

&RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département Génie Industriel
SLB Algérie

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel (Management Industriel)

**Optimisation du réseau d'approvisionnement de SLB vers
l'Afrique du Nord : Une approche quantitative et décisionnelle de
localisation de hub logistique**

**AHLOUCHE Amelia Fadela
BELLIL Celina Dassine**

Sous la direction de M. Ali BOUKABOUS & Mme Kamelia HAMMACHI

Présenté et soutenu publiquement le 22 juin 2025

Composition du Jury :

Président	M. Iskander ZOUAGHI	ENP
Examinatrice	Mme Samia BELDJOURI	ENP
Promoteur	M. Ali BOUKABOUS	ENP
Promotrice	Mme Kamelia HAMMACHI	ENP
Invité	M. Nouredine HADDADI	SLB

ENP 2025

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département Génie Industriel
SLB Algérie

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel (Management Industriel)

**Optimisation du réseau d'approvisionnement de SLB vers
l'Afrique du Nord : Une approche quantitative et décisionnelle de
localisation de hub logistique**

**AHLOUCHE Amelia Fadela
BELLIL Celina Dassine**

Sous la direction de M. Ali BOUKABOUS & Mme Kamelia HAMMACHI

Présenté et soutenu publiquement le 22 juin 2025

Composition du Jury :

Président	M. Iskander ZOUAGHI	ENP
Examinatrice	Mme Samia BELDJOU DI	ENP
Promoteur	M. Ali BOUKABOUS	ENP
Promotrice	Mme Kamelia HAMMACHI	ENP
Invité	M. Nouredine HADDADI	SLB

ENP 2025

ملخص

يتناول هذا البحث مسألة تحسين شبكة الإمداد الدولية لشركة SLB في منطقة شمال إفريقيا. ويهدف إلى تحديد الموقع الأنسب لإنشاء مركز لوجستي وسيط في منطقة البحر الأبيض المتوسط لخدمة كل من الجزائر وتونس وليبيا، مع الأخذ بعين الاعتبار القيود الاقتصادية والتنشغيلية والجيوسياسية الخاصة بالمنطقة.

تعتمد المنهجية المتبعة على مقارنة هجينة تجمع بين النماذج الكمية (مركز الثقل، نموذج P-médiane)، وأدوات اتخاذ القرار متعددة المعايير الغامضة (TOPSIS, Fuzzy DEMATEL, ANP) وذلك لضمان الحصول على نتائج واقعية وموثوقة. تم تقييم ثلاثة سيناريوهات لوجستية من خلال تحليل مالي وزمني شامل.

توصلت الدراسة إلى حل يحقق توازناً استراتيجياً بين التكلفة والكفاءة.

الكلمات المفتاحية: اللوجستيات، تحديد موقع المركز، التحسين، دعم القرار، التحليل متعدد المعايير، شمال إفريقيا، SLB.

Abstract

This thesis addresses the optimization of SLB's international logistics network in North Africa. It seeks to identify the most suitable location for a logistics hub in the Mediterranean to serve Algeria, Tunisia, and Libya, considering economic, operational, and geopolitical constraints.

A hybrid methodology combining quantitative models (center of gravity, P-median) with fuzzy multi-criteria decision-making tools (Fuzzy DEMATEL, ANP, TOPSIS) is used to ensure robust and realistic results. Three logistics scenarios are evaluated through financial and lead time analyses. The proposed solution achieves a strategic balance between cost, efficiency.

Keywords: Logistics, Hub Location, Optimization, Decision Support, Multi-Criteria Analysis, North Africa, SLB.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'optimisation du réseau logistique international de SLB en Afrique du Nord. Il vise à identifier l'emplacement le plus approprié pour un hub logistique en Méditerranée afin de desservir l'Algérie, la Tunisie et la Libye, en tenant compte des contraintes économiques, opérationnelles et géopolitiques.

Une méthodologie hybride, combinant des modèles quantitatifs (centre de gravité, modèle P-médiane) à des outils d'aide à la décision multicritère flous (Fuzzy DEMATEL, ANP, TOPSIS), est utilisée pour garantir des résultats robustes et réalistes.

Trois scénarios logistiques sont évalués à travers des analyses financières et de délais.

La solution proposée permet d'atteindre un équilibre stratégique entre coût et efficacité.

Mots-clés : Logistique, Hub, Localisation, Optimisation, Aide à la décision, Multicritère, Afrique du Nord, SLB.

Remerciements

Louange à Dieu, le Tout-Puissant, pour la force, la patience et les opportunités qu'Il nous a accordées tout au long de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur Ali Boukabous, pour son encadrement et accompagnement attentif, ses conseils précieux et sa disponibilité constante. Sa bienveillance et sa rigueur ont été des repères déterminants dans l'aboutissement de ce mémoire.

Nos remerciements les plus chaleureux vont à Monsieur Iskander Zouaghi, dont le soutien a été essentiel non seulement pour l'obtention de ce stage, mais également tout au long de notre progression. Grâce à sa disponibilité constante, sa rigueur et sa bienveillance, il a su nous orienter avec générosité et efficacité à chaque étape de notre projet. Nous tenons également à remercier Madame Kamelia Hammachi, pour son aide précieuse, la qualité de ses remarques, et son regard critique toujours pertinent, qui ont grandement contribué à l'amélioration de notre travail.

Nous souhaitons également remercier Monsieur Nouredine Haddadi, Responsable Import/Export chez SLB Algérie, pour son encadrement professionnel, ses retours constructifs et sa confiance. Nos remerciements vont aussi à toute l'équipe SLB, pour leur accueil, leur collaboration et leur implication dans notre mission.

Nous remercions enfin Monsieur Ismaïl Mecheti, de THO Shipping, pour les données opérationnelles précieuses qu'il nous a transmises, ayant apporté une réelle valeur ajoutée à notre étude.

Dédicaces

À ma maman, ma confidente, ma meilleure amie. Celle avec qui je partage tout, mes joies, mes peines, mes doutes et mes rêves. Merci pour ton amour inconditionnel, ton écoute toujours attentive, ta tendresse rassurante et ta force silencieuse. Tu as tout donné pour moi, toujours là pour m'élever, me recentrer, me consoler. Nos éclats de rire, notre complicité, ta simple présence : tout cela m'apaise et me donne l'élan d'avancer, encore et toujours.

À mon cher papa, pilier discret mais indéfectible, qui a toujours cru en moi, même dans mes moments de doute. Celui qui m'a appris à viser plus haut, à ne jamais me contenter du minimum, à repousser mes limites. Merci pour ta confiance, ton soutien indéfectible et ta générosité constante, toujours là, sans condition, dès que j'ai besoin de toi.

À ma petite sœur Nadine, douce, attentive et toujours présente à sa manière. Tu as ce don de rendre les choses plus légères, plus douces, simplement par ta présence. Ton regard bienveillant et ton soutien silencieux ont souvent été pour moi un refuge dans les moments de fatigue ou de doute. Tu comptes plus que tu ne l'imagines.

À mon petit frère Wassim, mon "mini-moi", mais avec ta propre lumière. Ta présence, ta joie spontanée, ton humour et tes mots encourageants sont souvent tombés au bon moment, ceux où j'en avais le plus besoin. Tu m'as apporté bien plus que tu ne le penses, avec cette énergie positive et ce regard admiratif qui me donne envie d'être à la hauteur. Merci d'être toujours là, avec ton cœur grand ouvert et ton affection sans filtre.

À mes amis, mes bouffées d'air frais dans cette vie étudiante parfois pesante. Vous avez rendu mes années à Polytechnique non seulement supportables, mais extrêmement drôles et mémorables. Grâce à vous, les longues journées sont devenues plus légères, venir vous voir, étudier à vos côtés et surtout rire sans cesse, c'est ce qui a fait de ces années une vraie aventure. Merci d'avoir été cette famille choisie, avec qui j'ai pu être pleinement moi-même. Vous avez laissé une trace indélébile dans cette période de ma vie, et je vous en serai toujours reconnaissante.

- *Amelia*

Dédicaces

À ma très chère maman,

Tu as été mon premier refuge. Ton amour a toujours été mon abri, ton regard ma boussole. Dans chaque victoire, dans chaque pas en avant, il y a un peu de toi. Merci d'avoir été ma première force, ma première foi, mon premier sourire.

À mon papa bien aimé,

Merci d'avoir vu en moi plus que je ne voyais. Ta confiance m'a portée, ton exigence m'a forgée. Tu m'as appris à poursuivre mes rêves avec sérieux et cœur. J'espère avoir honoré la foi que tu as placée en moi.

À ma grande sœur, Anaïs,

Entre deux chamailleries, tu as toujours su être la grande sœur sur qui je pouvais compter. Tes conseils, même donnés avec un soupir, m'ont souvent évité bien des bêtises. Tu es mon opposée... et pourtant, celle dont je ne pourrais jamais me passer.

À mon petit frère, Rostane,

Tu m'agaces. Souvent. Fort. Mais au fond (très fond), je crois que je t'adore pour ça. Entre deux disputes, tu trouves toujours le moyen de me faire sourire. Tu as cette énergie brute, un peu chaotique, mais plzeine de vie. Reste mon frère unique et préféré.

À toi, Yani,

Tu as été ce soutien inébranlable, celui qui, sans bruit, m'a portée quand je doutais. Toujours là pour croire en moi plus fort que moi-même. Merci d'être ce repère discret avec qui chaque instant devient précieux.

Jihene,

Tu as toujours été d'un soutien inestimable, une présence fidèle sur qui j'ai pu compter dans les moments difficiles. Ton amitié m'a apportée bien plus que tu ne peux l'imaginer.

Lyna, Meryem, Maria, Amira,

Votre soutien constant, vos mots doux et votre présence à mes côtés depuis cinq ans ont été un véritable pilier. Merci d'avoir partagé cette aventure avec moi.

Liza, Souha, Yasmine

Mon trinôme (quadrinôme) préféré, on en a passé des nuits blanches, des disputes et des galères, mais toujours ensemble, avec le cœur, l'amour et cette force qu'on se donnait. Sans vous, cette aventure n'aurait pas eu le même gout. Merci pour tout.

Amelia, Nazim, Ines,

Vous avez illuminé ces années de rires, de complicité et de tendresse. Grâce à vous, tout semblait plus léger. Je vous porte dans mon cœur, avec une immense gratitude.

Meriem, Hanane, Chaima, Michou, Ania, Nassim

Malgré les années, vous êtes restées ce refuge sûr, ce doux rappel que la vraie amitié traverse le temps sans jamais s'effacer.

- *Dassine*

Tables des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

INTRODUCTION GÉNÉRALE 13

CHAPITRE 01 : État des lieux 15

Introduction..... 16

1.1 Présentation générale de SLB 18

1.1.1 Présentation de SLB monde..... 18

1.1.2 Historique, mission et positionnement stratégique 18

1.1.3 Organisation et divisions..... 19

1.1.4 Présentation de SLB North Africa 22

1.1.5 Présentation de SLB Algerie..... 23

1.2 La Supply Chain chez SLB..... 24

1.2.1 Organisation Globale de la Supply Chain chez SLB 24

1.2.1.1 Global Supply Chain & Procurement (GSC&P) 24

1.2.1.2 Global Oilfield Logistics & Distribution (GOLD) 24

1.2.1.3 Flux de la Supply Chain chez SLB 25

1.2.2 Processus d'Import-Export 26

1.2.2.1 Typologie des flux d'import-export chez SLB 26

1.2.2.2 Processus opérationnel d'Import-Export 26

1.2.2.3 Cartographie du Processus Import-Export chez SLB 28

1.3 Diagnostic interne et contextuel de la supply chain SLB 31

1.3.1 Évaluation du macro-environnement logistique régional via l'analyse
PESTEL..... 31

1.3.2 Analyse et évaluation quantitative des performances logistiques..... 39

1.3.2.1 Méthodologie de traitement et préparation des données..... 39

1.3.2.2 Analyse des flux et volumes d'exportation NAF..... 41

1.3.3 Synthèse des constats logistiques et enjeux de réorganisation 44

1.4 Énoncé de la problématique..... 44

Conclusion 45

CHAPITRE 02 : État de l'art 46

Introduction..... 47

2.1	Concepts fondamentaux de la chaine logistique.....	48
2.1.1	La Chaîne Logistique (Supply Chain)	48
2.1.2	Le Supply Chain Management.....	48
2.1.2.1	Définition du Supply Chain Management	48
2.1.2.2	Niveaux de décision de la Supply Chain	49
2.1.2.3	La Supply Chain dans le secteur des services pétroliers.....	50
2.2	Enjeux de performance et d'optimisation dans la chaine logistique.....	52
2.2.1	Défis liés au Supply Chain Management.....	52
2.2.2	Infrastructures de distribution et de transbordement	53
2.2.2.1	Typologie des points de rupture de charge.....	53
2.2.2.2	Spécificité des hubs maritimes.....	53
2.2.3	Concepts liés à la logistique multimodale	54
2.2.3.1	Définition du transbordement	54
2.2.3.2	Caractéristiques du transbordement.....	54
2.2.3.3	Typologie du transbordement	55
2.2.3.4	Avantages logistique et économiques du transbordement	55
2.3	Outils et approches d'optimisation logistique.....	56
2.3.1	Fondements mathématiques et algorithmique de l'optimisation	56
2.3.2	La programmation linéaire.....	57
2.4	Les problèmes de localisation.....	59
2.4.1	Localisation logistique : définition, portée et enjeux.....	59
2.4.1.1	Définition de la localisation	59
2.4.1.2	Importance stratégique de la localisation logistique.....	59
2.4.2	Typologie des problèmes de localisation	59
2.4.3	Métriques de distance	60
2.4.3.1	Distance euclidienne	60
2.4.3.2	Great circle distance.....	61
2.4.3.3	Distance sphérique	62
2.4.3.4	Choix de la métrique.....	63
2.5	Modèles de localisation continus	63
2.5.1	Méthode du centre de gravité.....	63
2.5.1.1	Formulation mathématique	63
2.5.1.2	Portée et contraintes de la méthode du centre de gravité.....	64

2.6	Les modèles de localisation discrets	65
2.6.1	Modèles mono-critère	66
2.6.1.1	Le modèle P-médiane	67
2.6.1.2	Uncapacitated Facility Location problem UFLP	68
2.6.2	Modèles multi-critères	68
2.7	Méthodes d'aide à la décision.....	70
2.7.1	La prise de décision	70
2.7.2	Définition de l'AMD.....	70
2.7.3	L'approche multi-critère floue (Fuzzy MCMD)	71
2.7.3.1	Définitions et fondements de la théorie des ensembles flous	71
2.7.3.2	Méthode CFCS (Converting Fuzzy data into Crisp Scores).....	72
2.7.4	Quelle méthode de prise de décision choisir ?.....	73
2.7.5	La méthode DEMATEL floue.....	75
2.7.6	Pondération des critères d'évaluation suivant AHP/ANP.....	77
2.7.6.1	Méthode de l'analyse hiérarchique	77
2.7.6.2	Méthode d'analyse en réseau ANP	79
2.7.7	TOPSIS	83
2.7.8	Méthode hybride	85
2.7.9	Applicabilité des modèles et techniques	85
	Conclusion	86
	CHAPITRE 03 : Solution proposée.....	87
	Introduction.....	88
3.1	Détermination de la zone optimale : Application de la méthode du centre de gravité	88
3.1.1	Collecte et traitement des données.....	89
3.1.2	Calcul du centre de gravité selon la métrique sphérique	89
3.1.3	Calcul du centre de gravité suivant la métrique euclidienne	90
3.1.4	Délimitation du périmètre de recherche et sélection des ports candidats	91
3.2	Optimisation discrète de la localisation : Modélisation par le problème de la p-médiane	92
3.2.1	Modélisation mathématique.....	93
3.2.2	Implémentation du modèle dans CPLEX	94
3.2.2.1	Définition des ensembles et des paramètres	94
3.2.2.2	Déclaration des variables et des contraintes	94

3.2.3	Résultats du modèle et arbitrages	96
3.2.3.1	Affectation des points de réception.....	96
3.2.3.2	Interpretation stratégique des résultats.....	97
3.3	Modélisation décisionnelle multicritère hybride appliquée à la localisation du hub	97
3.3.1	Détermination des critères de sélection	98
3.3.2	Analyse de la causalité des critères à l'aide de la méthode DEMATEL.....	99
3.3.2.1	Analyse des relations entre critères.....	99
3.3.2.2	Analyse des influences entre Cluster	105
3.3.3	Pondération des critères	106
3.3.3.1	Ponderation des critères selon l'Analytical Network Process approach (ANP)	106
3.3.3.2	Ponderation des critères avec AHP	110
3.3.4	Comparaison des résultats obtenus par les méthodes F-AHP et F-ANP	113
3.3.4.1	Tableau de synthèse comparative.....	113
3.3.4.2	Analyse et interprétation	114
3.3.4.3	Synthèse des résultats F-AHP/F-ANP	115
3.3.5	Évaluation finale des ports candidats par l'approche TOPSIS	116
3.4	Évaluation comparative des configurations logistiques : coûts, délais et performance globale.....	123
3.4.1	Préparation et structuration des données logistiques	123
3.4.2	Estimation des coûts logistiques	125
3.4.3	Étude de cas : Analyse détaillée du scénario hybride Marseille–Malte.....	126
3.4.3.2	Itinéraires envisagés et coûts associés	127
3.4.3.3	Bilan des coûts logistiques.....	129
3.4.3.4	Résultats et discussions.....	130
3.4.3.5	Évaluation comparative des délais d'acheminement logistique	130
3.4.3.6	Recommandation et synthèse des résultats	133
	Conclusion	133
	Conclusion Générale	135
	Bibliographie	137
	Annexe	142

