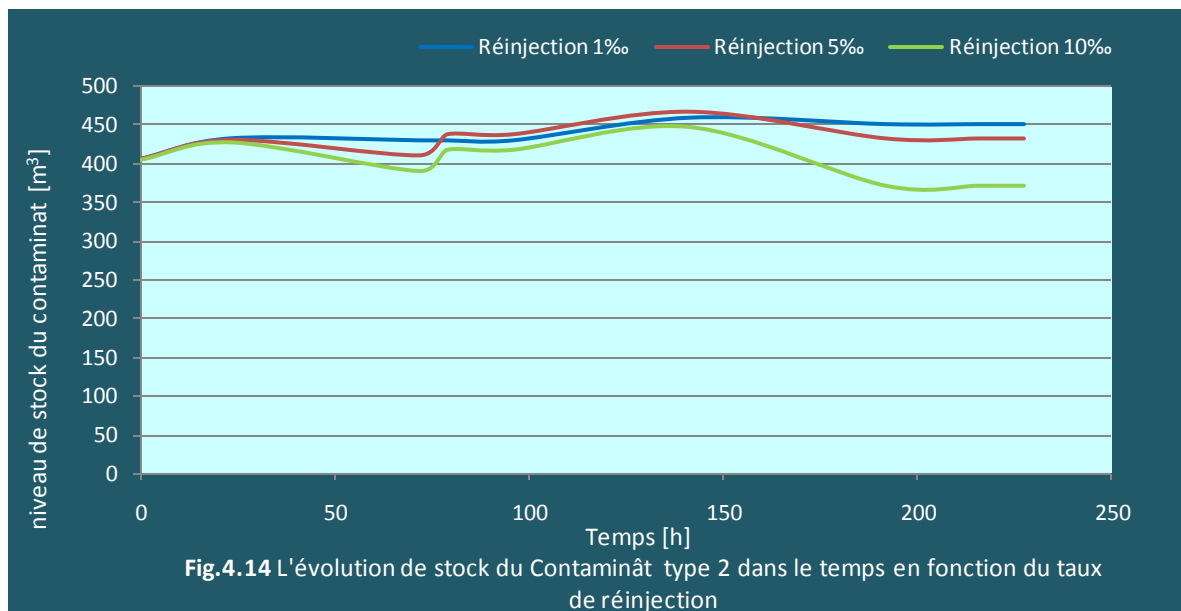
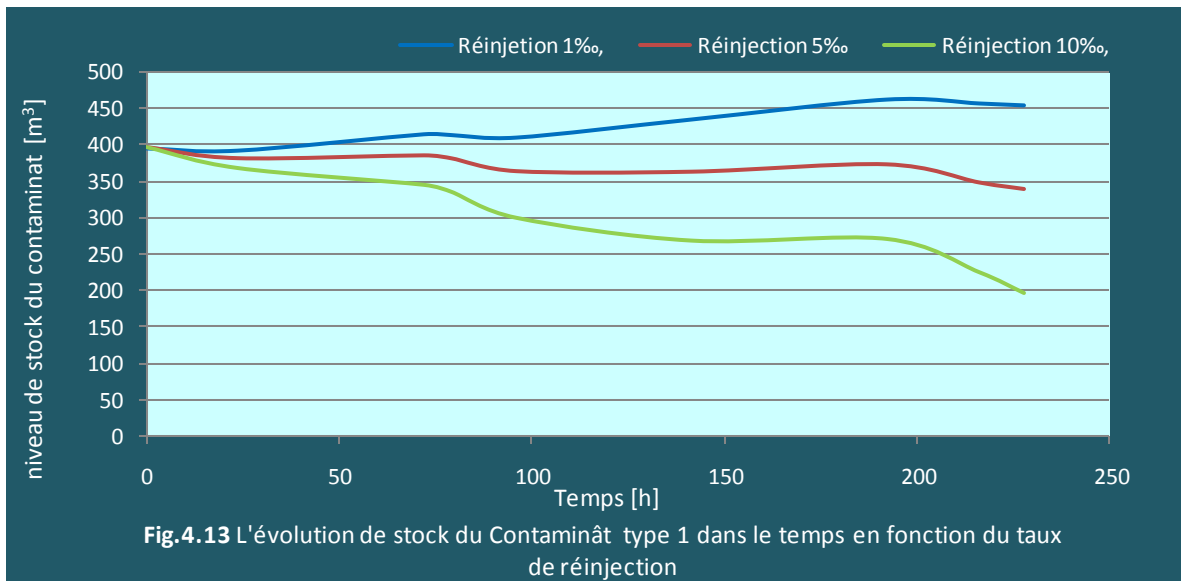
- Les figures 4.11 et 4.12, représentent l'évolution du stock des contaminâts type 1 et type 2. La décade est débutée avec un niveau du stock de 80% pour les deux types de contaminât et nous avons relevé à la fin de la décade des niveaux de stock de 90.7%, 86.5% et 39.4% à des taux de réinjection respectifs de 1‰, 5‰ et 10‰ pour le contaminât du type 1, et des niveaux de stock de 90.2%, 86.5% et 74.2% à des taux de réinjection respectifs de 1‰, 5‰ et 10‰ pour le contaminât du type 2.





A la fin de la décade, nous remarquons qu'avec les conditions actuelles de pompage (Débits) les niveaux de stock des réservoirs de contaminât s'élèvent à 90% pour un taux de réinjection de 1‰ et à 86% pour un taux de réinjection de 5‰, contrairement au taux de réinjection de 10‰ qui a baissé les niveaux de 40.6% ($230m^3$ équivalent volume) pour le contaminât type 1 et 5.8% ($29m^3$ équivalent volume) pour le contaminât type 2.

Les figures 4.13 et 4.14, représentent ainsi les profils d'évolution des contaminâts type 1 et type 2 le long des séquences de pompage de la décade.

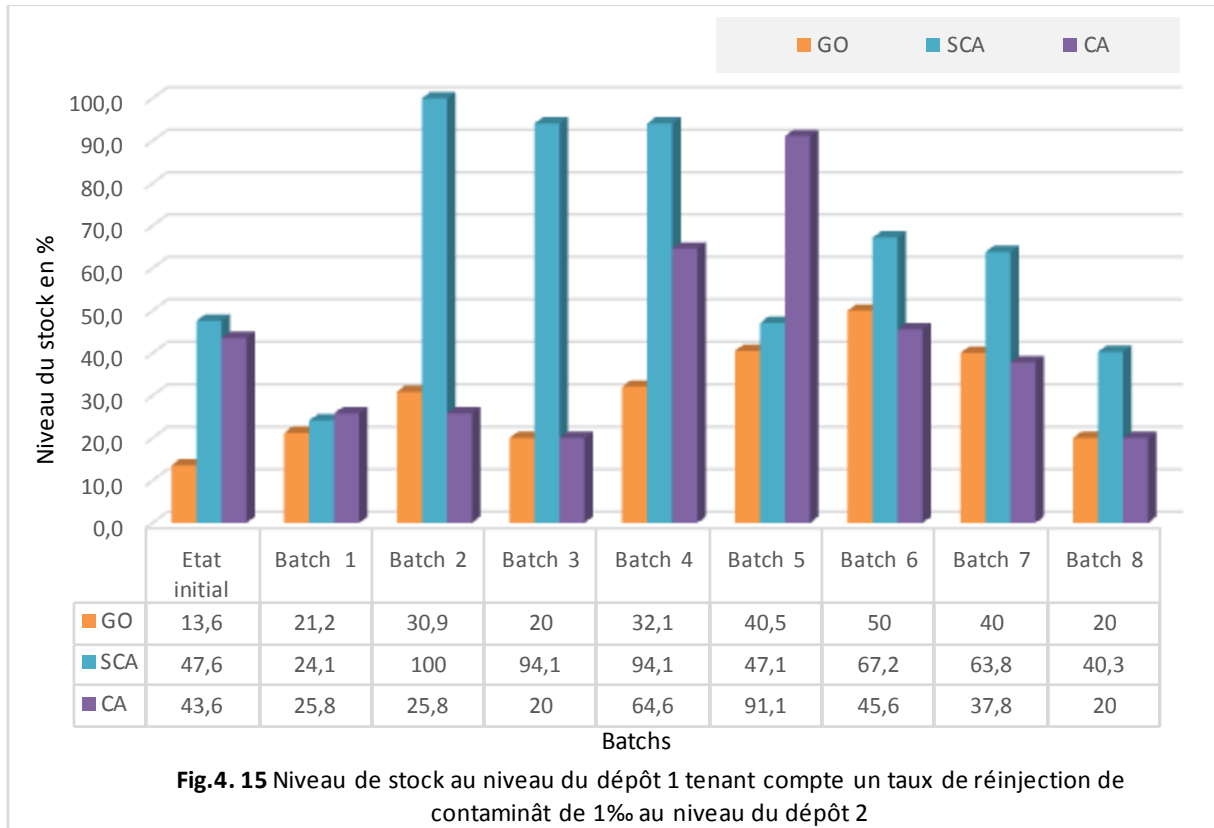


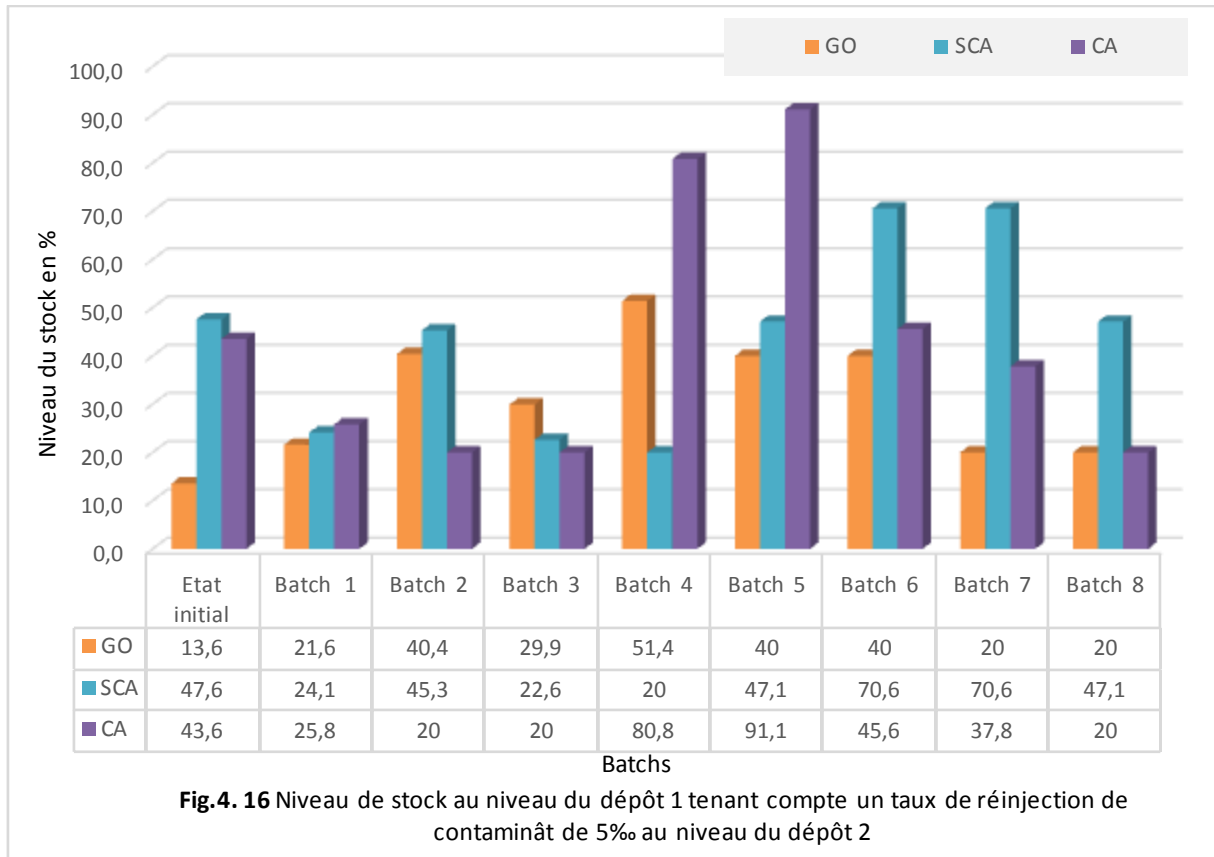
La réinjection de contaminât se fait dans les produits de *GO* et *SCA*, donc si le dépôt 1 est approvisionné de plus de *GO* et *SCA*, le niveau de contaminât est diminué avec un pourcentage remarquable. Mais toutefois, la sortie du *SCA* est beaucoup moins importante que le *GO*, ce qui réduit la demande et rend la réinjection dans le *SCA* limitée.