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Fiche d'identité SLB (SLB private)	18
Tableau 1.2 : Divisions et Business Lines de SLB (SLB private)	
Tableau 1.3 : Sites de SLB NAF	
Tableau 1.4 : Comparaison des processus IE temporaire et permanent	
Tableau 1.5 : Analyse des facteurs politiques	
Tableau 1.6 : Analyse des facteurs économiques	
Tableau 1.7 : Analyse des facteurs sociaux	
Tableau 1.8 : Analyse des facteurs technologiques	
Tableau 1.9 : Analyse des facteurs environnementaux	
Tableau 1.10 : Analyse des facteurs légaux	
Tableau 1.11 : Fréquence des expéditions mensuelles pour la Libye, la Tunisie et l'Algérie en 2023	
Tableau 1.12 : Fréquence des expéditions mensuelles pour la Libye, la Tunisie, l'Algérie en 2024	
Tableau 2.1 : Classification des problèmes combinatoires logistique	
Tableau 2.2 : Critères de classification des modèles	
Tableau 2.3 : Synthèse de modèles de localisation discrets	
Tableau 2.4 : Comparaison des types de décisions Tiré de Meier et Barabel (2006, p. 183)	
Tableau 2.5 : Analyse des avantages et inconvénients des méthodes d'évaluation	
Tableau 2.6 : Pondération supposée basée sur la théorie floue triangulaire	
Tableau 2.7 : Échelle d'évaluation tirée de Saaty (2004, p.4)	
Tableau 2.8 : Random index RI	
Tableau 3.1 : Calcul du centre de gravité selon la métrique sphérique	
Tableau 3.2 : Coordonnées pondérées des points de réception et calcul du centre de gravité euclidien	
Tableau 3.3 : Critères de sélection des hubs logistiques	
Tableau 3.4 : Matrice d'influence entre les dix critères de sélection	
Tableau 3.5 : Matrice floue des influences directes entre critères de sélection	
Tableau 3.6 : Matrice d'influence directe normalisée	
Tableau 3.7 : Calcul des valeurs normalisées du critère coût logistique	
Tableau 3.8 : Somme des influences exercées et subies pour chaque critère	
Tableau 3.9 : Seuil de limitation des relations d'influence	
Tableau 3.10 : Matrice d'influence	
Tableau 3.11 : Matrice d'influence directe floue	
Tableau 3.12 : Matrice de comparaison par paires des critères	
Tableau 3.13 : Matrice de comparaison intra-Cluster selon les relations de dépendance	
Tableau 3.14 : Matrice de comparaison par paires des clusters	
Tableau 3.15 : Poids des critères et classement selon l'ANP	
Tableau 3.16 : Matrice de comparaison des paires de critères - AHP	
Tableau 3.17 : Matrice de comparaison floue - AHP	
Tableau 3.18 : Geometric mean value	
Tableau 3.19 : Calcul des poids des critères de sélection selon l'AHP	

Tableau 3.20 : Poids des critères de sélection et classement selon l’AHP

Tableau 3.21 : Comparaison des poids selon les deux méthode ANP/AHP

Tableau 3.22 : Évaluations linguistiques floues des ports selon les dix critères

Tableau 3.23 : Matrice de décision floue TOPSIS - Triplets flous par critère et port

Tableau 3.24 : Valeurs normalisées - Critères cout

Tableau 3.25 : Valeurs normalisées – Critères coût

Tableau 3.26 : Valeurs normalisées - Critères bénéfice

Tableau 3.27 : Valeurs normalisées – Critère bénéfice

Tableau 3.28 : Matrice de décision floue pondérée

Tableau 3.29 : Matrice de décision floue pondérée

Tableau 3.30 : Solution idéales et anti-idéales

Tableau 3.31 : Distances floues à la solution idéale A^+

Tableau 3.32 : Distances floues à la solution anti-idéale A^-

Tableau 3.33 : Distances floues aux solutions idéales et anti-idéales

Tableau 3.34 : Score de similarité floue et classement final des ports

Tableau 3.35 : Synthèse des poids expédiés depuis Rotterdam vers la région NAF

Tableau 3.36 : Détail des coûts Leg 1 – Rotterdam

Tableau 3.37 : Détail des coûts Leg 1 – Houston

Tableau 3.38 : Détail des coûts Leg 1 – Dubaï

Tableau 3.39 : Coût de documentation – Scénario 02

Tableau 3.40 : Coûts de manutention – Scénario 02

Tableau 3.41 : Détail des coûts Leg 2 – Scénario 02

Tableau 3.42 : Comparaison des coûts logistiques totaux par scénario

Tableau 3.43 : Délais d’acheminement estimés pour le scénario 2 – Configuration hybride Marseille–Malte

Tableau 3.44 : Délais d’acheminement dans la configuration logistique actuelle (situation de référence)

Tableau 3.45 : Comparaison des délais d’acheminement selon les scénarios – Expéditions depuis Houston

Tableau 3.46 : Comparaison des délais d’acheminement selon les scénarios – Expéditions depuis Dubai

Tableau 3.47 : Comparaison des délais d’acheminement selon les scénarios – Expéditions depuis Rotterdam

Liste des figures

- Figure 1.1 : Cadre des bassins et GeoUnits de SLB private
- Figure 1.2 : Présence de SLB en région NAF
- Figure 1.3 : Carte de distribution des Hubs SLB dans le monde
- Figure 1.4 : Processus de sélection du mode de transport logistique
- Figure 1.5 : Ecosystème des partenaires logistiques de SLB
- Figure 1.6 : Flux de l'Importation permanente
- Figure 1.7 : Flux de l'importation permanente
- Figure 1.8 : Flux de l'importation temporaire
- Figure 1.9 : Flux de l'exportation temporaire
- Figure 1.10 : Analyse croisée des résultats PESTEL
- Figure 1.11 : Points de réception principaux de la région NAF
- Figure 1.12 : Vision mensuelle des fréquences moyennes par destination et hub potentiel (2023-2024)
- Figure 1.13 : Cartographie des expéditions et flux logistique de la région NAF
- Figure 1.14 : Répartition des modes de transport utilisés en logistique
- Figure 2.1 : Contraste entre la logistique et la Supply Chain
- Figure 2.2 : Étapes de la chaîne logistique pétrolière
- Figure 2.3 : Carte illustrant les principaux points de transit des navires pétroliers
- Figure 2.4 : Schéma d'un réseau logistique multimodal (ex. SLB)
- Figure 2.5 : Étapes du processus de transbordement
- Figure 2.6 : Great circle distance on the sphere (adapted from Mwemezi and Huang 2011)
- Figure 2.7 : Basic idea of the three dimensional Cartesian coordinate system for the Earth (Clynch 2006)
- Figure 2.8 : Différence entre la structure hiérarchique et la structure en réseau
- Figure 2.9 : Structure générale d'une super matrice Tirée de Saaty (2008, p.6).
- Figure 2.10 : Processus ANP – Analytical Network Process
- Figure 3.1 : Points de réception et ports de sélection
- Figure 3.2 : Déclaration du modèle en OPL
- Figure 3.3 : Fonction objectif et contraintes en OPL
- Figure 3.4 : Déclaration et implémentation des données
- Figure 3.5 : Résultats de la modélisation p-médiane
- Figure 3.6 : Structure d'un réseau ANP
- Figure 3.7 : Découpage logistique du scénario 1 - Centralisation via Marseille
- Figure 3.8 : Découpage logistique du scénario 2 - Configuration hybride Marseille–Malte
- Figure 3.9 : Découpage logistique du scénario 3 - Situation actuelle sans consolidation
- Figure 3.10 : Comparaison des Lead times des scénarios

Liste des abréviations

AHP : Analytical Hierarchy Process

ANP : Analytical Network Process

BL : Business Lines

CEO : Chief Executive Officer

CFCS : Converting Fuzzy data into Crisp Scores

CI : Index de Cohérence

CR : Consistence Ratio

DC : Distribution Center

DEMATEL : Decision Making Trial and Evaluation Laboratory

DSC : Distribution Service Centers

ELECTRE : ELimination Et Choix Traduisant la REalité

ERP : Enterprise Resource Planning

FCE : Fuzzy Composite Element

FMI : Fonds Monétaire International

FNIS : Farthest Negative Ideal Solution

FPIS : Farthest Positive Ideal Solution

GOLD : Global Order Logistics and Distribution

IBM : International Business Machines Corporation

IDE : Investissements Directs Étrangers

KPI : Key Performance Indicator

MCMD : Multi-Criteria Decision Making

M&S : Maintenance & Services

NAF : North Africa GeoUnit

OPL : Optimization Programming Language

PESTEL : Politique, Économique, Social, Technologique, Environnemental, Légal

PIB : Produit Intérieur Brut

PLNE : Programmation Linéaire en Nombres Entiers

R&D : Recherche et Développement

RI : Random Index (Index Aléatoire)

SCIP : Solving Constraint Integer Programs

TMS : Transport Management System

TOPSIS : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

UFLP : Uncapacitated Facility Location Problem

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un contexte de mondialisation croissante et de transformation accélérée des chaînes d'approvisionnement, les entreprises industrielles internationales doivent repenser en profondeur leurs organisations logistiques pour répondre aux nouvelles exigences de compétitivité, de résilience et de durabilité. La fluidité des flux, la maîtrise des coûts et la réduction des délais deviennent des leviers stratégiques majeurs dans les décisions de conception des réseaux logistiques.

C'est dans cette dynamique que s'inscrit ce projet de fin d'études, mené en collaboration avec la société SLB (anciennement Schlumberger), leader mondial des services dans le secteur de l'énergie. Présente dans plus de 120 pays, SLB gère des flux logistiques complexes à l'échelle mondiale, et notamment vers la région Afrique du Nord, zone soumise à des contraintes douanières, politiques et opérationnelles spécifiques.

Depuis 2024, SLB a mis en place un hub logistique régional à Marseille destiné à consolider les expéditions vers l'Algérie. Fort de cette première expérience, l'entreprise souhaite aujourd'hui étendre et optimiser son modèle à l'échelle de toute la région, incluant la Tunisie et la Libye. L'objectif est de repenser la structuration géographique de son réseau logistique afin de réduire les coûts d'acheminement, améliorer les délais de livraison, et gagner en visibilité sur l'ensemble de ses flux.

La problématique abordée dans ce mémoire est donc la suivante :

Comment déterminer la localisation optimale d'un hub logistique intermédiaire pour servir efficacement l'Afrique du Nord, tout en tenant compte des contraintes économiques, géopolitiques et opérationnelles propres à cette région ?

Pour y répondre, nous avons adopté une approche hybride, croisant des outils de modélisation mathématique (centre de gravité, P-médiane) avec des méthodes d'aide multicritère à la décision floues (DEMATEL, ANP, Fuzzy TOPSIS), afin de tenir compte à la fois des dimensions quantitatives et qualitatives du problème. Cette étude a été enrichie par une analyse financière détaillée comparant différents scénarios logistiques sur les plans des coûts et des délais.

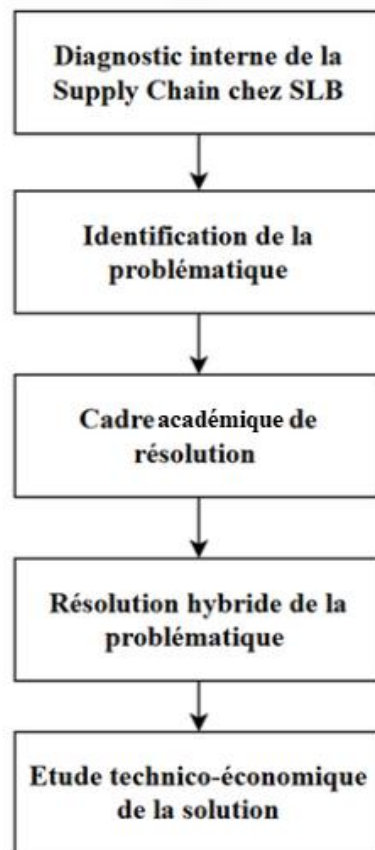
Le travail s'est structuré autour de trois grandes étapes :

1. **État des lieux approfondi** : intégrant la cartographie des flux actuels et une analyse diagnostique du réseau logistique SLB vers l'Afrique du Nord.
2. **État de l'art** : une revue théorique et méthodologique, mobilisant les concepts de localisation logistique, d'optimisation et d'aide multicritère à la décision dans des contextes incertains.
3. **Partie solution** : une modélisation appliquée, combinant outils mathématiques, critères d'évaluation stratégique, simulations, et recommandations basées sur des résultats tangibles.

Ce mémoire ambitionne ainsi de proposer une solution réaliste et directement exploitable par SLB, tout en s'inscrivant dans une logique plus large de transformation logistique

internationale. Il témoigne de l'importance croissante des approches analytiques dans les décisions stratégiques des grandes entreprises industrielles, notamment dans des contextes géopolitiques complexes comme celui de l'Afrique du Nord.

Le schéma suivant résume l'enchaînement chronologique de notre travail :



- Schéma général du projet -

Nous clôturons notre travail par une conclusion générale qui reprend et synthétise le travail effectué ainsi que les résultats obtenus.

CHAPITRE 01 : État des lieux

Présentation du contexte et diagnostic

Introduction

Dans le cadre de notre étude chez SLB (ex-Schlumberger), nous avons réalisé un état des lieux des opérations logistiques en Afrique du Nord afin de comprendre le contexte opérationnel dans lequel s'inscrit notre projet. Ce premier chapitre pose les fondations de notre étude en explorant le fonctionnement logistique de SLB en Afrique du Nord. À travers une approche à la fois descriptive et analytique, il vise à cerner les spécificités de la région (Algérie, Tunisie, Libye) et les contraintes qui pèsent sur les flux d'import-export dans un contexte pétrolier complexe.

La première partie est consacrée à la présentation de SLB, de son organisation globale à son ancrage régional, afin de mieux comprendre le rôle stratégique que joue l'Afrique du Nord dans ses opérations. Nous procédons ensuite à une cartographie détaillée des flux logistiques, mettant en évidence les itinéraires, les hubs d'origine, les fréquences d'expédition et les modes de transport. Cette lecture est complétée par une analyse des procédures douanières et des régimes d'import/export, clés dans la performance des circuits logistiques. Enfin, un diagnostic croisé macro-environnemental (PESTEL) et interne permet d'identifier les principaux freins, leviers et opportunités d'optimisation.

Le schéma suivant retrace l'ensemble des étapes citées ci-dessus :

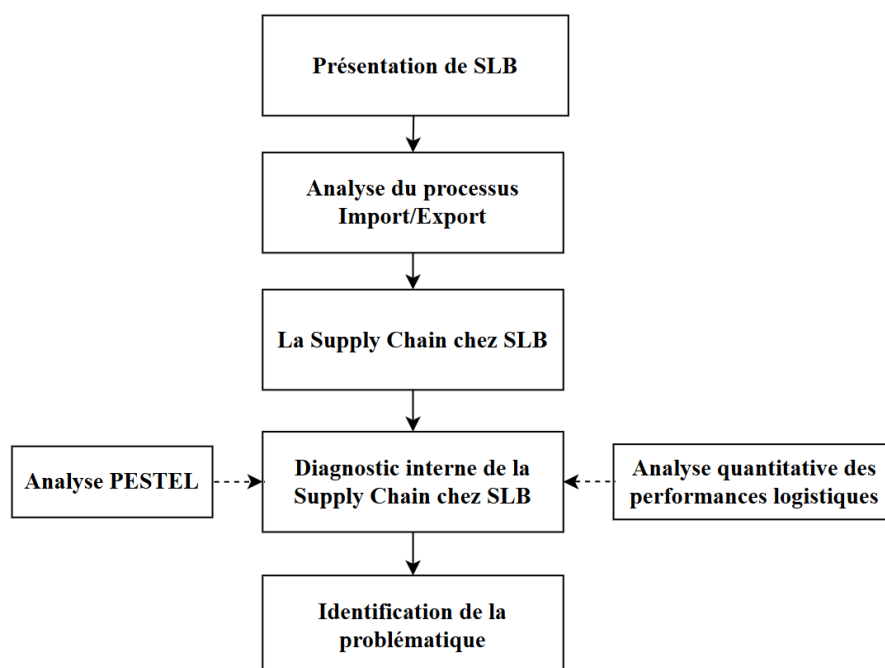


Schéma du chapitre 1

L'ensemble de ces constats alimente directement la démarche méthodologique qui sera développée dans les chapitres suivants.

1.1 Présentation générale de SLB

1.1.1 Présentation de SLB monde

SLB (ex Schlumberger Limited) est une entreprise multinationale spécialisée dans les services et équipements destinés à l'industrie pétrolière et gazière. Fondée en 1926 en France par les frères Conrad et Marcel Schlumberger sous le nom de « Société de Prospection Électrique », elle s'est développée grâce aux idées innovantes de ces deux frères dans l'analyse des formations géologiques via la conductivité électrique.

Aujourd'hui, SLB propose une large gamme de solutions couvrant l'ensemble du cycle de vie des opérations pétrolières, depuis l'exploration et l'évaluation des réserves jusqu'au forage, à la production et l'abandon des puits. Elle propose divers services comme les études géologiques et géophysiques, l'optimisation des opérations de forage, la complétion et la simulation des puits, ainsi que la gestion et la surveillance des réservoirs.

L'entreprise compte environ 82 000 employés issus de plus de 160 nationalités et présents dans plus de 120 pays. Son siège est réparti entre plusieurs bureaux exécutifs situés à Paris, Houston, Londres et La Haye.

Nom de l'entreprise	
Date de création	1926
Fondateurs	Frères Conrad et Marcel Schlumberger
Forme Juridique	Société anonyme avec appel public à l'épargne
Siège sociale	Bureaux principaux à Houston, Paris, et la Haye.
Direction	CEO : Olivier Le Peuch
Secteur d'activité	Service pétrolier
Effectif	98 000
Capital sociale	74 500 millions USD
Chiffre d'affaires	36 290 millions USD (2024)
Résultat net	446 millions USD (2024)

Tableau 1.1 : Fiche d'identité SLB – Données internes SLB private

1.1.2 Historique, mission et positionnement stratégique

SLB, anciennement Schlumberger Limited, est née en 1926 suite des études révolutionnaires des frères Conrad et Marcel Schlumberger, qui ont changé à jamais l'exploration pétrolière.