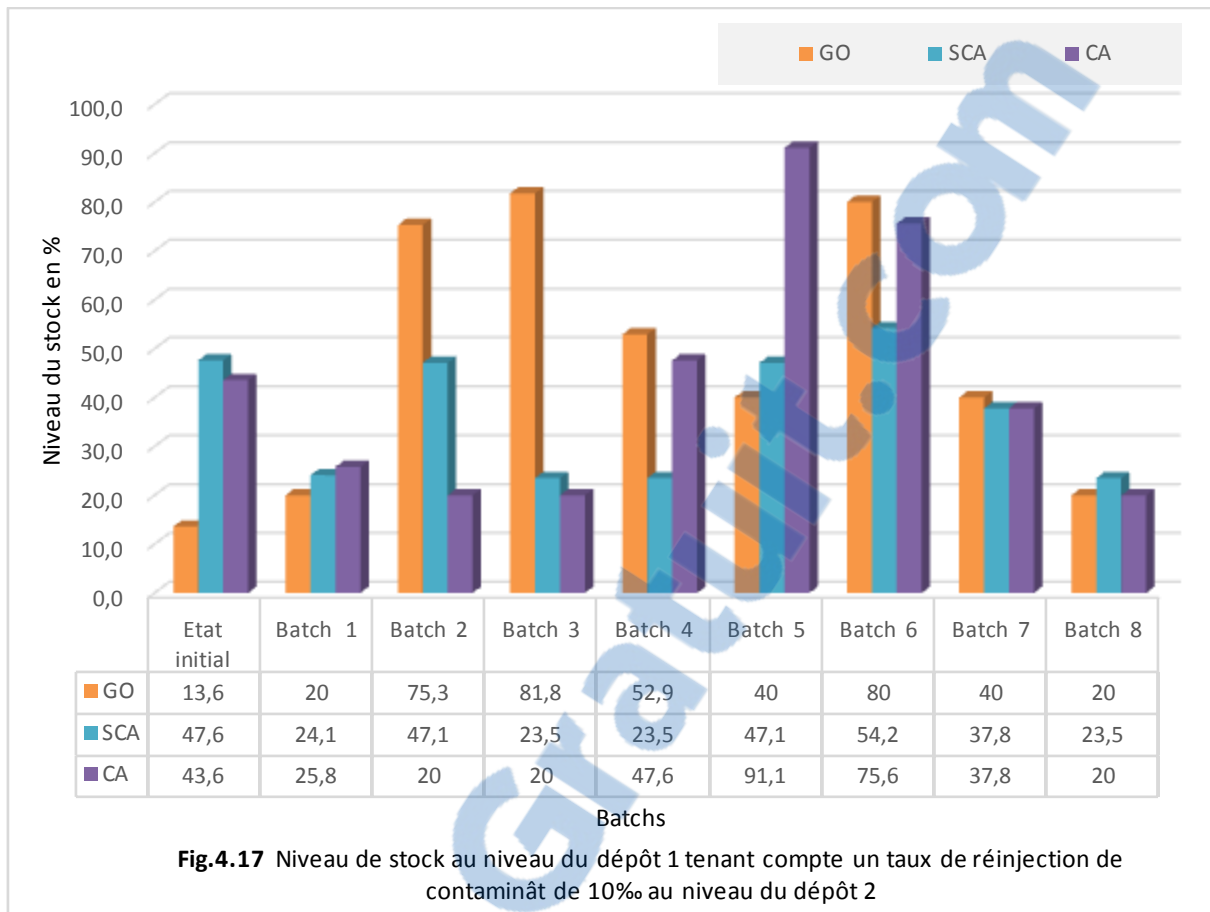
- Les figures 4.15, 4.16 et 4.17 montrent les niveaux du stock des trois produits (*GO*, *SCA* et *CA*) à chaque introduction du nouveau batch et à la fin de la décade.

A la fin de la décade et pour les trois taux d'injection, les séquences optimisées de transfert ont répondu positivement et nous avons enregistré un niveau de stock supérieur ou égal à 20%.

Nous avons bien remarqué que les réinjection au niveau du dépôt 2 ont influencé le niveau de stock du dépôt 1e long de la décade et plus particulièrement le stock du produit SCA à la fin de la décade.