Au fil des décennies, SLB s’est imposée comme un acteur incontournable du secteur énergétique en développant des technologies avancées pour l’exploration, le forage, la production et la gestion des réservoirs. L’expansion internationale de la société a débuté dès les années 1930 avec des opérations en Amérique du Nord, en Amérique latine et au Moyen-Orient.

Dans les années 1950 et 1960, SLB a diversifié ses activités en intégrant des services de diagraphie et des innovations en forage directionnel. L’acquisition de plusieurs entreprises dans les années 1980 et 1990, notamment Sedco Forex et Camco, a renforcé sa présence dans les domaines du forage offshore et des services de production.

Les années 2000 ont marqué une nouvelle étape avec l’intégration de technologies numériques et l’accent mis sur l’optimisation de la récupération des hydrocarbures. En 2022, dans un souci de modernisation et de diversification vers la transition énergétique, la société a officiellement changé de nom pour devenir SLB, marquant son engagement vers des solutions énergétiques plus durables et une réduction de l’empreinte carbone. La figure ci-dessous élaborée par les auteurs à partir des données historiques de SLB (SLB Private, 2024), montre l’évolution chronologique de l’entreprise.

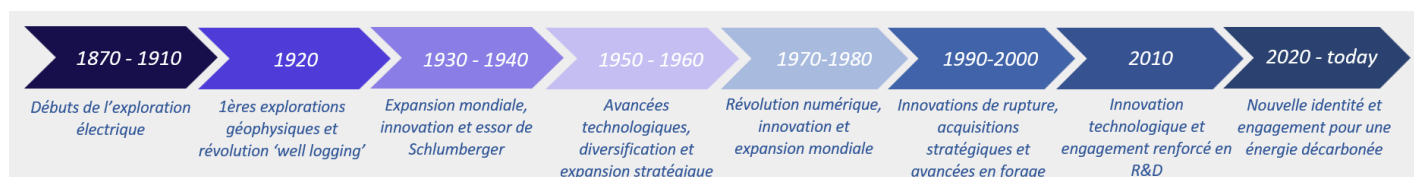


Figure 1.1 : Représentation chronologique de SLB

Aujourd’hui, SLB opère dans plus de 120 pays, employant plus de 85 000 personnes et offrant des solutions avancées pour répondre aux défis énergétiques mondiaux. Sa restructuration récente en divisions et en bassins géographiques vise à améliorer son agilité et son efficacité dans un marché en constante évolution.

1.1.3 Organisation et divisions

Il y a de cela cinq ans, SLB mit en place une transformation importante afin de répondre aux défis de l’industrie pétrolière et au ralentissement qu’elle a connu. L’entreprise crée une organisation plus agile suivant quatre divisions et cinq bassins géographiques, avec un total de 30 Géo-Units composées chacune d’un pays ou un groupe de pays. Cette nouvelle structure simplifiée permet à l’entreprise de mieux répondre aux besoins des clients locaux et de fournir des solutions adaptées.

La carte suivante présente la répartition des bassins pétroliers et l’organisation régionale des GeoUnits définies par SLB. Elle met en évidence les principales zones d’activité de l’entreprise à l’échelle mondiale et sert de référence pour la structuration de ses opérations logistiques et commerciales.



Figure 1.2 : Cadre des bassins et GeoUnits de SLB private

Récemment, SLB a réorganisé ses activités en quatre divisions principales, chacune englobant plusieurs business lines (BL) qui comporte chacune différents équipements, services et technologies : Well Construction, Reservoir performance, Production systems and digital & integration.

1. Digital & Integration (D&I)

Cette division se concentre sur les technologies numériques et l'intégration des données pour améliorer les performances des actifs et des entreprises. Elle comprend les business lines suivantes :

- Digital Subsurface Solutions : Géosciences et ingénierie des réservoirs.
- Exploration Data : Sismique multi clients et traitement associé.
- Digital Operations Solutions : Automatisation du forage et de la production.
- Integrated Well Construction : Gestion de projets de construction de puits intégrés.
- Integrated Reservoir Performance : Gestion de la production, de la récupération et des performances des actifs.

2. Reservoir Performance (RP)

Cette division offre des technologies et des services centrés sur l'optimisation de la productivité et l'évaluation de la performance des réservoirs, en termes de comportement des fluides, leurs propriétés, leur composition, ainsi que certaines variables telles que la température et la pression.

Elle inclut trois business lines :

- Reservoir Performance Evaluation : Services de diagrapie, tests en fond de trou, échantillonnage et analyse des fluides et des roches.
- Reservoir Performance Intervention : Tubing enroulé, tests de surface, slickline, perforation et intervention par diagrapie.

- Reservoir Performance Stimulation : Gestion du sable et stimulation.

3. Well Construction (WC)

Cette division regroupe une gamme complète de produits et services visant à maximiser l'efficacité du forage et le contact avec le réservoir, pour assurer une extraction d'hydrocarbures optimale. Les lignes de services comprennent :

- Well Construction Measurement : Acquisition de données de forage.
- Well Construction Drilling : Forage directionnel et trépané.
- Well Construction Fluids : Fluides de forage et cimentation des puits.
- Well Construction Equipment : Rigs de forage et équipements, équipements de contrôle de la pression.

4. Production Systems (PS)

Cette division stimule l'innovation technologique et l'intégration complète des systèmes, de l'interface réservoir-puits au midstream, pour maintenir les puits en production et optimiser la récupération des ressources. Elle comprend les lignes de services suivantes :

- Well Production Systems : Systèmes de complétion et de levage artificiel en fond de trou.
- Surface Production Systems : Têtes de puits, services de fracturation et pompes de production de surface.
- Subsea Production Systems : Systèmes de production et de traitement sous-marins.
- Midstream Production Systems : Vannes, systèmes de traitement, chimie de production et installations.

En 2025, SLB a annoncé une nouvelle organisation visant à renforcer l'efficacité opérationnelle et à réduire les coûts. Cette restructuration inclut la création d'une fonction de performance dirigée par un directeur de la performance, englobant diverses opérations telles que la sécurité, l'intégrité opérationnelle et les services commerciaux mondiaux. L'objectif est de mettre en œuvre une nouvelle structure fonctionnelle mondiale couvrant les fonctions, les divisions, les bassins et les unités géographiques.

Cette réorganisation reflète l'engagement de SLB à s'adapter aux évolutions du secteur énergétique et à promouvoir une croissance alignée sur les nouveaux impératifs de l'industrie.

Le tableau suivant issu de rapports internes de l'entreprise présente l'organisation interne de SLB à travers ses principales divisions et Business Lines. Il reflète la structuration des activités de l'entreprise selon les domaines d'expertise technique et les segments de services proposés à l'échelle mondiale.

Divisions	Digital & Integration	Reservoir Performance	Production Systems	Well Construction
	London	Paris	Houston	Houston
Business Lines	Digital Geoscience Solutions Seismic and Geoscience	Reservoir Performance Evaluation Wireline evaluation services, downhole testing and reservoir sampling & analysis	Well Production Systems Completions and downhole artificial lift systems	Well Construction Measurement Drilling data acquisition
	Digital Operations Solutions Drilling and Production Automation		Surface Production Systems Wellheads and surface production pumps	Well Construction Drilling Directional drilling and bits
	Integrated Well Construction Integrated Well Construction Project Management	Reservoir Performance Intervention Coiled tubing, surface testing, slickline, perforating and wireline intervention	Subsea Production Systems Subsea equipment and processing	Well Construction Fluids Drilling fluids and well cementing
	Integrated Reservoir Performance Production, Recovery, and Asset Performance Management	Reservoir Performance Stimulation Sand management and stimulation	Midstream Production Systems Process facilities and production technologies	Well Construction Equipment Drilling Rigs and equipment, Pressure control equipment

Tableau 1.2 : Divisions et Business Lines de SLB (SLB private)

1.1.4 Présentation de SLB North Africa

SLB, leader mondial des services et technologies pour l'industrie pétrolière et gazière, déploie ses activités en Afrique du Nord à travers sa division SLB NAF (North Africa GeoUnit). Cette région, riche en hydrocarbures, constitue un pôle stratégique majeur, notamment grâce aux ressources du Sahara algérien et du désert libyen.

La carte ci-dessous élaborée par les auteurs à partir de données internes présente l'étendue géographique des opérations de SLB en Afrique du Nord, en mettant en évidence les pays couverts par la région NAF.



Figure 1.3 : Présence de SLB en région NAF

Pour chaque pays, SLB compte plusieurs sites d'activité, le tableau suivant regroupe ces derniers pour chaque pays de la région NAF.

Pays	Algérie	Libye	Tunisie
Bases	Hassi Messaoud (3 sites) Hassi Berkine Ain Salah	BenGhazi Tripoli	Golf de Gabes

Tableau 1.3 : Sites de SLB NAF - Compilation des auteurs à partir de la base logistique SLB

Pour s’adapter aux spécificités économiques et réglementaires locales, SLB a mis en place différentes structures juridiques (succursales, joint-ventures, filiales), facilitant ses collaborations avec des partenaires de premier plan tels que SONATRACH, ENI, G-Berkine, WAHA ou encore PERNCO.

L’entreprise offre une gamme complète de services, incluant le forage, la complétion, la gestion des réservoirs, l’optimisation de la production, le raffinage et les solutions numériques avancées.

1.1.5 Présentation de SLB Algérie

Présente en Algérie depuis 1955, SLB (anciennement Schlumberger) est un leader des services et technologies pour l’industrie pétrolière et gazière. Elle opère sous deux entités juridiques :

- Service Pétrolier Schlumberger (SPS)
- Compagnie d’Opérations Pétrolières Schlumberger (COPS)

L’Algérie représente un marché stratégique pour SLB NAF (North Africa GeoUnit), générant plus de 60 % du chiffre d’affaires de cette unité. Son siège social est situé à Alger, à Hydra.

Présence et Implantation

Pour répondre aux exigences du secteur, SLB dispose de plusieurs bases opérationnelles dans le sud de l’Algérie, lui permettant d’assurer un accès rapide aux puits pétroliers.

Ces bases sont situées dans les principales régions d’exploitation :

- Hassi Messaoud (MD1, MD2, MD3),
- In Salah,
- Alger – HQ,
- Hassi Berkine.

SLB est également active dans le bassin d’Illizi et maintient une présence stratégique sur le littoral algérien.

Activités et Services

SLB offre une gamme complète de services à ses clients, parmi lesquels SONATRACH, ENI, G-Berkine et le Ministère Algérien de l'Énergie et des Mines. Ces partenariats lui confèrent plus de 70 % des parts du marché des services pétroliers en Algérie.

Les principaux services fournis incluent :

- Études sismiques et géologiques
- Forage et complétion des puits
- Optimisation et gestion des réservoirs
- Vente de technologies et d'équipements pétroliers

Grâce à son expertise et à son ancrage historique en Algérie, SLB continue d'être un acteur clé dans le développement et l'optimisation de l'industrie pétrolière et gazière du pays.

1.2 La Supply Chain chez SLB

Pour garder sa position sur le marché, SLB a mis en place une Supply Chain robuste et agile capable d'optimiser les coûts tout en garantissant des délais de livraison rapides et une qualité de service élevée. Avec des opérations réparties sur plus de 120 pays, l'entreprise pilote une logistique mondiale qui s'appuie sur des hubs stratégiques et un réseau de fournisseurs et partenaires logistiques.

1.2.1 Organisation Globale de la Supply Chain chez SLB

La Supply Chain de SLB est divisée en plusieurs grandes fonctions interconnectées qui assurent la gestion optimale des flux de produits et d'informations :

1.2.1.1 Global Supply Chain & Procurement (GSC&P)

Le département GSC&P est chargé de l'ensemble du processus d'approvisionnement et de gestion logistique, incluant :

- La sélection des fournisseurs et la gestion des contrats.
- La gestion des commandes et des paiements (Procure-to-Pay).
- La gestion des entrepôts et des stocks.
- La planification et l'exécution des expéditions internationales.

1.2.1.2 Global Oilfield Logistics & Distribution (GOLD)

GOLD est une structure dédiée à l'optimisation de la logistique mondiale de SLB. Elle regroupe les activités de transport, de stockage et de distribution, et joue un rôle clé dans

l'import-export.
Elle s'appuie sur :

- Des Distribution Service Centers (DSC) : Des hubs régionaux qui assurent le stockage et la redistribution des équipements.
- Un réseau de transport multimodal (maritime, aérien, terrestre) optimisé pour assurer un acheminement rapide et à moindre coût.

1.2.1.3 Flux de la Supply Chain chez SLB

La Supply Chain de SLB gère plusieurs types de flux, en fonction de l'origine et de la destination des produits :

1. Les flux d'approvisionnement internationaux : Ils concernent les achats effectués auprès de fournisseurs situés dans d'autres pays et transitent via les DSC avant d'être redistribués aux sites opérationnels.
2. Les flux de distribution interne : Ils concernent les équipements déjà en stock dans un DSC et expédiés vers un site opérationnel SLB.
3. Les flux de retour et de reconditionnement : SLB met en place des processus de reverse logistics pour récupérer et remettre en état certains équipements.

Pour assurer la distribution continue et efficace, SLB s'appuie sur quatre hubs principaux qui sont implantés dans des sites de fabrication stratégiques, permettant ainsi de répondre efficacement aux besoins des différentes entités de l'entreprise tout en optimisant les délais de livraison.

Cette carte illustre la localisation des principaux hubs logistiques de SLB à l'échelle mondiale, soulignant leur rôle stratégique dans le soutien aux opérations régionales (SLB private).



Figure 1.4 : Carte de distribution des Hubs SLB dans le monde

À côté de cette organisation en hubs, la performance de la Supply Chain repose également sur des décisions stratégiques en matière de modes de transport.

1.2.2 Processus d'Import-Export

1.2.2.1 Typologie des flux d'import-export chez SLB

SLB distingue deux types d'expéditions :

- Expéditions GOLD : Ces expéditions concernent les commandes passées auprès de fournisseurs situés dans un pays différent de celui du site demandeur. Elles nécessitent une gestion rigoureuse des formalités douanières et de transport international.
- Expéditions non-GOLD : Ce sont les expéditions locales, effectuées entre un site SLB et un fournisseur du même pays. Elles sont généralement plus simples à gérer, avec moins de contraintes réglementaires.

Ces expéditions concernent :

- L'importation de pièces détachées et d'équipements pétroliers depuis les États-Unis, l'Europe et l'Asie vers les centres d'opération en Afrique du Nord.
- L'exportation de matériel usagé ou recyclé vers des centres de maintenance et de reconditionnement situés en Europe ou ailleurs.
- Le transit de composants spécifiques entre les hubs logistiques en fonction des besoins des projets de forage et d'exploration.

L'un des défis majeurs est l'optimisation de ces flux pour réduire les délais de livraison et maîtriser les coûts de transport et de stockage.

1.2.2.2 Processus opérationnel d'Import-Export

Le processus d'importation et d'exportation des marchandises implique plusieurs étapes essentielles, chacune ayant pour objectif d'assurer un acheminement efficace, sécurisé et conforme aux normes en vigueur. Ce processus se divise en quatre grandes phases, permettant à Schlumberger de gérer ses expéditions de manière optimale tout en répondant aux exigences de ses clients.

1. Planification de l'Expédition

La première étape consiste à définir tous les paramètres clés de l'expédition. Ces paramètres incluent le poids, le volume, les délais de livraison et les exigences spécifiques liées aux marchandises. En fonction de ces critères, le mode de transport le plus approprié est choisi :

- Transport maritime, selon les modalités d'expédition en fonction du volume de la cargaison et des besoins en termes de délais.

- Transport aérien convenant particulièrement aux marchandises présentant un rapport valeur/poids élevé, aux produits périssables, rapidement obsolètes, requis en urgence ou coûteux à manipuler et à stocker.
- Transport routier international, principalement utilisé pour les expéditions en provenance du hub de Rotterdam. Toutefois, cette méthode présente une complexité accrue en raison des disparités réglementaires entre les pays.

La figure ci-dessous illustre le schéma décisionnel pour la sélection des modes de transport chez SLB.

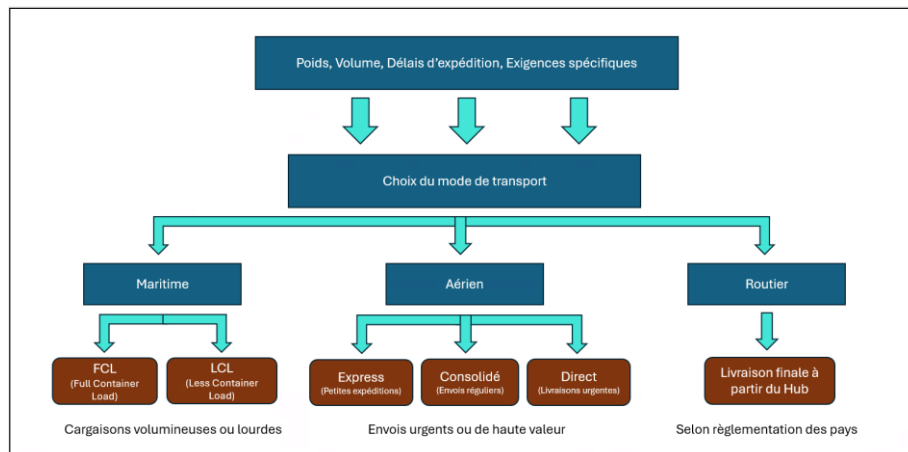


Figure 1.5 : Processus de sélection du mode de transport logistique

2. Sélection du Transporteur

Une fois le mode de transport déterminé, il est crucial de sélectionner un transporteur fiable et adapté aux spécificités de l'expédition. Schlumberger collabore exclusivement avec des prestataires agréés, garantissant ainsi une gestion efficace des risques et une couverture d'assurance adéquate.

La figure suivante permet de distinguer les différents types de partenaires logistiques de SLB

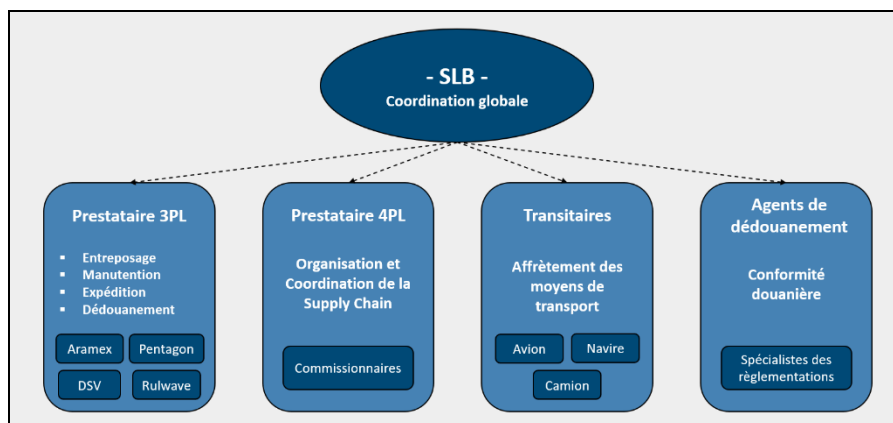


Figure 1.6 : Ecosystème des partenaires logistiques de SLB

Cette sélection est réalisée avec soin, en collaboration entre les départements Procurement & Sourcing, qui négocient les conditions tarifaires, et Distribution, qui assure le suivi des performances des prestataires.

3. Réception et Dédouanement à Destination

Une fois les marchandises arrivées à destination, l'agent de dédouanement prend en charge la gestion des formalités douanières. Cela inclut la vérification des documents nécessaires (facture, certificat d'origine, connaissance, etc.) pour garantir un passage rapide et conforme des marchandises à travers les frontières. Après avoir été dédouanées, les marchandises sont transférées vers un entrepôt local ou directement vers le site d'exploitation, où elles subissent une inspection pour en vérifier la conformité et la qualité.

4. Distribution Finale et Suivi

La dernière étape du processus consiste à livrer les marchandises à leur destination finale. Selon les besoins, le transport routier local ou le cross-docking (transfert direct sans stockage) peuvent être utilisés pour optimiser les délais de livraison. Tout au long de cette phase, des indicateurs de performance clés (KPIs) tels que le coût, le délai et la qualité sont scrupuleusement suivis afin de garantir que les objectifs sont atteints. Ces informations permettent à Schlumberger d'évaluer l'efficacité de ses processus logistiques et d'ajuster ses stratégies pour les prochaines expéditions.

1.2.2.3 Cartographie du Processus Import-Export chez SLB

La région Afrique du Nord (NAF) est approvisionnée par plusieurs hubs logistiques mondiaux. Ces centres constituent les principaux points d'expédition de matériel, d'équipements et de consommables vers les bases opérationnelles de SLB en Algérie, Tunisie et Libye.

La multiplicité des points de départ a un impact direct sur la complexité du processus import-export. Chaque expédition peut être soumise à des délais et à des coûts différents selon le lieu d'origine, ce qui complique la planification centralisée et la visibilité globale sur la chaîne d'approvisionnement.

Ce processus repose sur des flux réglementés qui impactent directement la gestion des stocks, les coûts logistiques et la fluidité des opérations. Il est crucial de distinguer deux types d'importations, permanente et temporaire.

Chaque régime présentant des avantages, des contraintes et des implications distinctes sur la Supply Chain. Le tableau suivant compare ces deux approches selon plusieurs critères clés, afin d'en éclairer les impacts sur les opérations de la région NAF :

<i>Critères</i>	<i>Importation/Exportation Temporaire</i>	<i>Importation/Exportation Permanente</i>
Finalité	Utilisation provisoire avec obligation de réexportation	Acquisition définitive pour consommation ou intégration dans les actifs
Régime douanier	Suspension des droits et taxes sous condition de réexportation	Paiement intégral des droits et taxes douaniers
Avantages économiques	Optimisation des coûts en évitant des frais douaniers élevés	Accès immédiat aux biens sans contraintes de durée
Contraintes réglementaires	Suivi strict des délais et conformité aux régimes de réexportation	Processus rigide mais sans obligation de suivi post-importation
Impact sur la Supply Chain	Flexibilité accrue pour projets temporaires et logistique allégée	Intégration complète dans la chaîne d'approvisionnement et meilleure planification des stocks
Risques et limitations	Pénalités en cas de non-réexportation, suivi administratif lourd	Coût d'entrée plus élevé, risques d'erreurs déclaratives impactant les finances

Tableau 1.4 : Comparaison des processus I/E temporaire et permanent

La maîtrise de ces deux processus est un enjeu stratégique pour SLB. Une mauvaise gestion des statuts douaniers peut entraîner des surcoûts inutiles, des blocages en douane et des pertes financières importantes.

Cartographie du processus Import-Export

Afin de mieux visualiser les différentes étapes du processus d'import-export, nous proposons une cartographie détaillée de celui-ci, en distinguant les deux types de flux pris en charge par SLB : l'import-export permanent et l'import-export temporaire. Cette représentation permet de clarifier le déroulement opérationnel propre à chaque modalité et d'identifier les spécificités associées à chaque scénario logistique.

a) Import-Export permanent : cette opération permet l'intégration des équipements dans les comptes locaux, la valorisation des actifs du pays et une plus grande autonomie.

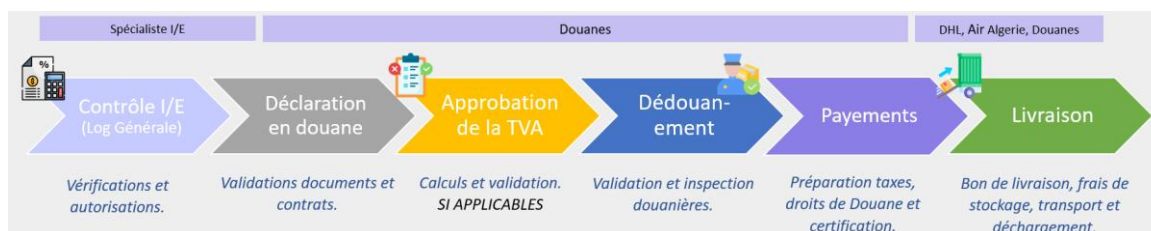


Figure 1.7 : Flux de l'Importation permanente

L'importation permanente repose sur une gestion documentaire stricte. Toute erreur dans la déclaration peut engendrer des retards importants et des coûts supplémentaires liés aux droits de douane ou aux pénalités.



Figure 1.8 : Flux de l'importation permanente

L'exportation est souvent perçue comme une simple formalité, mais elle joue un rôle clé dans la stratégie globale de SLB. Une mauvaise gestion peut entraîner des refus en douane, des coûts additionnels de transport et des délais non maîtrisés.

b) Import-Export temporaire : cette opération nous évite de payer des droits de douane élevés sur des équipements coûteux qui ne resteront pas dans le pays. Cependant, elle nécessite un suivi administratif minutieux.

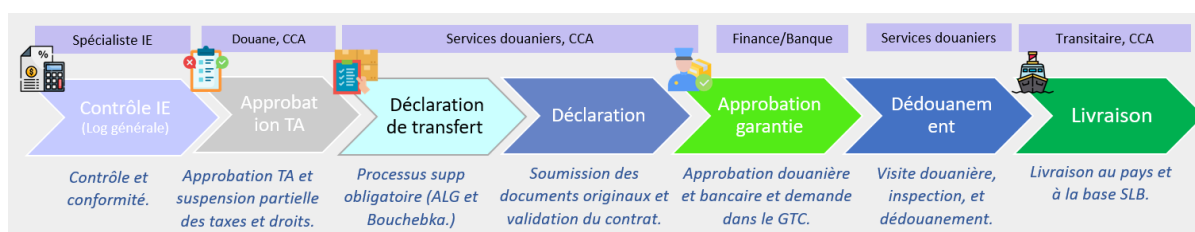


Figure 1.9 : Flux de l'importation temporaire

L'importation temporaire nécessite un suivi rigoureux des formalités douanières. Toute non-conformité peut entraîner des retards et des frais additionnels, notamment liés aux taxes suspendues ou aux pénalités.

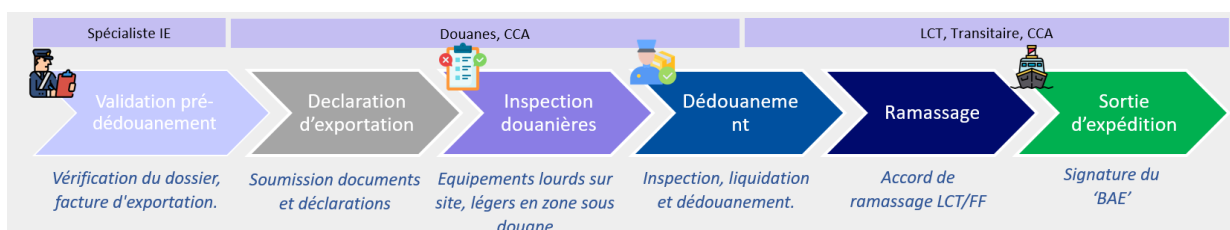


Figure 1.10 : Flux de l'exportation temporaire

L'exportation temporaire implique une gestion documentaire précise. Toute erreur dans les déclarations ou le respect des procédures peut occasionner des retards significatifs et des coûts supplémentaires liés aux inspections et formalités douanières.

L'analyse des processus d'import-export, appliquée spécifiquement au contexte de la région NAF (Algérie, Tunisie, Libye), révèle une certaine lourdeur des procédures douanières.

La complexité administrative, la multiplicité des documents requis, ainsi que les délais d'approbation variables selon les pays, constituent des freins à l'agilité logistique. Cette situation impacte la fluidité des opérations et renforce la nécessité d'optimiser et de simplifier les flux pour répondre efficacement aux besoins des bases opérationnelles locales.

L'étude détaillée des circuits import/export et des opérations en amont met en lumière plusieurs enjeux logistiques, réglementaires et organisationnels, qu'il convient désormais d'analyser de manière structurée à travers un diagnostic global de la situation.

1.3 Diagnostic interne et contextuel de la supply chain SLB

Afin de cerner avec précision l'environnement dans lequel évolue SLB en Afrique du Nord, le diagnostic repose sur une double approche complémentaire : l'analyse du contexte externe et l'étude des données internes.

D'une part, l'analyse PESTEL a été mobilisée pour évaluer les grands facteurs exogènes (politiques, économiques, sociaux, technologiques, environnementaux et légaux) influençant les opérations logistiques dans trois pays clés : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Cette approche systémique permet de comprendre les risques, les contraintes et les opportunités propres à chaque contexte national, et de poser les bases d'une réflexion stratégique sur le maillage logistique régional.

D'autre part, une analyse approfondie des données internes de SLB (flux d'importation, délais, coûts, niveaux de service) a permis d'identifier plusieurs dysfonctionnements opérationnels et contraintes structurelles.

La confrontation de ces deux niveaux d'analyse offre une vision globale, cohérente et ancrée dans la réalité, essentielle pour orienter des recommandations pertinentes en matière de localisation de hub et d'optimisation du réseau de distribution.

1.3.1 Évaluation du macro-environnement logistique régional via l'analyse PESTEL

L'analyse PESTEL constitue un outil reconnu en stratégie pour évaluer l'influence de l'environnement macro-économique sur les décisions logistiques. Elle permet de structurer l'étude des facteurs externes selon six dimensions clés : politique, économique, socioculturelle, technologique, environnementale et légale. Ce cadre méthodologique a été privilégié dans notre étude en raison de sa capacité à identifier de manière transversale les risques, les contraintes et les leviers d'optimisation dans des contextes géopolitiques complexes comme ceux de l'Afrique du Nord.

Le choix de l'approche PESTEL s'appuie sur des références établies en management stratégique (Johnson et al., 2020 ; Grant, 2019) qui la considèrent comme un préalable pertinent aux décisions de localisation ou de redéfinition de réseau logistique. Il s'agit ici non seulement d'évaluer l'attractivité logistique des pays étudiés, mais aussi d'anticiper les facteurs d'instabilité pouvant impacter durablement les opérations de SLB.

Les données mobilisées proviennent d'un croisement de sources : rapports d'institutions internationales (Banque mondiale, FMI, Transparency International), études sectorielles (Oxford Business Group, IEA), publications académiques, ainsi que d'entretiens informels avec des collaborateurs SLB sur site. Cette diversité de sources garantit à la fois une profondeur analytique et une contextualisation pertinente.

- **Facteurs politiques**

Facteurs Politiques	Algérie	Tunisie	Libye
Stabilité politique	Stabilité relative, bien que le pays ait traversé des mouvements sociaux et des tensions récentes.	Stabilité affaiblie depuis 2011 et tensions entre exécutif et judiciaire, soulevant des doutes sur l'indépendance des pouvoirs.	Instabilité marquée, État fragmenté entre factions rivales et absence d'autorité centrale stable depuis la chute de l'ancien régime.
Sécurité	Risque interne faible, mais vigilance requise aux frontières avec le Sahel et la Libye.	Sécurité globale maîtrisée, mais tensions sociales et manifestations fréquentes.	Risque élevé : insécurité persistante, présence de conflits armés et milices actives.
Gouvernance	Gouvernance opaque, bureaucratie lourde, corruption persistante.	Gouvernance fragile, manque de transparence et instabilité juridique croissante.	Faiblesse extrême de l'État de droit, absence de système juridique cohérent.
Relations internationales	Relations diplomatiques stratégiques avec la Russie, la Chine, l'Europe et l'Afrique.	Relations solides avec l'UE, mais fragilisées par l'instabilité intérieure.	Diplomatie restreinte, isolement relatif dû à la guerre civile prolongée.
Politique d'investissement étranger	Volonté d'investissement dans les infrastructures portuaires avec le soutien de plusieurs pays.	Politique ouverte aux IDE, mais freinée par les incertitudes politiques et fiscales.	Risque élevé pour les investisseurs étrangers (sécurité juridique incertaine).

Tableau 1.5 : Analyse des facteurs politiques

- **Facteurs économiques**

Facteurs Économiques	Algérie	Tunisie	Libye
Croissance du PIB	Croissance d'environ 3,8 %, en baisse en raison de la chute des prix du gaz naturel et du retard dans les investissements en hydrocarbures.	Redressement progressif avec une croissance de 2.5% selon le FMI, économie stagnante et surendettement 80% du PIB.	Croissance variable (4-5 %), fortement dépendante du pétrole (58%) et sujette aux blocages de production.
Structure économique	Forte dépendance au secteur énergétique (93 % des exportations en hydrocarbures), bien que des initiatives de diversification soient en cours.	Économie diversifiée (industrie, agriculture, tourisme), mais faible compétitivité.	Économie rentière, peu diversifiée, dépendance extrême aux exportations pétrolières.
Taux d'inflation	Autour de 7–8 %, en baisse mais toujours élevé.	Environ 7%, reste élevée mais sous contrôle.	Taux très volatil, variant en fonction des périodes de conflit/d'arrêt des exportations (pouvant dépasser 15%).
Infrastructure logistique	Ports saturés (ex. Alger), infrastructures vieillissantes, mais des projets de développement sont en cours.	Ports (Rades, Bizerte) fonctionnels mais congestionnés, zones industrielles présentes.	Infrastructures gravement endommagées par les conflits ; ports et routes partiellement opérationnels.
Accessibilité des matières/fournisseurs	Marché local peu développé, forte dépendance aux importations.	Écosystème manufacturier existant, avec des fournisseurs locaux disponibles.	Approvisionnement difficile, instabilité logistique majeure.
Risque de change/devises	Contrôle strict des devises, difficulté à transférer les capitaux.	Taux de change flottant sous pression, accès limité mais possible au marché international.	Système bancaire fragmenté, transferts de fonds complexes et risqués.
Accès au financement /IDE	Faible attractivité pour les IDE ; cadre réglementaire peu incitatif.	Ouvert aux IDE, mais les incertitudes politiques et l'absence d'accord avec le FMI freinent les investissements.	Climat extrêmement défavorable aux investissements étrangers qui sont quasiment absents.

Tableau 1.6 : : Analyse des facteurs économiques

- **Facteurs sociaux**

Facteurs Sociaux	Algérie	Tunisie	Libye
Structure démographique	Population jeune, forte croissance démographique, concentration urbaine croissante.	Population jeune, urbanisée et en transformation, Taux de chômage préoccupant.	Population jeune mais en exode, déséquilibres démographiques régionaux importants.
Niveau d'éducation	Amélioration progressive, mais inadéquation entre formation et besoins du marché du travail.	Système éducatif performant avec décalage entre formation et besoins du marché.	Besoin de formation technique et d'un climat de confiance.
Culture du travail / productivité	Rigidité culturelle dans les organisations publiques, faible culture d'entreprise dans certaines régions.	Meilleure culture entrepreneuriale, ouverture au changement, productivité correcte dans le privé.	Faible productivité, peu de discipline de travail, désorganisation du tissu social.
Disponibilité de main-d'œuvre	Main-d'œuvre abondante, mais peu spécialisée.	Main-d'œuvre plus qualifiée, coût du travail compétitif.	Pénurie de main-d'œuvre qualifiée, nombreux départs à l'étranger.
Langues et compétences linguistiques	Langue et culture francophone et arabophone influençant les partenariats tournés vers la France et le Moyen-Orient.	Bilinguisme arabe/français courant, bonne maîtrise de l'anglais dans les métiers liés à l'international.	Arabe dominant, faible maîtrise des langues étrangères dans les zones non urbaines.
Stabilité sociale	Relative stabilité mais tensions sociales ponctuelles, méfiance vis-à-vis des réformes.	Stabilité sociale relative, mais vulnérable aux crises politiques.	Instabilité sociale généralisée, conflits ethniques et tribaux dans certaines régions.
Acceptation de l'investissement étranger	Méfiance historique vis-à-vis des multinationales, ouverture récente mais encore contrôlée.	Bonne acceptation dans les secteurs industriels et logistiques, expérience positive avec les IDE.	Très faible, voire hostile en fonction des groupes locaux en présence.