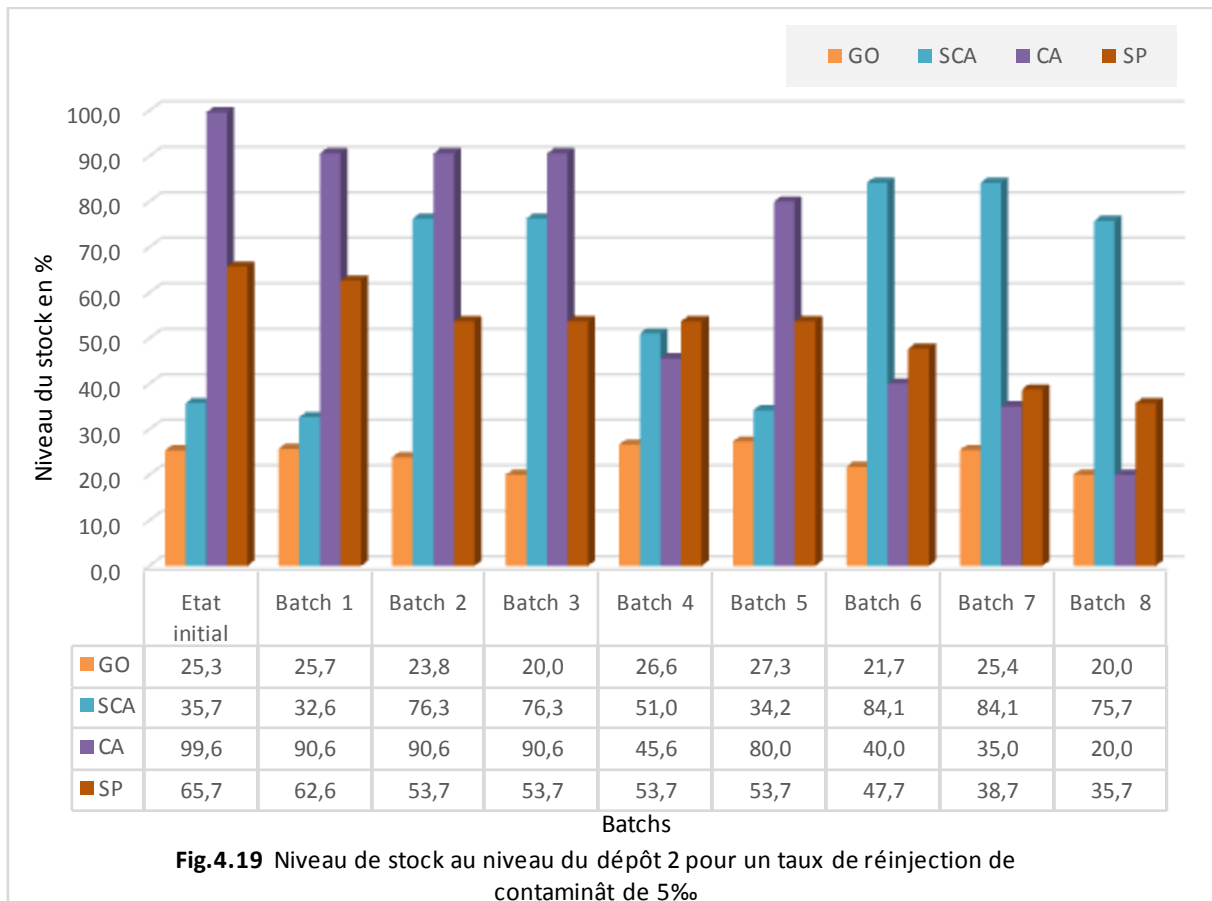
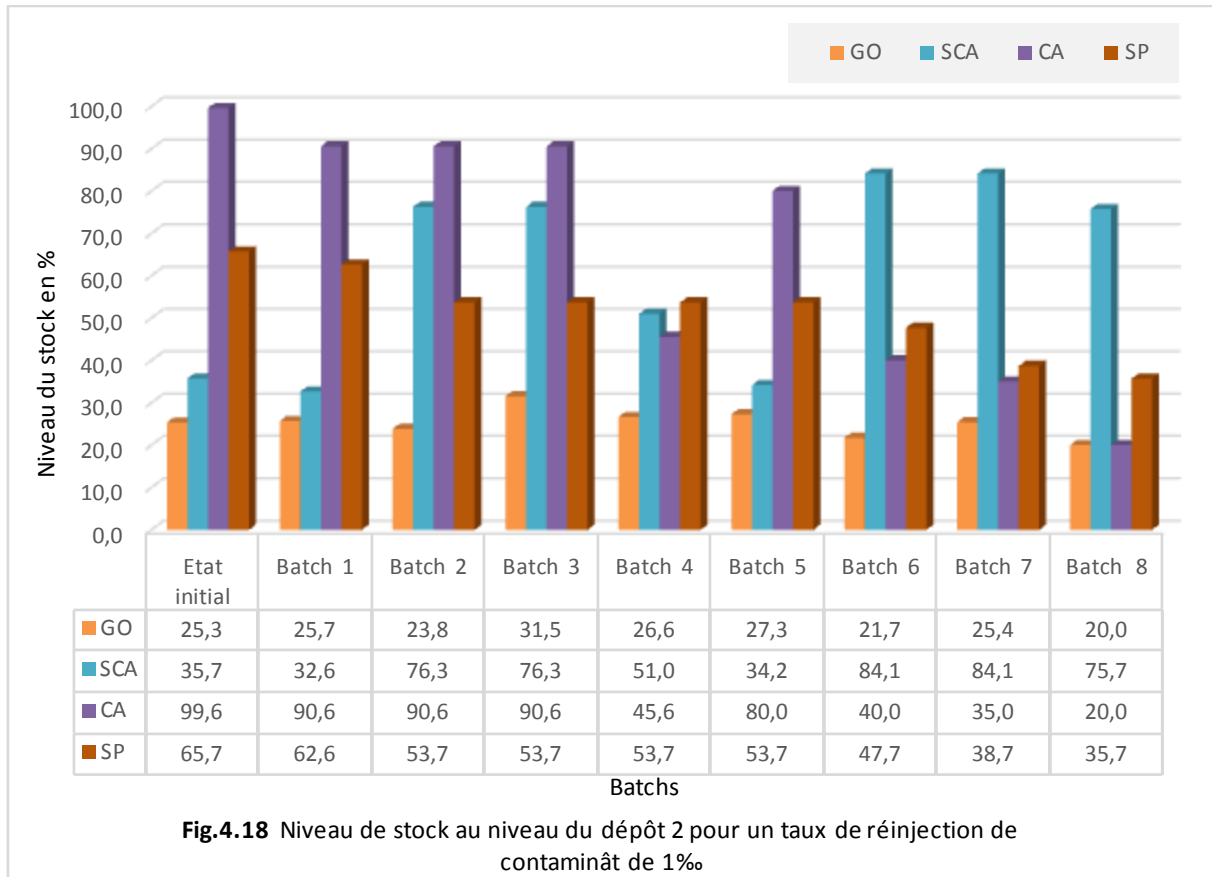