Tableau 1.7 : Analyse des facteurs sociaux

- **Facteurs technologiques**

Facteurs technologiques	Algérie	Tunisie	Libye
Infrastructures logistiques	Infrastructures portuaires et aéroportuaires existantes mais vieillissantes et limitées mais des projets d'investissement sont évoqués.	Ports modernes (Rades, Bizerte), et infrastructures technologiques relativement développées par rapport à la région.	Infrastructures technologiques limitées et ports peu modernisés en raison des conflits prolongés et du manque d'investissement.
Qualité des transports (routes, rails)	Réseau routier correct, mais rail peu performant et désuet.	Réseau routier dense et bitumé, liaisons inter-zones industrielles possibles, rail faible.	Réseau routier endommagé, transport interurbain difficile.
Digitalisation	Digitalisation en retard, lente modernisation des services douaniers.	Meilleure digitalisation régionale et lancement de projets de transport intelligent et d'électrification.	Pas de stratégie de digitalisation et d'automatisation
Développement technologique	Dépendance aux technologies importées, faible culture R&D locale.	Écosystème TIC actif (pôles technologiques comme El Ghazala), niveau de R&D supérieur à la moyenne régionale.	Dépendance extérieure, pas de stratégie nationale technologique structurée.
Connectivité Internet	Bonne couverture urbaine mais avec disparités régionales.	Bonne couverture nationale, infrastructures télécoms stables, Développement accéléré des réseaux et fibres.	Connectivité faible, souvent instable et très dépendante de la situation sécuritaire.
Capacité d'innovation	Lancement de programme de soutien aux start-ups et incubateurs, bien que l'impact soit encore limité.	Écosystème des start-ups en croissance, incubateurs notamment à Tunis et Sfax se multiplient.	Aucun écosystème d'innovation fonctionnel.
Formation technique / ingénierie	Formation disponible mais inadaptée aux exigences internationales en logistique.	Bon niveau de formation en logistique et ingénierie, fort taux d'employabilité technique.	Ingénieurs peu disponibles, fuite des compétences et désertification du marché du travail qualifié.

Tableau 1.8 : Analyse des facteurs technologiques

- **Facteurs environnementaux**

Facteurs environnementaux	Algérie	Tunisie	Libye
Risques climatiques /naturels	Exposition aux sécheresses, à la désertification, faible fréquence de catastrophes majeures.	Risque de stress hydrique critique, zones côtières exposées aux inondations, mais stabilité générale.	Désertification et absence de gestion des risques naturels.
Accès aux ressources (eau, énergie)	Eau : rareté croissante – Énergie : forte disponibilité (gaz).	Eau : stress élevé – Énergie : importée, coût élevé.	Eau : très rare – Énergie : abondante, mais infrastructures énergétiques instables.
Réglementation environnementale	Présente mais peu appliquée, les priorités économiques prédominent.	Législation active (Code de l'environnement), mais moyennement prise en compte.	Quasi-inexistante ou non appliquée, absence de cadre légal stable.
Sensibilité écologique / société civile	Faible pression citoyenne, conscience environnementale en développement.	Société civile plus active, sensibilisation accrue aux enjeux écologiques.	Société civile absente ou réduite à cause du conflit.
Gestion des déchets industriels / pollution	Pratiques encore rudimentaires, peu d'incitations à la gestion durable.	Efforts fournis pour réduire la pollution plastique et préserver les écosystèmes côtiers.	Non prise en charge, abandon des déchets, pollution industrielle non contrôlée.
Adaptation au changement climatique	Politiques en place (Plan Climat) mais mise en œuvre limitée.	Participation à des projets internationaux, plans d'adaptation en cours.	Aucun plan structuré, priorité donnée à la survie économique immédiate.

Tableau 1.9 : Analyse des facteurs environnementaux

- **Facteurs légaux**

Facteurs légaux	Algérie	Tunisie	Libye
Sécurité juridique	Système juridique centralisé et opaque, cadre légal lourd parfois arbitraire, avec des lenteurs administratives.	Climat juridique marqué par une instabilité due aux changements fréquents de législations et application parfois arbitraire des lois	Absence de Sécurité juridique fiable et climat légal incertain
Droit des affaires	Poids important de l'administration publique, interventions fréquentes de l'État, lenteur des procédures.	Droit des affaires aligné partiellement sur le modèle européen, meilleure reconnaissance des pratiques contractuelles.	Très désorganisé, faible reconnaissance des normes contractuelles internationales.
Régime des investissements étrangers	Barrières à l'entrée pour les entreprises étrangères. Cependant, introduction des réformes en assouplissant les restrictions sur la propriété étrangères.	Reforme progressive de la fiscalité et zones franches possibles, encouragement des IDE.	Climat extrêmement défavorable, absence de protection des IDE, risques de nationalisation ou de confiscation.
Accès au foncier industriel	L'accès est bureaucratique, dépend fortement de l'administration locale ou de partenariats publics.	Possible via zones industrielles aménagées, procédures plus claires.	Très difficile : propriété du sol souvent contestée, occupation informelle fréquente.
société civile	Faible pression citoyenne, conscience environnementale en développement.	Société civile plus active, sensibilisation accrue aux enjeux écologiques.	Société civile absente ou réduite à cause du conflit.
Régulation du travail / droit social	Législation rigide, relations sociales peu flexibles, grèves occasionnelles dans les secteurs publics.	Code du travail rigide freinant l'embauche formelle.	Système social en désintégration, absence de protection du travail, risque humain élevé.
Protection de la propriété intellectuelle	Faible protection juridique, application irrégulière.	Relativement bien encadrée, notamment dans les secteurs TIC et services.	Non applicable dans la plupart des cas.
Corruption / pratiques illicites	Corruption perçue comme systémique, impact direct sur les affaires (classement Transparency International).	Présente mais plus encadrée par des mécanismes d'alerte.	Très élevée, aucune transparence institutionnelle.

Tableau 1.10 : Analyse des facteurs légaux

Synthèse comparative

Afin de mieux comparer les trois configurations et d'identifier le pays offrant le cadre le plus favorable, la figure ci-dessous montre une synthèse croisée des résultats PESTEL.

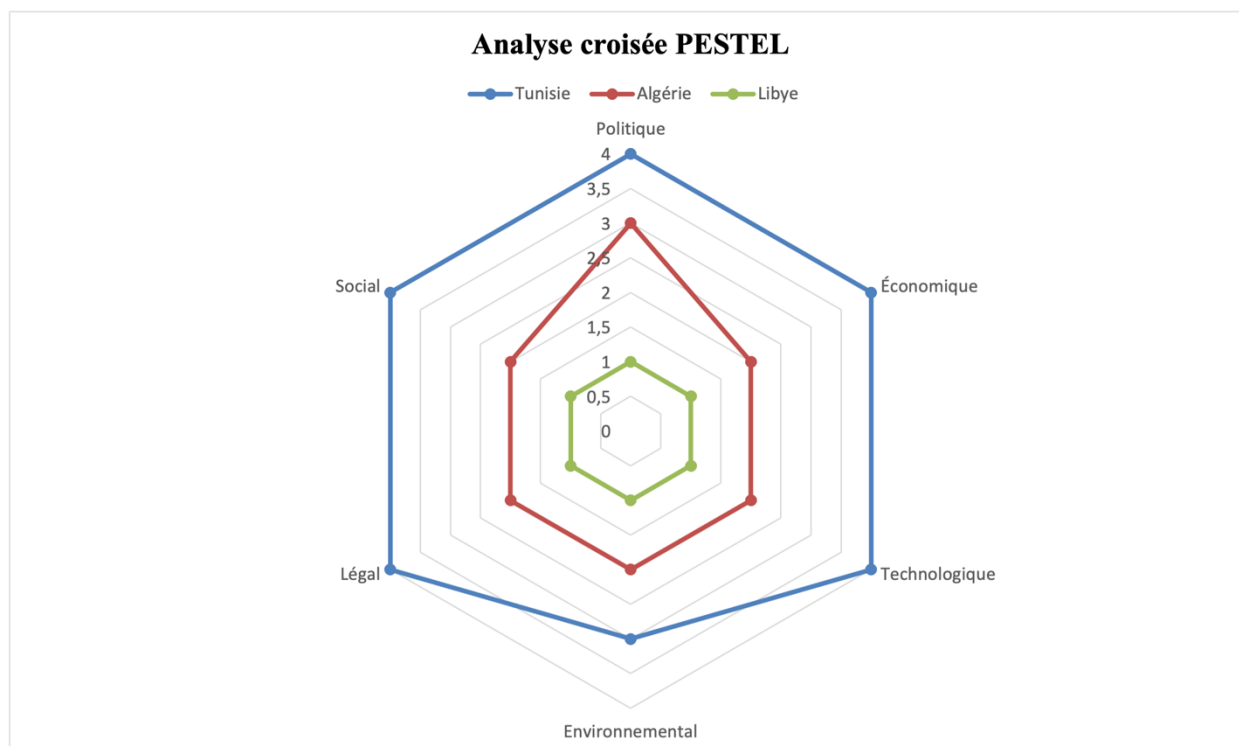


Figure 1.11 : Analyse croisée des résultats PESTEL

L'analyse comparative des environnements macro-économiques, conduite à l'aide du modèle PESTEL, met en évidence un positionnement relativement favorable de la Tunisie au sein de la région Afrique du Nord. Le pays se distingue par une ouverture mesurée aux investissements étrangers, une situation géographique centrale, un développement progressif de ses infrastructures ainsi qu'une stabilité institutionnelle relative par rapport à ses voisins.

Néanmoins, ces éléments doivent être nuancés par la présence de facteurs de fragilité persistants, notamment en ce qui concerne la volatilité politique, certaines contraintes réglementaires, ainsi que des déséquilibres structurels susceptibles de limiter le plein déploiement de son potentiel.

Ce constat invite ainsi à une lecture prudente et nuancée de l'environnement tunisien, en intégrant à la fois les opportunités apparentes et les risques latents, dans une logique d'anticipation et de gestion des incertitudes régionales.

Après avoir dressé un état des lieux du contexte macro-environnemental à travers l'analyse PESTEL, il est essentiel de compléter ce diagnostic par une étude approfondie des données internes de l'entreprise.

1.3.2 Analyse et évaluation quantitative des performances logistiques

1.3.2.1 Méthodologie de traitement et préparation des données

Afin d'analyser les flux logistiques de SLB en Afrique du Nord, nous avons exploité une base de données issue de l'outil interne *ITT | Manage Warehouse*, regroupant l'historique des expéditions sur plusieurs années. Toutefois, cette base, à l'état brut, nécessitait une série de traitements pour en garantir la qualité et la pertinence analytique.

Dans un premier temps, un filtrage géographique a été appliqué pour restreindre l'analyse aux seuls flux à destination de l'Algérie, de la Tunisie et de la Libye, pays constitutifs de la région NAF (North Africa). Les pays dont les flux logistiques reposent sur des approvisionnements ponctuels liés à des projets spécifiques, et ne permettant pas une analyse régulière et comparable, n'ont pas été retenus.

Ensuite, un travail de nettoyage et de normalisation a été mené sur les données. Cela a impliqué:

- La suppression ou l'imputation des valeurs manquantes critiques ;
- La standardisation des noms de hubs d'origine et de destination, initialement codés sous des formats abrégés ;
- La vérification croisée des identifiants géographiques à l'aide de sources externes (Google Maps, CMA CGM) pour garantir la précision des localisations logistiques.

Un autre point clé a consisté à reconstituer les indicateurs opérationnels non fournis directement par la base, comme le nombre d'expéditions par port ou par pays. Ce calcul a été effectué via des outils Excel, puis validé en coordination avec les équipes locales en Libye et en Tunisie, afin d'assurer une cohérence avec la réalité terrain.

Enfin, une analyse exploratoire des volumes a permis d'identifier les hubs d'approvisionnement les plus sollicités. Seuls ceux totalisant plus de 100 expéditions sur la période 2023–2024, soit près de 80 % des flux ont été retenus pour la suite de l'analyse, dans une logique de concentration sur les axes logistiques structurants.

Les tableaux suivants regroupent les fréquences d'expédition depuis différents hubs SLB vers la région NAF pour les deux années de 2023-2024.

Destination frequency per month - for Lybia & Tunisia												
	Year 2023											
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
LY_ABA_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_AKF_A	-	-	1	-	-	-	-	1	-	3	1	-
LY_BEN_A	-	-	-	2	1	-	1	-	1	1	1	2
LY_BEN_P	-	1	4	3	4	6	8	5	7	5	8	4
LY_BEN	1	1	4	5	5	6	9	5	8	6	9	6
LY_KHO_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_KHO_RO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_LMQ_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_MJI_A	1	-	4	1	5	4	10	2	11	11	11	7
LY_SEB_A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_TAG_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_TIP_A	8	48	50	72	92	44	93	84	67	197	151	47
LY_TIP_P	-	-	2	2	1	8	16	2	9	6	16	6
LY_TIP	8	48	52	74	93	52	109	86	76	203	167	53
Lybie	9	49	61	80	103	62	128	94	95	223	188	66
TN_BIZ_A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TN_GAE_P	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
TN_NAB_RO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TN_RDS_P	-	-	-	2	-	-	-	-	1	2	1	-
TN_SBZ_RO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1
TN_SFA_A	-	-	-	-	-	-	-	1	1	2	2	1
TN_SFA_P	-	-	2	1	1	-	-	-	-	1	-	-
TN_SFA	1	3	11	7	30	14	29	23	6	41	35	13
TN_TUN_A	1	3	13	10	31	15	29	25	8	46	40	15
TN_TUN_P	-	-	2	-	5	3	1	-	2	4	1	3
Tunisie	1	3	13	10	31	15	29	25	8	46	40	15
DZ_ALG_A	-	1	7	4	7	2	3	3	2	9	3	-
DZ_HME_A	1	3	19	19	24	21	19	27	16	41	25	19
DZ_AAE_A	-	1	-	1	1	-	1	1	1	1	1	-
DZ_HME_RO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_ALG_P	-	1	6	4	4	1	-	6	5	4	9	3
DZ_DJE_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_SKI_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
DZ_BSK_A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_GJL_A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_ALG_RO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_AAE_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_ALG_RA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Algérie	1	6	32	28	36	24	23	37	24	56	38	22

Tableau 1.11 : Fréquence des expéditions mensuelles pour la Libye, la Tunisie et l'Algérie en 2023

Destination frequency per month - for Lybia & Tunisia												
	Year 2024											
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
LY_ABA_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_AKF_A	3	1	1	3	2	-	2	-	-	2	2	3
LY_BEN_A	6	3	2	4	7	2	4	3	2	2	5	3
LY_BEN_P	5	8	4	12	13	5	10	21	27	17	5	15
LY_BEN	11	11	6	16	20	7	14	24	29	19	10	18
LY_KHO_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_KHO_RO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_LMQ_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_MJI_A	6	16	16	21	26	19	16	22	19	20	34	16
LY_SEB_A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LY_TAG_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
LY_TIP_A	254	186	228	217	260	145	197	196	107	202	225	203
LY_TIP_P	11	10	10	12	19	11	32	36	23	22	7	5
LY_TIP	265	196	238	229	279	156	229	232	130	224	232	208
Lybie	285	224	261	269	327	184	261	278	180	266	278	245
TN_BIZ_A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
TN_GAE_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TN_NAB_RO	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
TN_RDS_P	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TN_SBZ_RO	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TN_SFA_A	11	8	11	8	16	6	8	6	3	8	8	7
TN_SFA_P	1	-	1	1	-	2	-	1	-	-	1	-
TN_SFA	12	8	12	9	16	8	8	7	3	8	9	7
TN_TUN_A	61	28	19	23	19	16	31	14	10	24	16	21
TN_TUN_P	4	2	3	2	1	1	-	-	1	2	2	2
Tunisie	79	39	34	35	36	25	39	21	14	34	28	31
DZ_ALG_A	5	8	1	9	10	20	9	6	11	8	12	9
DZ_HME_A	33	38	25	36	48	26	45	41	46	37	50	43
DZ_AAE_A	-	1	1	-	-	2	-	1	1	-	-	-
DZ_HME_RO	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-
DZ_ALG_P	2	2	6	11	10	1	10	5	-	5	3	1
DZ_DJE_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_SKI_P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_BSK_A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_GJL_A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_ALG_RO	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
DZ_AAE_P	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DZ_ALG_RA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Algérie	40	49	34	57	68	50	65	53	58	50	65	53

Tableau 1.12 : Fréquence des expéditions mensuelles pour la Libye, la Tunisie, l'Algérie en 2024.

1.3.2.2 Analyse des flux et volumes d'exportation NAF

L'analyse des flux logistiques a permis de cartographier les mouvements d'expédition vers les pays de la région NAF, en mettant en lumière les volumes traités, la fréquence des envois et la structure des itinéraires.

Sur la période 2023–2024, les données consolidées indiquent une forte concentration des flux vers trois ports majeurs : Alger (Algérie), Tunis/Sfax (Tunisie) et Tripoli (Libye). Ces points d'entrée constituent les principaux nœuds de réception des équipements et consommables nécessaires aux opérations de SLB dans la région.