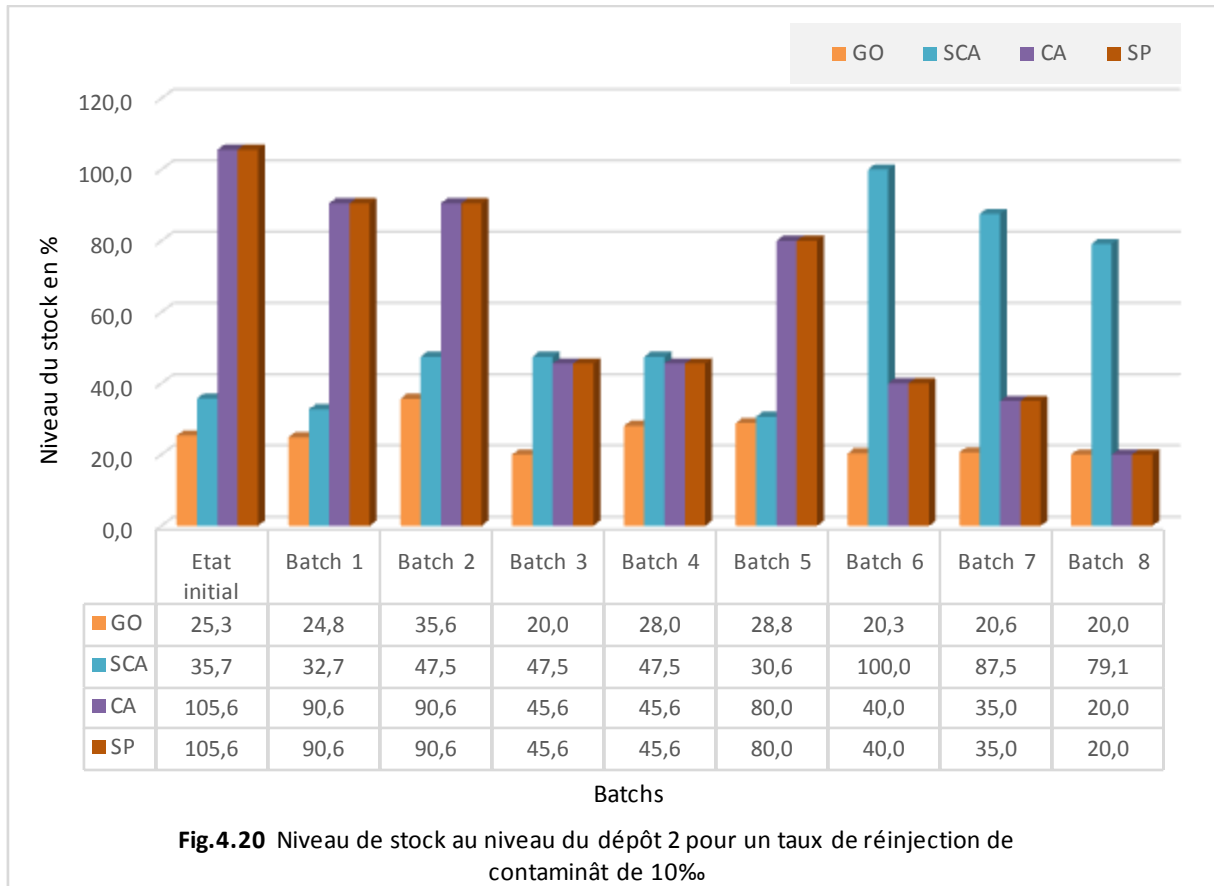




- Les figures 4.18, 4.19 et 4.20 montrent les niveaux du stock des quatre produits (*GO, SCA, CA et SP*) à chaque introduction du nouveau batch et à la fin de la décade.

A l'instar du dépôt 1, à la fin de la décade et pour les trois taux d'injection, les séquences optimisées de transfert ont ainsi répondu positivement, d'où nous avons enregistré un niveau de stock supérieur ou égal à 20%.







Conclusion



Conclusion

Le transport des carburants par pipeline joue un rôle très intéressant dans la chaîne logistique du pétrole, des efforts plus intenses de recherches sont abordés dans les industries pétrolières dans des grands pays pour bien cerner ce mode.

Dans le cadre du mémoire, nous avons étudié le problème d'optimisation de transport des carburants par pipeline multi-produit, avec la réinjection de contaminant à trois taux différents, dont les principaux objectifs étaient projetés à minimiser le volume total du contaminant stocké, veillant à garantir une autonomie de stock des produits purs de 20% et de satisfaire la demande clients dans les délais imposés.

Nous avons utilisé l'approche de programmation mathématique en nombre entier mixte, basée sur la formulation continue, dont la formulation mathématique (*MILP*) est résolue en utilisant le logiciel *Cplex*.