La figure suivante illustre la répartition mensuelle des expéditions par pays et mettent en évidence des pics d'activité corrélés aux calendriers opérationnels des sites.

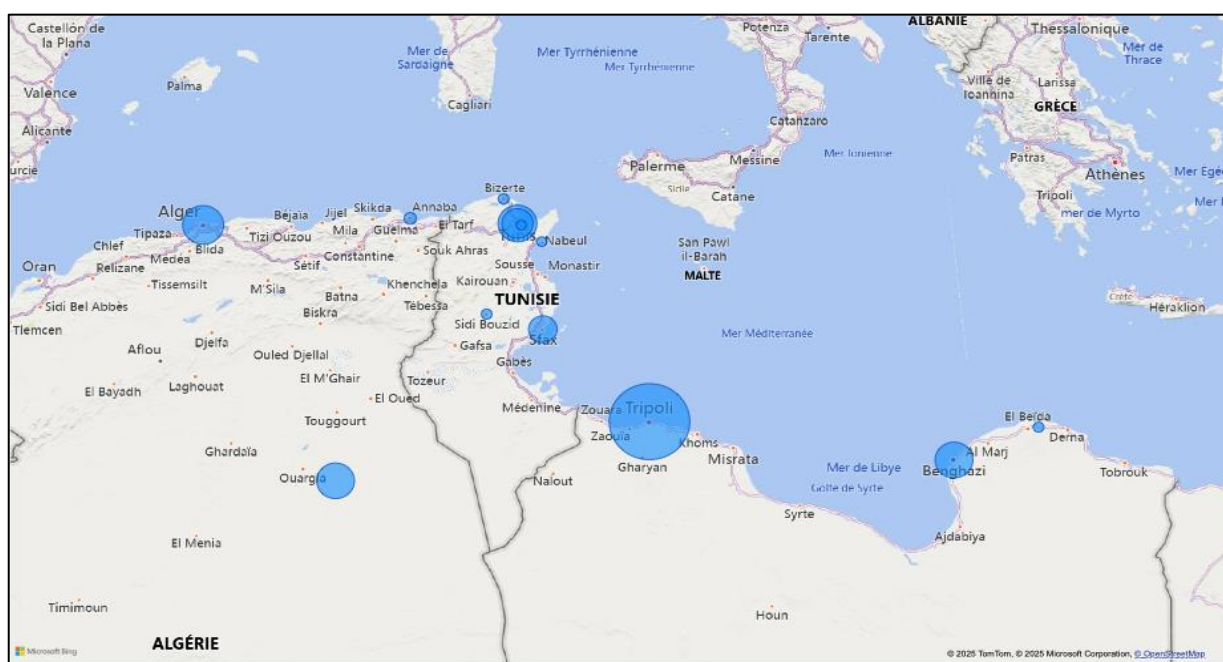


Figure 1.12 : Points de réception principaux de la région NAF

On peut remarquer une forme de concentration des flux sur certaines zones stratégiques, en particulier :

- En Algérie : la majorité des expéditions transitent par la bande littorale nord plus précisément à travers le port d'Alger.
- En Tunisie : Tunis et Sfax dominent largement les points d'entrée, au détriment des plateformes secondaires.
- En Libye : bien que variable, Tripoli reste le principale point d'entrée.

L'étude a également permis d'identifier les hubs logistiques d'approvisionnement majeurs, à l'échelle globale. Parmi les plus actifs figurent Houston, Rotterdam, Dubaï, dont les volumes

cumulés représentent environ 80 % des flux vers l’Afrique du Nord. Cette hiérarchisation a permis de focaliser l’analyse sur les corridors les plus structurants.

La figure ci-dessous montre l’évolution des fréquences moyennes des expéditions par mois pour plusieurs hubs (Dubai, Singapour, USA, Pays-Bas, Grande-Bretagne, France et Chine) sur les années 2023 et 2024.

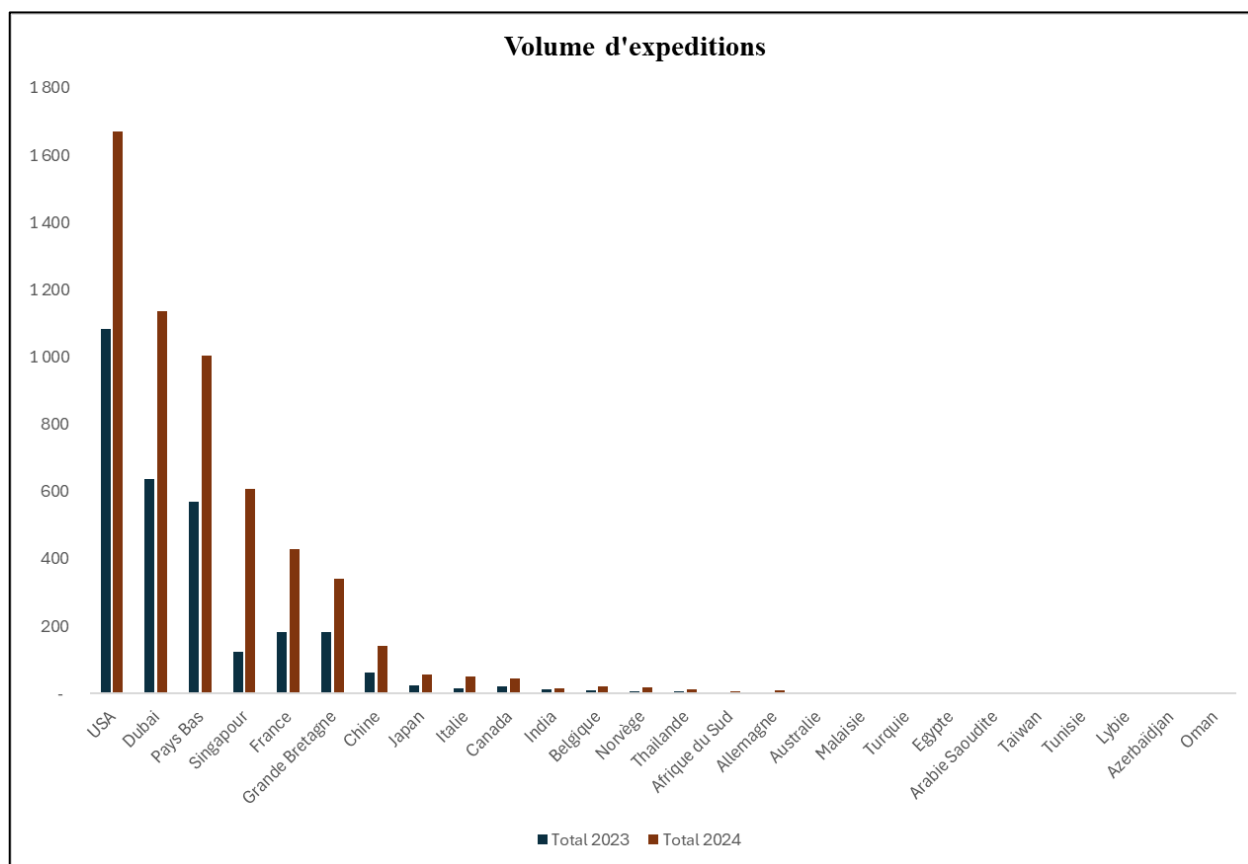


Figure 1.13 : Vision mensuelle des fréquences moyennes par destination et hub potentiel (2023-2024)

Dans un second temps, une représentation géographique des itinéraires logistiques a été réalisée à l’aide du logiciel QGIS, illustrant les connexions entre hubs d’origine et points de réception. Cette visualisation a révélé une grande dispersion géographique des expéditions, avec des itinéraires souvent directs, sans centralisation intermédiaire, ce qui nuit à l’optimisation des flux.

La figure ci-dessous montre les flux d’expéditions entre les différents hubs, corridors et les points de réception de la région NAF :

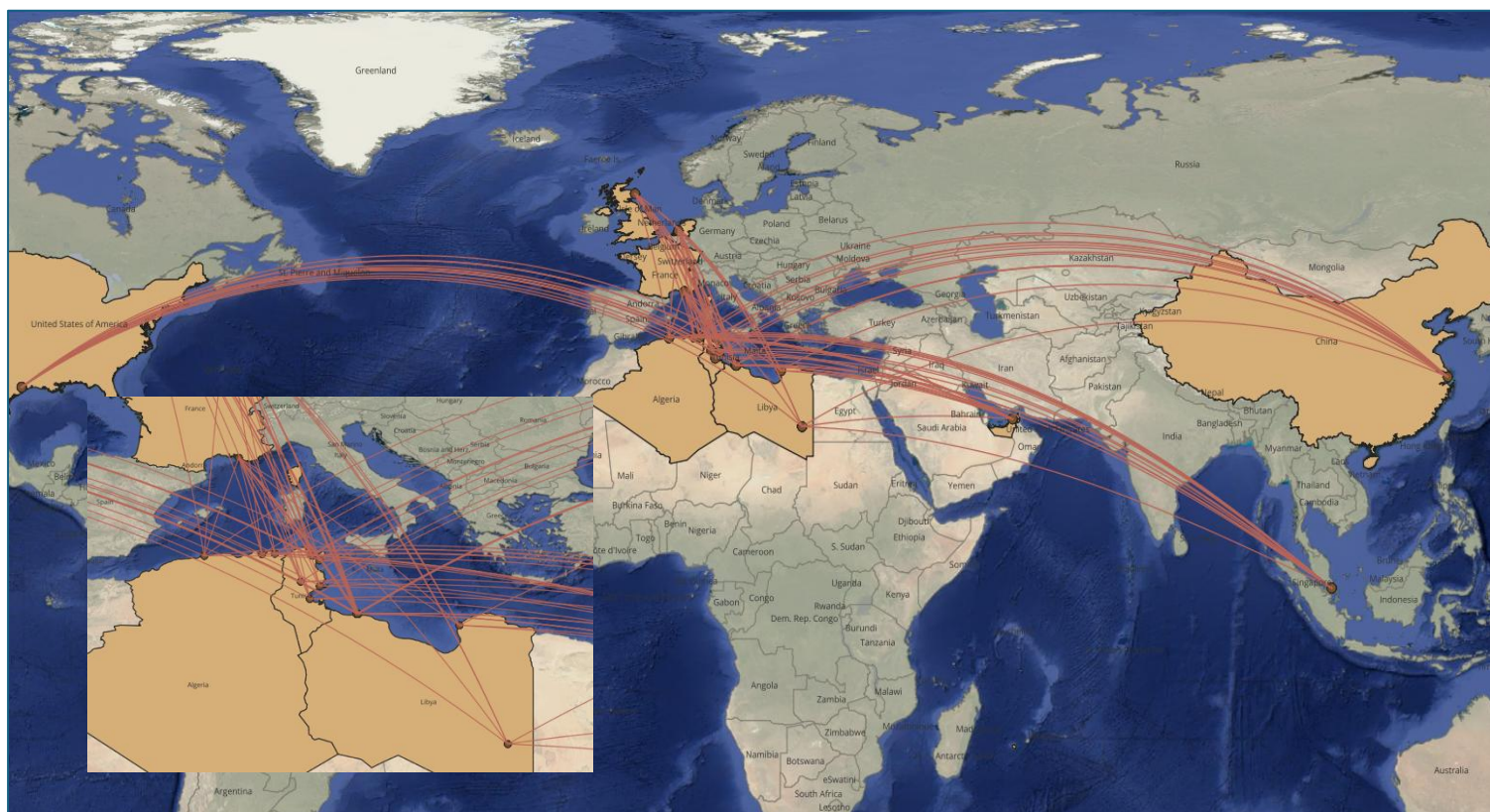


Figure 1.14 : Cartographie des expéditions et flux logistique de la région NAF

Enfin, pour compléter cette lecture globale, une analyse des modes de transport mobilisés a été intégrée à l'étude. Les données révèlent une prédominance écrasante du transport aérien et express, représentant à eux seuls plus de 80 % des expéditions, souvent en petits volumes, avec un coût unitaire élevé. À l'inverse, les modes maritime et routier, bien que plus économiques et adaptés à des envois planifiés, restent marginalement utilisés.

Le graphique ci-dessous met en évidence les proportions respectives du transport aérien, maritime et routier, permettant d'évaluer les choix logistiques opérés et leur impact sur les coûts et la performance globale.

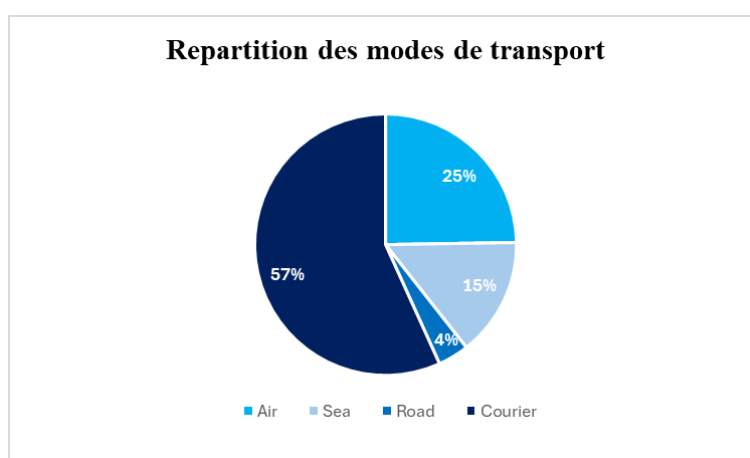


Figure 1.15 : Répartition des modes de transport utilisés en logistique

Cette configuration traduit un pilotage logistique principalement réactif, marqué par des envois urgents, souvent de faible volume, avec un recours accru à des solutions onéreuses. Elle met également en lumière :

- Un manque de synchronisation entre la demande terrain et les expéditions amont,
- Une absence de stratégie de consolidation par lots,
- Une pression logistique sur les équipes locales lors des opérations de dédouanement.

Ces observations soulignent les limites du dispositif actuel et appellent à une réorganisation plus rationnelle du réseau, notamment à travers la mise en place d'un point de regroupement logistique intermédiaire.

1.3.3 Synthèse des constats logistiques et enjeux de réorganisation

L'analyse conjointe des flux physiques, des structures opérationnelles et des contraintes environnementales dans la région NAF a permis de faire émerger plusieurs constats clés.

D'une part, la dispersion des points d'expédition, l'absence de centralisation intermédiaire et la prédominance du transport aérien express traduisent une logistique orientée vers l'urgence, au détriment de la planification et de la rentabilité.

D'autre part, la diversité des régimes douaniers, la complexité administrative, et les spécificités géopolitiques régionales (instabilité en Libye, lourdeurs bureaucratiques en Algérie) accentuent les risques et les coûts, tout en fragilisant la fluidité des opérations.

Sur le plan interne, les données d'expédition confirment une absence de stratégie de consolidation, une faible visibilité sur les flux amont, et un recours insuffisant aux corridors structurants. La Tunisie se démarque comme territoire logistique prometteur, mais reste à replacer dans une réflexion régionale élargie.

1.4 Énoncé de la problématique

Les expéditions vers les pays de la région NAF (Algérie, Tunisie, Libye) sont actuellement réalisées depuis plusieurs hubs mondiaux (Houston, Rotterdam, Dubaï, Singapour) sans point de centralisation.

Cette configuration engendre une dispersion des flux, une hétérogénéité des procédures douanières et une complexité croissante de coordination.

Dans ce contexte, de Supply Chain network design et logistique internationale, la question centrale qui guide cette recherche est la suivante :

Dans quelle mesure la mise en place d'un hub logistique intermédiaire permettrait-elle à SLB de rationaliser ses expéditions vers l'Afrique du Nord en réduisant les coûts logistiques, les délais de transit et la complexité réglementaire ?

Pour répondre à cette problématique, trois questions ont été définies. Elles guideront la revue de littérature ainsi que le développement de la méthode de résolution :

1. Quels sont les facteurs logistiques, économiques et réglementaires qui influencent la performance actuelle des flux vers l'Afrique du Nord dans le cadre des opérations de SLB ?
2. Quelles approches méthodologiques permettent d'identifier le lieu optimal pour implanter un hub logistique dans un contexte international ?
3. Comment évaluer la viabilité économique et opérationnelle d'une structure logistique régionale dans un contexte international incertain ?

Conclusion

Ce premier chapitre a permis de cadrer l'étude en décrivant l'environnement logistique de SLB, les caractéristiques des flux vers l'Afrique du Nord ainsi que les principales contraintes opérationnelles et structurelles rencontrées. L'analyse a mis en lumière certaines limites du dispositif actuel, notamment en termes d'efficacité, de coûts et de résilience, soulignant l'opportunité d'envisager une réorganisation plus adaptée aux enjeux régionaux et globaux.

Sur cette base, le chapitre suivant proposera une démarche méthodologique rigoureuse pour identifier un emplacement optimal de hub régional, en tenant compte à la fois des contraintes logistiques et des objectifs stratégiques de l'entreprise. Cette réflexion sera ensuite étendue à une analyse économique comparative des scénarios retenus, en vue d'éclairer la prise de décision.

CHAPITRE 02 : État de l'art

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons développer les fondements théoriques et méthodologiques essentiels à la compréhension de notre problématique, à savoir la localisation optimale d'un hub logistique dans un contexte de chaîne d'approvisionnement international. L'objectif est de présenter l'ensemble des concepts, modèles et outils utilisés pour analyser les enjeux logistiques identifiés, et proposer des solutions adaptées à travers une démarche structurée.

Nous aborderons dans un premier temps les concepts clés de la gestion de la supply chain, ses niveaux décisionnels et les spécificités du secteur pétrolier. Par la suite, nous exposerons les typologies d'infrastructures logistiques, les modèles mathématiques de localisation et les critères de sélection associés. Enfin, nous détaillerons les approches multicritères et les méthodes d'aide à la décision utilisées pour structurer et justifier le choix du site optimal.

Le schéma suivant présente les étapes qui constitueront ce chapitre :

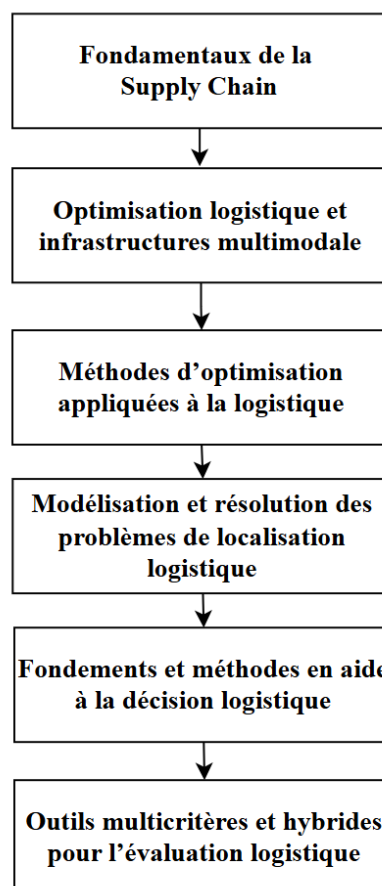


Schéma du chapitre 2

Cette revue constitue le socle de réflexion méthodologique sur lequel reposera notre étude de cas dans les chapitres suivants.

2.1 Concepts fondamentaux de la chaîne logistique

2.1.1 La Chaîne Logistique (Supply Chain)

La Supply Chain est l'ensemble des organisations, ressources, activités, informations et technologies mobilisées pour acheminer un produit ou un service du fournisseur initial jusqu'au client final. Selon l'APICS¹ Dictionary (16e édition), elle comprend toutes les étapes, directes ou indirectes, impliquées dans la satisfaction d'une demande client, depuis les matières premières jusqu'à la livraison du produit fini.

2.1.2 Le Supply Chain Management

2.1.2.1 Définition du Supply Chain Management

Il est important de distinguer logistique et gestion de la chaîne logistique, bien que les deux notions soient étroitement liées. Le *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP², 2013) définit la logistique comme « *la partie de la gestion de la chaîne logistique qui planifie, met en œuvre et contrôle l'efficacité et l'efficience du flux direct et inverse des biens, des services et des informations associées, entre le point d'origine et le point de consommation, dans le but de satisfaire les besoins du client* ». Ainsi, la logistique est une fonction opérationnelle, tandis que la Supply Chain adopte une vision globale et stratégique, intégrant les relations inter-entreprises (Mentzer et al., 2001).

La figure ci-dessous permet de mettre en relief les différences et les points en commun entre ces deux notions :

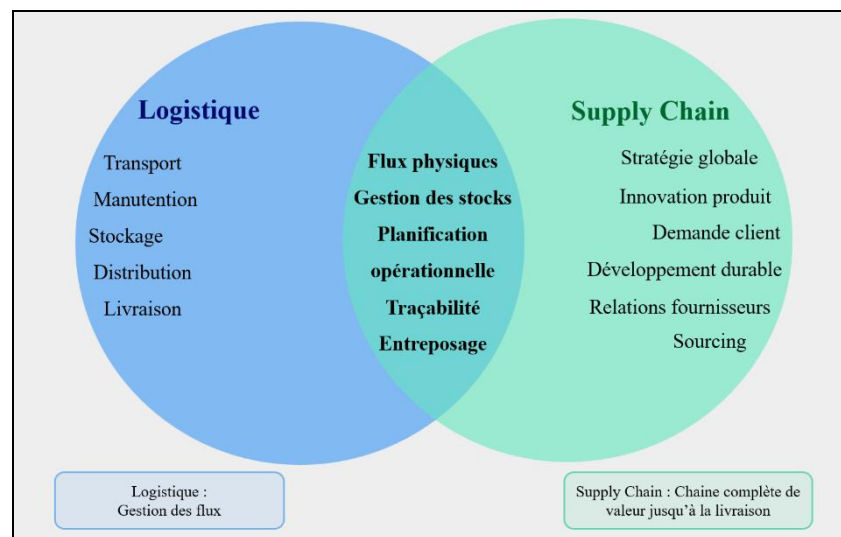


Figure 2.1 : Contraste entre la logistique et la Supply Chain

¹ APICS : Recueil de définitions normalisées des principaux concepts de la gestion des opérations, reconnu comme référence dans le domaine de la supply chain.

² CSCMP : organisation internationale dédiée à la promotion des bonnes pratiques et de la recherche en gestion de la chaîne logistique.

L'un des enjeux majeurs de la Supply Chain réside dans la gestion optimale des flux de l'entreprise, afin de trouver un équilibre pertinent entre les coûts d'approvisionnement, les frais de transport et les délais de livraison.

Il est essentiel de comprendre que la chaîne d'approvisionnement repose sur trois types de flux principaux : les flux physiques représentent le mouvement des matières premières, des composants et des produits finis tout au long de la chaîne (Simchi-Levi et al., 2008), les flux d'information qui jouent un rôle essentiel dans la coordination des opérations, en assurant la fluidité des données relatives aux commandes, aux niveaux de stock et aux prévisions (Ballou, 2004) et les flux financiers, qui englobent les mouvements monétaires liés aux paiements, aux facturations et aux transactions entre les différents acteurs de la chaîne. La performance de la chaîne dépend de l'alignement constant entre ces trois types de flux.

La performance de la chaîne dépend donc de l'alignement constant entre ces types de flux.

2.1.2.2 Niveaux de décision de la Supply Chain

La gestion de la Supply Chain repose sur une articulation claire entre les niveaux stratégique, tactique et opérationnel. Chacun de ces niveaux joue un rôle déterminant dans la continuité, la sécurité et la rentabilité des opérations.

Niveau stratégique

Simchi-Levi et al. indiquent que « *le niveau stratégique traite de décisions ayant un impact durable sur l'entreprise...* ».

Dans ce contexte, on retrouve :

1. Le choix de la localisation des bases logistiques, des hubs régionaux ou des centres de maintenance, en fonction des zones d'exploitation (onshore ou offshore) ;
2. L'externalisation de certaines fonctions critiques, telles que le transport de matériel lourd, la gestion des pièces de rechange ou la maintenance des équipements ;
3. Les investissements dans les systèmes d'information (tels que les TMS, ERP ou plateformes de gestion des pièces critiques) pour améliorer la visibilité et la coordination des flux.

Ces décisions visent à assurer la résilience et la compétitivité d'une supply chain soumise à des contraintes extrêmes (conditions climatiques, instabilité géopolitique, délais critiques).

Niveau tactique

« *Le niveau tactique concerne des décisions à moyen terme qui traduisent les orientations stratégiques en plans d'action concrets, avec un impact mesurable sur les performances de l'entreprise.* » Chopra et Meindl.

Cela inclut :

- La gestion optimisée des stocks critiques (pièces de rechange, équipements de maintenance, consommables spécifiques aux sites pétroliers), en intégrant les calendriers de maintenance préventive et les interventions d'urgence ;
- La planification des capacités logistiques pour assurer la disponibilité rapide des équipements lourds (têtes de puits, modules de compression, équipements de levage) sur les sites de forage et de production éloignés ;
- La sélection et la contractualisation de prestataires spécialisés (transport sous conditions exceptionnelles, fret hors gabarit, opérations offshore, levage lourd), à travers des appels d'offres ou des accords-cadres alignés avec les exigences opérationnelles et réglementaires du secteur pétrolier.

Une planification tactique efficace permet d'anticiper les besoins critiques, de réduire les coûts liés aux arrêts non planifiés et de garantir la disponibilité du matériel.

Niveau opérationnel

Enfin, Ronald H. Ballou définit le niveau opérationnel comme étant la partie qui *se concentre sur la gestion quotidienne des activités, visant à assurer l'exécution efficace des plans et à répondre aux exigences immédiates du marché.*

Cela se traduit par :

- La coordination du transport multimodal (aérien, maritime, terrestre) de matériel, souvent lourd et sensible, vers des sites éloignés ou difficiles d'accès ;
- L'exécution des opérations de stockage et d'expédition dans les bases logistiques ou les centres de distribution ;
- Le pilotage en temps réel des approvisionnements, afin de limiter les ruptures et d'intervenir rapidement en cas d'imprévu (pannes, retards, anomalies logistiques).

La réactivité à ce niveau est cruciale : une simple pièce manquante peut entraîner l'arrêt d'un puits de forage, avec des conséquences financières et opérationnelles majeures.

2.1.2.3 La Supply Chain dans le secteur des services pétroliers

Complexité des opérations (Amont, Midstream, Aval)

La Supply Chain dans le secteur pétrolier présente une complexité opérationnelle répartie sur trois segments clés : **l'amont, le midstream, et l'aval.**

- **L'amont** inclut l'exploration et l'extraction des ressources, souvent situées dans des zones géographiques difficiles d'accès, nécessitant une coordination logistique complexe.
- **Le midstream**, centré sur le transport et le stockage, repose sur des infrastructures spécialisées comme les pipelines et les terminaux de stockage.

- **L'aval** concerne la transformation des matières premières en produits raffinés, qui sont ensuite distribués via un réseau logistique global.

Ce système opérationnel complexe nécessite une planification minutieuse pour gérer les risques associés aux ruptures de chaîne (Van der Vorst, 2006).

La figure suivante illustre les différentes étapes de la chaîne logistique pétrolière :

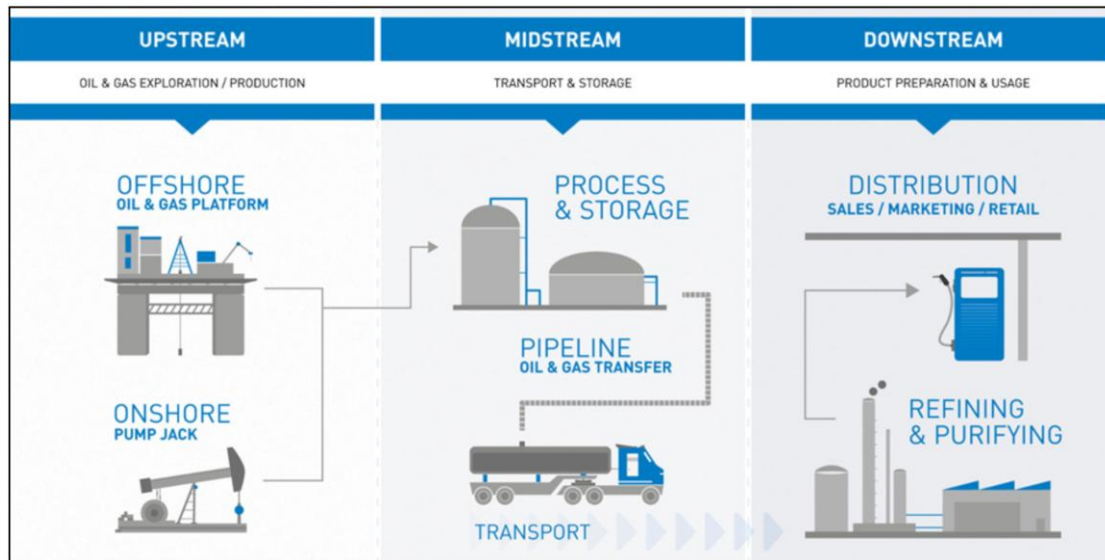


Figure 2.2 : Étapes de la chaîne logistique pétrolière

L'intégration de ces trois segments logistiques est essentielle pour la performance du secteur, car toute défaillance à un niveau donné peut entraîner des retards et des coûts considérables.

Dépendance du secteur à l'international

Le secteur pétrolier est fortement dépendant des échanges internationaux pour l'importation et l'exportation de divers équipements et produits raffinés. L'exportation de produits raffinés et l'importation de matériel spécialisé nécessitent des flux logistiques transfrontaliers complexes, où la gestion des risques géopolitiques et des fluctuations des prix des matières premières joue un rôle central. Ces opérations peuvent également être soumises à des modifications réglementaires, notamment en matière de droits de douane et de quotas, ce qui crée des défis supplémentaires pour maintenir l'efficacité des opérations (Christopher, 2016). La gestion des risques liés aux devises et les normes douanières spécifiques à chaque région sont des éléments stratégiques pour garantir que les flux se déroulent sans heurts et à moindre coût.

La carte (figure 2.3) suivante illustre les principales routes maritimes empruntées par les navires pétroliers, depuis leurs zones de production (Amérique du Nord, Amérique latine, Afrique, Europe de l'Ouest et Moyen-Orient) jusqu'aux marchés de consommation.

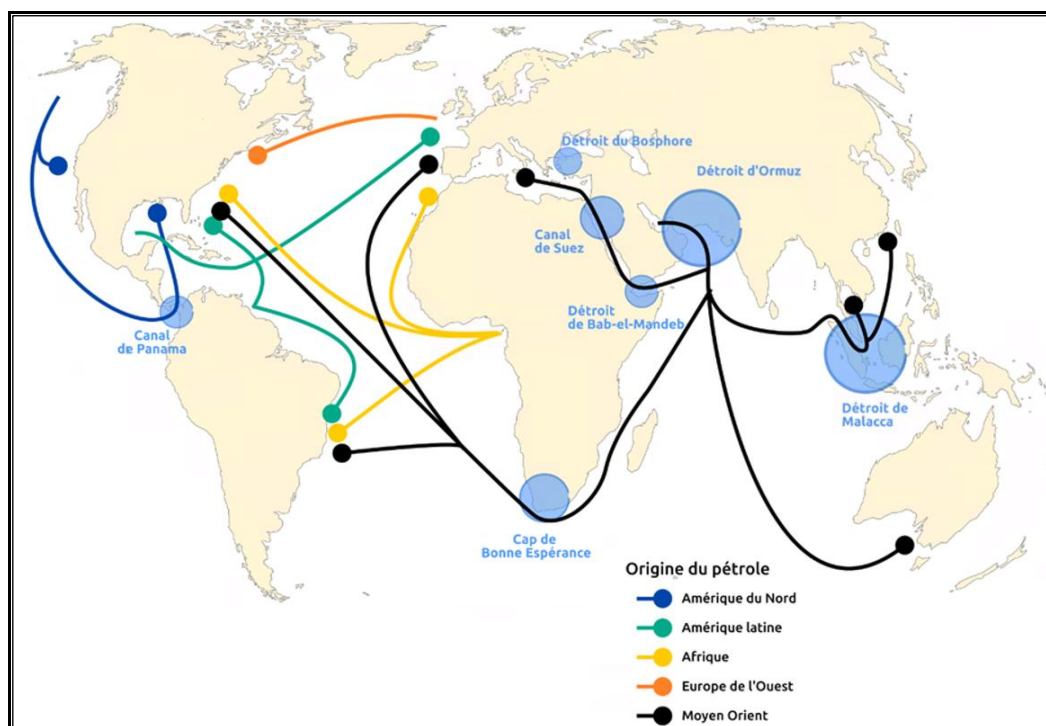


Figure 2.3 : Carte illustrant les principaux points de transit des navires pétroliers

Cette dernière met en évidence les points de transit critiques que sont le canal de Panama, le cap de Bonne-Espérance, le canal de Suez, le détroit d'Ormuz, le détroit de Bab-el-Mandeb, le détroit du Bosphore et le détroit de Malacca.

Des points par lesquels transitent également les flux logistiques de SLB NAF, soulignant l'importance stratégique de ces passages pour ses opérations internationales.

2.2 Enjeux de performance et d'optimisation dans la chaîne logistique

2.2.1 Défis liés au Supply Chain Management

La gestion de la chaîne logistique moderne repose sur la capacité des entreprises à répondre de manière agile, rapide et efficiente à une demande volatile, tout en minimisant les coûts et en assurant la qualité des flux. Dans des secteurs à forte intensité capitalistique comme l'industrie pétrolière, les décisions logistiques sont particulièrement sensibles, car tout retard ou rupture d'approvisionnement peut engendrer des pertes opérationnelles majeures.

Les défis liés au Supply Chain Management se situent à l'interface entre complexité géographique, variabilité des délais et exigences de service. L'optimisation de la chaîne logistique passe donc par une conception rigoureuse des réseaux de distribution, une planification dynamique des ressources, et une prise de décision éclairée sur des problématiques telles que :

- La localisation optimale des entrepôts ou hubs logistiques ;
- Le choix des modes de transport les plus pertinents ;
- L'adéquation entre capacité logistique et prévisions de la demande ;
- La coordination des flux physiques, informationnels et financiers.

Les problématiques de localisation logistique, en particulier, occupent une place centrale : il s'agit de décisions stratégiques à long terme, engageant les performances futures de l'entreprise. Elles doivent intégrer des critères multiples, allant du coût de transport aux conditions géopolitiques, en passant par la proximité des marchés ou les infrastructures disponibles.

Avant de mobiliser des outils de modélisation et de résolution, il convient de comprendre la typologie des infrastructures logistiques et leur rôle dans l'architecture globale des flux.

2.2.2 Infrastructures de distribution et de transbordement

2.2.2.1 Typologie des points de rupture de charge

L'entrepôt (*warehouse*) est principalement dédié au stockage des marchandises sur une durée plus ou moins longue. Il permet de sécuriser les stocks, de répondre à la demande en temps voulu et d'assurer une bonne traçabilité des produits.

Le centre de distribution (*Distribution Center - DC*), quant à lui, a pour objectif de réduire au maximum le temps de passage des produits. Il est conçu pour recevoir, trier, préparer les commandes et expédier rapidement les marchandises vers les clients ou les sites d'exploitation.

Le hub logistique, selon le Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) est défini comme "*un point central dans un réseau de transport où les marchandises sont regroupées et redistribuées vers leurs destinations finales*" (CSCMP, 2021). En centralisant les flux de produits, il permet une meilleure coordination des déplacements entre les différents points de l'entreprise.