Le temps de simulation était raisonnable, ce qui rend la planification flexible pour toutes modifications ou changements possibles selon les éventuelles circonstances et conjonctures.

Les résultats obtenus accordent des séquences optimales, portant les batchs à injecter à partir de la raffinerie dans un horizon de dix jours et le programme de réception pour chaque dépôt, en fonction des prévisions de ventes de la région.

Nonobstant, et pour un premier temps, nous conseillons de vider le contenu des bacs de contaminant et les faire retourner à la source (Raffinerie), car ces derniers étaient au seuil maximal de remplissage. Mais toutefois, le changement des paramètres d'écoulement et plus précisément l'accroissement des débits faisant attention aux vitesses admissibles, peut alléger davantage le niveau du stock du contaminant par le pompage de grands batchs, ce qui favorise le processus de réinjection du contaminant avec des quantités supérieures pour le même taux.

Notre modèle d'optimisation peut être étendu par la prise en charge des restes de contraintes relevant des conditions d'exploitation et de production au niveau de la raffinerie, et celles relatives au réseau de distribution de l'entreprise NAFTAL, afin d'aboutir à un modèle global regroupant toute la chaîne de commercialisation, de la source au client.



Bibliographie



- [1] Djamel BENNACER, 2011. *Etude des phénomènes d'interfaces verticales des écoulements diphasiques dans un pipeline - Cas des Carburants* –Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [2] Kouache Amel, 2011. *Ammonium Quaternaire Du Plat format : Synthèse et Application A L'inhibition De La Corrosion Acide D'acier*– Mémoire de Magister, Laboratoire de Génie chimique, Département de chimie industrielle, Faculté de Technologie, Université Saâd Dahlab – Blida.
- [3] Pierre HOUSSIN, Georges WESSEL, *Le transport multi-produits*,
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Ol%C3%A9oduc_trans-Alaska.
- [5] Fateh AGGOUNE, 2010. *Évaluation de L'endommagement des tubes dans leurs Conditions D'exploitation* – Mémoire de Magister, Université Mentouri - Constantine.
- [6] Ruy Luiz Milidiú, Frederico Dos Santos Liporace , Carlos José , P. Lucena, 2002, *Pipelines words: Planning pipeline transportation of petroleum derivatives*.
- [7] <http://www.trapil.fr/fr/plan.asp>
- [8] Jaime Cerdá, *Oil Pipeline Logistics*, Pan American Study Institute on Emerging Trends in Process Systems Engineering August 11-21 , Mar del Plata, Argentina.
- [9] A. Smati, N. Zeraibi et M. C. Touabti, 2000. *Optimisation du réseau algérien de transport de brut et de condensat*, Oil & Gaz Science and Technology.
- [10] <http://www.universalis.fr/encyclopedie/petrole-le-transport/7-le-transport-du-petrole-par-pipeline/#>
- [11] Cheryl J.et Trench, (2001). *How Pipelines Make the Oil Market Work* – Their Networks, Operation and Regulation: A Memorandum Prepared for the Association of Oil Pipe Lines And the American Petroleum Institute's Pipeline Committee–P.O. BOX 230592 NEW YORK, NY 10023.
- [12] MAIRE Alain, 2011. *Transport par pipeline : Aspects économiques et environnementaux*, Edition Technip.
- [13] www.naftal.com
- [14] Sven B. J. Oosterhuis, 2015. *Robust pipeline flow scheduling at an oil company*, Master's thesis, Industrial Engineering and Management, University of Twente.
- [15] Alireza Ghaffari-Hadigheh, Hossein Mostafaei, 2014. *On the scheduling of real multiproduct pipelines with simultaneous delivery*, Optimization and engineering.
- [16] Hane et Ratliff, 1995. *On the scheduling of real world multiproduct pipelines with simultaneous delivery*, Article in Optimization and Engineering.
- [17] Shah, N, 1996. *Mathematical programming techniques for crude oil scheduling*, In Computers and Chemical Engineering, 20, 1227-1232.

- [18] Sasikumar, M., Prakash, P. R., Patil, S. M., & Ramani, S. 1997. *PIPES: A heuristic search model for pipeline schedule generation*, Knowledge-Based Systems, 10,169–175.
- [19] Ruy Luiz Milidiú, 2002. *Planning of Pipeline Oil Transportation with Interface Restrictions is a Difficult Problem*.
- [20] Pinto, J. M., Joly, M., & Moro, L. F. L. 2000. *Planning and scheduling models for refinery operations*, Computers and Chemical Engineering, 24, 2259.
- [21] Rejowski, R., Jr., & Pinto, J. M, 2003. *Scheduling of a multiproduct pipeline system*, Computers and Chemical Engineering, 27, 1229–1246.
- [22] Rejowski, R., Jr., & Pinto, J. M. 2004. *Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling*, Computers and Chemical Engineering, 28, 1511–1528.
- [23] Rejowski, R., Jr., & Pinto, J. M, 2008. *A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraint*, Computers and Chemical Engineering, 32, 1042–1066.
- [24] Cafaro, D. C., & Cerdá, J, 2004. *Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non discrete MILP formulation*, Computers and Chemical Engineering, 28, 2053–2068.
- [25] Cafaro, D. C., & Cerdá, J, 2008. *Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates*, Computers and Chemical Engineering, 32, 728–753.
- [26] Mirhassani, S. A., & Ghorbanalizadeh, M. 2008. *The multiproduct pipeline scheduling system*, Computers and Mathematics with Applications, 56(4), 891–897.
- [27] Relvas, S., Matos, H. A., & Barbosa-Povoa, A. P. F. D, 2009. *Heuristic batch sequencing on a multiproduct oil distribution*, Computers and Chemical Engineering, 33, 712–730.
- [28] Herrán, A., de la Cruz, J. M. & de Andrés, B. 2010. *A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi pipeline system*, Computers and Chemical Engineering, 34, 401–413.
- [29] Pedro M. Castro, 2010. *Optimal scheduling of pipeline systems with a resource-task network*, Industrial and Engineering Chemistry Research, 49(22), 11491–11505.
- [30] MirHassani, S.A., Moradi, S., & Taghinezhad, N. 2011. *Algorithm for long-term scheduling of multiproduct pipelines*– Industrial and Engineering Chemistry Research, 50(24), 13899–13910.
- [31] MirHassani et afani jahromi, 2011. *A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system*,, Computers and Chemical Engineering, 34, 401–413.

- [32] A.Herran et al, 2011. *Global search metaheuristics for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system*, Computers and Chemical Engineering, 37, 248–261.
- [33] S. A., & Jahromi, H. F, 2011. *Scheduling multi-product tree-structure*. Computers and Chemical Engineering, 35, 165–176.
- [34] Suelen Neves Boschetto Magatao et al, 2012. *A combined CLP–MILP approach for scheduling commodities in a pipeline*, Journal of Scheduling, 14, 57–87.
- [35] Liang Yongtu et al, 2012. *The investigation of optimal scheduling for products pipeline*. Ph.D. Dissertation, China University of Petroleum.
- [36] Paulo Cesar Ribas et al, 2012. *A micro-genetic algorithm for multi-objective scheduling of a real world pipeline network*. Brazilian Oil Company (PETROBRAS), Brazil University of Technology - Parana (UTFPR/CPGEI), Engineering Applications of Artificial Intelligence 26, 302–313.
- [37] Diego C. Cafaro, Jaime Cerdá, 2013. *Detailed scheduling of single-source pipelines with simultaneous deliveries to multiple off take stations*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 51, 6145–6165.
- [38] Mariana E. Coccola et al (2014) *Mixed Integer Linear Programming Formulation for Aiding Planning Activities in a Complex Pipeline Network*. Industrial and Engineering Chemistry Research
- [39] V.G., Cafaro, D. C., Méndez, C. A., & Cerdá, J, 2015. *Optimization model for the detailed scheduling of multi-source pipelines*. Computers and Industrial Engineering, 88,395-409.
- [40] S. N. B. Magatao et al 2015. *A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline*, in: ESCAPE 12 Proceedings, The Hague, The Netherlands.
- [41] Olivier Péton, 2008. *Algorithms, Transport Economics, Supply chain management*, Ecole des Mines de Nantes.
- [42] Michel Bierlaire. *Optimisation en nombres entiers- EPFL - Laboratoire Transport et Mobilité – ENAC*.
- [43] CHRISTODOULOS A. FLOUDAS, 2005. *Mixed Integer Linear Programming in Process Scheduling: Modeling, Algorithms, and Applications*, Department of Chemical Engineering, Princeton University, Princeton, NJ 08544-5263, USA.
- [44] Solnon, 2010. *Résolution de problèmes combinatoires et optimisation par colonies de fourmis*. Notes de cours ,URL <http://www710.univ-lyon1.fr/>
- [45] N°32, Décembre2009. *L'utilisation des heuristiques pour la résolution des problèmes de tournée de véhicule*.

- [46] ABDELLAOUI Wassila, BERRICHI Asma et GUEZZEN. Imane, 2014. *La Résolution d'un problème stochastique de tournées de véhicule*. Licence, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [47] MALIKI Fouad, 2014, *cours des métaheuristiques*– M1 génie industrielle, Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen.
- [48] www.Algorithme%20glouton%20%E2%80%94%20Wikip%C3%A9dia.
- [49] Marie-Pierre Beal Algorithmique 4- L3 Informatique, Université Paris-Est Marne-la-Vallée.
- [50] *TP de Programmation Linéaire: introduction à CPLEX.*, Université Paris-Sud IFIPS Informatique.
- [51] Christophe et Andréa Duhamel 2008/2009. *Introduction à CPLEX. ISIMA.*