2.2.2.2 Spécificité des hubs maritimes

Dans la logistique internationale, le terme hub renvoie très souvent aux hubs maritimes : ports majeurs ou complexes portuaires interconnectés jouant un rôle clé dans la redistribution à grande échelle des flux. Notteboom & Rodrigue (2005) les décrivent comme des nœuds stratégiques capables d'assurer la consolidation, la segmentation et le transbordement des conteneurs le long des routes intercontinentales.

Ces hubs se caractérisent par :

- Des volumes de trafic élevés ;
- Une offre de services logistiques diversifiée ;
- Une forte intégration avec les réseaux terrestre, ferroviaire et fluvial.

Slack (1999) rappelle que leur fonction centrale est bien le transbordement : transférer des conteneurs d'un navire-mère à un navire feeder, permettant ainsi d'exploiter les économies d'échelle des très grands porte-conteneurs tout en desservant efficacement les marchés périphériques.

La figure 2.4 ci-dessous explique le rôle des hubs, DC et entrepôts dans la circulation des flux.

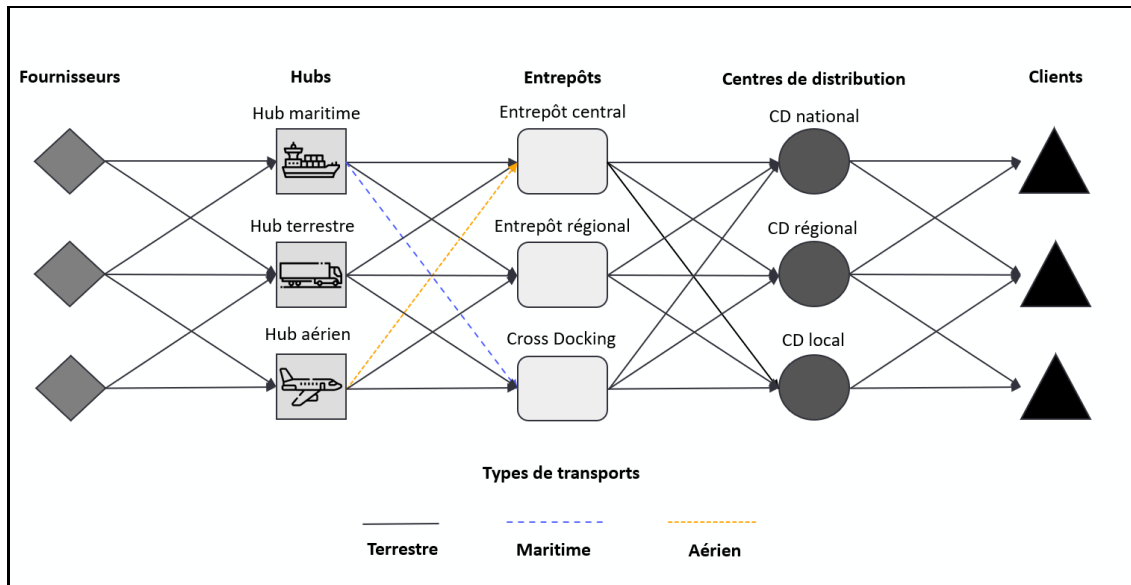


Figure 2.4 : Schéma d'un réseau logistique multimodal (ex. SLB)

2.2.3 Concepts liés à la logistique multimodale

La logistique multimodale repose sur l'utilisation de plusieurs modes de transport pour acheminer des marchandises de manière efficace et économique. L'un des processus essentiels dans cette approche est le transbordement, qui joue un rôle clé dans l'optimisation des flux logistiques.

2.2.3.1 Définition du transbordement

Selon Rodrigue et al. (2016), le transbordement consiste à faire passer une marchandise du quai de réception au quai d'expédition sans passer par une zone de stockage. Cette opération s'effectue dans des délais très courts afin de minimiser les coûts d'immobilisation.

2.2.3.2 Caractéristiques du transbordement

Le processus de transbordement repose sur plusieurs critères distinctifs :

- L'absence d'entrepasage intermédiaire, les marchandises ne séjournant pas dans une zone de stockage ;
- Des délais d'opération extrêmement réduits, afin de préserver la continuité du flux logistique ;
- Une compatibilité élevée avec les systèmes intermodaux ou multimodaux ;

- L'articulation de plusieurs modes de transport dans un même itinéraire logistique (par exemple : navire, avion, camion, etc.).

2.2.3.3 Typologie du transbordement

On distingue plusieurs formes de transbordement, en fonction du contexte géographique ou du type de transport mobilisé :

1. **Transbordement en terminal ou zone portuaire** : Il s'agit de la configuration la plus répandue, notamment dans les chaînes d'approvisionnement internationales. Les ports constituent des plateformes privilégiées pour le transit et le réacheminement des cargaisons.
2. **Transbordement en mer** : Réalisé généralement en eaux internationales, il implique le transfert de marchandises entre deux navires directement sur zone, sans escale portuaire.
3. **Transbordement fluvial** : Mis en œuvre sur les voies navigables secondaires, il concerne le transfert de cargaisons entre navires dans des zones spécifiques de transit fluvial.
4. **Transbordement aérien** : Ce type implique une ou plusieurs opérations de transfert par voie aérienne. Il peut s'agir d'un passage entre deux avions, entre un navire et un avion, ou encore entre un avion et un camion, en fonction des combinaisons logistiques adoptées.

La figure 2.5 suivante représente les différentes étapes de ce processus :

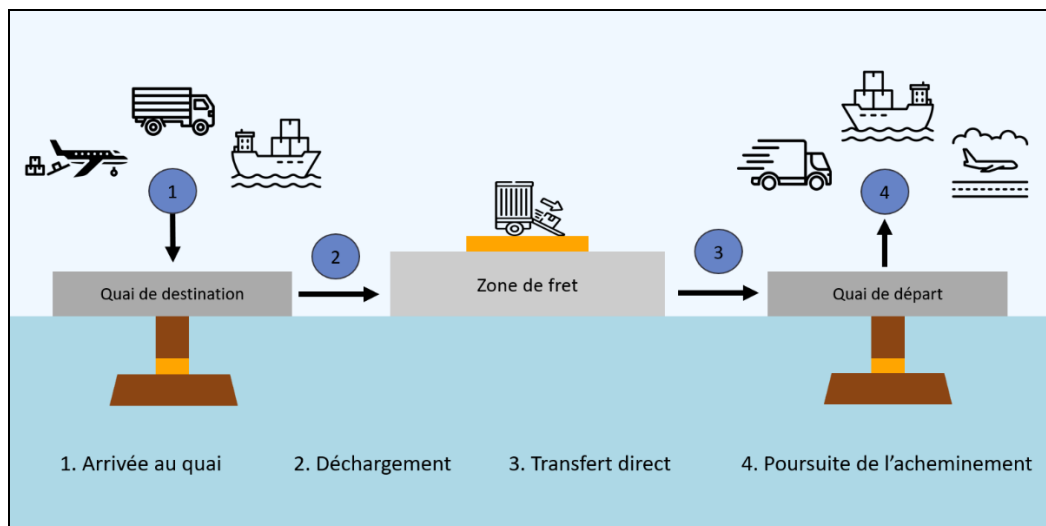


Figure 2.5 : Étapes du processus de transbordement

2.2.3.4 Avantages logistique et économiques du transbordement

Le transbordement joue un rôle central dans l'optimisation des chaînes logistiques modernes, en offrant une série d'avantages à la fois économiques et opérationnels. En supprimant la

nécessité de stockage intermédiaire, il permet de réduire les besoins en infrastructures d'entreposage, ainsi que les coûts associés à l'immobilisation des marchandises. Cela se traduit par une diminution du fonds de roulement nécessaire et une réduction des ajustements de stock. De plus, la rapidité des opérations de transfert améliore considérablement les délais de livraison, renforçant ainsi la réactivité globale de la chaîne d'approvisionnement.

Par ailleurs, le transbordement facilite l'utilisation de navires de grande capacité pour les trajets longue distance. Ce levier logistique permet de tirer parti d'économies d'échelle importantes, en abaissant le coût unitaire de transport tout en maintenant une flexibilité intermodale. Il met également en lumière le rôle stratégique du fret maritime dans le commerce mondial.

2.3 Outils et approches d'optimisation logistique

2.3.1 Fondements mathématiques et algorithmique de l'optimisation

Dans le domaine industriel et entrepreneurial, les décideurs sont fréquemment confrontés à des problématiques complexes nécessitant une prise de décision rationnelle. Parmi ces défis, les problèmes d'optimisation et plus particulièrement ceux relevant de la programmation linéaire qui occupent une place prépondérante dans la planification stratégique, la logistique et la gestion des ressources (Hillier & Lieberman, 2021). Grâce aux avancées significatives des technologies informatiques, de nombreux logiciels spécialisés permettent aujourd'hui de résoudre ces problèmes efficacement, souvent sans nécessiter une connaissance approfondie de la théorie mathématique sous-jacente.

Parmi les outils les plus utilisés dans ce domaine, on peut citer CPLEX, MATLAB, LINDO, Excel ou encore Maple (Winston, 2004 ; Chang, 2008). Ces logiciels sont capables de traiter une grande variété de modèles d'optimisation, incluant notamment la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE), qui est au cœur de notre étude.

Selon la structure du domaine de recherche des solutions, l'optimisation peut être continue ou discrète (également appelée optimisation combinatoire). La problématique de localisation d'un hub logistique s'inscrit dans cette dernière catégorie : il s'agit d'un problème combinatoire dans lequel il faut identifier la solution optimale parmi un ensemble discret et souvent très étendu d'alternatives réalisables (Daskin, 2013). Bien que cet ensemble soit généralement fini, le nombre élevé de combinaisons possibles rend la résolution particulièrement complexe, justifiant ainsi l'emploi d'outils et de méthodes spécialisés.

L'optimalité d'une solution est déterminée par une fonction à optimiser, souvent appelée fonction objectif ou fonction de coût, et qui permet d'évaluer et de comparer les différentes alternatives. Ce cadre peut être formalisé mathématiquement de la manière suivante :

Soit :

une fonction $J : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ appelée fonction-objectif ;

un ensemble $U \subset \mathbb{R}^n$ appelé ensemble des contraintes.

Le problème d'optimisation consiste donc à déterminer, lorsqu'il existe, un minimum ou un maximum de J sur U .

Un problème d'optimisation peut se formuler comme suit :

a. Minimisation

Minimiser J sur U revient à chercher $x^* \in U$ tel que

$$J(x^*) = \min_{x \in U} J(x)$$

Ceci équivaut à : $J(x^*) \leq J(x), \forall x \in U$.

x^* est la solution optimale du problème.

b. Maximisation

Maximiser J sur U revient à chercher $x^* \in U$ tel que

$$J(x^*) = \max_{x \in U} J(x)$$

Ceci équivaut à : $J(x^*) \geq J(x), \forall x \in U$

Les problèmes combinatoires les plus étudiés se résument souvent à trois modèles canoniques, présentés synthétiquement dans le tableau 2.1 suivant :

Modèle classique	Description	Objectif d'optimisation
Set covering problem (problème de couverture)	Choisir un sous-ensemble minimal de « couvertures » (ressources, sites, ensembles) dont l'union satisfait la demande.	Minimiser le nombre de couvertures (ou le coût total) tout en couvrant toutes les exigences.
Travelling sales man problem (Voyageur de commerce)	Déterminer un cycle hamiltonien passant une seule fois par chaque sommet du graphe.	Minimiser le coût total (ou la distance) du circuit complet.
Shortest path problem (plus court chemin)	Trouver, dans un graphe pondéré, la trajectoire reliant deux nœuds.	Minimiser la somme des poids/coûts des arcs parcourus.

Tableau 2.1 : Classification des problèmes combinatoires logistique

2.3.2 La programmation linéaire

Définition : Un problème d'optimisation linéaire est un problème d'optimisation où la fonction objectif et les contraintes sont linéaires.

La formulation mathématique d'un problème de programmation linéaire se présente comme suit :

$$\min Z(x) = c.x$$

Sous contraintes

$$Ax \geq b$$

$$x \geq 0$$

Où A est une matrice $n \times m$ à coefficients réels, $b \in R^m$, $c \in R^n$ et $x \in R^n$, cette forme est appelée forme canonique.

La programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) constitue une extension de la programmation linéaire classique, dans laquelle certaines ou l'ensemble des variables décisionnelles sont contraintes à prendre des valeurs entières. Un cas particulier de cette approche est la programmation en 0-1, où les variables ne peuvent adopter que les valeurs binaires 0 ou 1. Ce type de modélisation est essentiel pour représenter des situations où les décisions sont de nature discrète, comme c'est le cas pour les problèmes de localisation de hubs logistiques (Daskin, 2013 ; Melo et al., 2009) abordés dans le cadre de ce mémoire.

L'ajout de contraintes d'intégralité accroît significativement la complexité du problème. Contrairement aux modèles linéaires continus, un PLNE relève de la catégorie des problèmes NP-difficiles, ce qui signifie qu'il ne peut pas, en général, être résolu efficacement pour de grandes instances à l'aide d'algorithmes exacts classiques. Cette complexité exige donc le recours à des méthodes de résolution spécialisées, souvent combinatoires, telles que les algorithmes de Branch and bound, ou encore les méthodes de décomposition (Bazaraa et al., 2010 ; Bertsimas & Tsitsiklis, 1997).

La formulation générale d'un problème de programmation linéaire en nombres entiers peut s'écrire sous forme matricielle comme suit :

$$\text{Minimizer } Z(x) = c^T x$$

$$\text{sous contraintes : } \begin{cases} Ax \geq b \\ x \geq 0 \\ x_i \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

$$\text{pour } i = 1, 2, \dots, n$$

Où $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ représente le vecteur des variables de décision, c le vecteur des coefficients de la fonction objectif, A la matrice des contraintes, et b le vecteur second membre.

Lorsque les variables sont contraintes à prendre uniquement les valeurs 0 ou 1, on parle alors de programmation linéaire binaire ou PL 0-1.

La résolution de tels modèles nécessite l'utilisation de solveurs d'optimisation performants. Parmi les outils les plus couramment utilisés, on trouve des solveurs commerciaux tels que CPLEX, Xpress ou Gurobi, ainsi que des solveurs open source comme GLPK ou SCIP.

2.4 Les problèmes de localisation

2.4.1 Localisation logistique : définition, portée et enjeux

2.4.1.1 Définition de la localisation

La localisation désigne le processus de détermination de la position géographique d'un objet ou d'une installation. Dans un autre registre, ce terme peut également faire référence à l'adaptation d'un produit, d'un service ou d'un système à une région ou à un contexte géographique spécifique (traduction, réglementation, habitudes de consommation, etc.).

Dans le cadre des chaînes logistiques, le concept de localisation prend une dimension stratégique : il s'agit d'identifier les emplacements les plus pertinents pour implanter des installations, telles que des centres de distribution, des entrepôts, ou des hubs logistiques, afin d'optimiser les performances globales du système.

2.4.1.2 Importance stratégique de la localisation logistique

Au cours des dernières décennies, la problématique de la localisation optimale des centres logistiques est devenue une préoccupation majeure pour les entreprises opérant dans des environnements concurrentiels et mondialisés. Ce choix stratégique permet non seulement de réaliser des économies d'échelle, mais aussi de réduire les coûts de transport ainsi que les délais de livraison (ou *lead time*), contribuant ainsi à améliorer la réactivité et la compétitivité de l'entreprise sur ses marchés (ReVelle et al., 2008).

Face à la complexité de ces décisions, de nombreux modèles mathématiques ont été développés pour assister les décideurs dans l'évaluation et la comparaison des différentes options de localisation. Ces modèles reposent sur des formulations issues de la recherche opérationnelle, et mobilisent souvent des techniques d'optimisation combinatoire ou de programmation mathématique

2.4.2 Typologie des problèmes de localisation

Il existe différents modèles de localisation, ces derniers peuvent être classifiés selon plusieurs critères en fonction des contraintes et objectifs de l'étude :

Critère	Options / Typologies	Particularités
Domaine de solutions	- Espace continu	Dépend de la topographie et du réseau disponible (ex. ports, aéroports, axes logistiques).
	- Réseau (nœuds fixes)	
	- Discret (sous-ensemble de nœuds)	
Objectif d'optimisation	- Minisum : minimisation des coûts/distance moyenne	Le choix dépend du secteur (privé/public) et de la priorité stratégique (efficacité ou équité).
	- Minimax : minimisation des coûts/distance max	
Capacité des hubs	- Capacitaires (limites de volume)	Lié aux contraintes physiques et logistiques des installations.
	- Non capacitaires (volumes illimités)	
Niveau hiérarchique	- Mononiveau	Mononiveau : distribution simple
	- Multiniveau	Multiniveau : distribution complexe, plusieurs échelons logistiques.
Homogénéité de la demande	- Homogène (produit unique)	Nécessite une différenciation selon les flux, capacités et spécificités des produits.
	- Hétérogène (produits multiples)	
Élasticité de la demande	- Inélastique (volume fixe)	L'élasticité implique un lien entre la localisation et la demande : approches orientées revenu.
	- Élastique (volume dépendant des coûts/conditions du marché)	
Évolution temporelle	- Statique (constante dans le temps)	Statique : planification long terme
	- Dynamique (évolution, fermetures/ouvertures)	Dynamique : flexibilité temporelle.
Fiabilité des données	- Déterministe (valeurs connues)	Le choix dépend du niveau de confiance dans les données disponibles.
	- Probabiliste (incertitude, prévisions)	
Nombre de hubs	- Exogène (fixé à l'avance)	Endogène : plus flexible, mais plus complexe à modéliser.
	- Endogène (optimisé dans le modèle)	
Coût d'installation	- Pris en compte (fixe ou variable)	Intégrer les coûts permet une analyse plus réaliste de la viabilité des options.
	- Non pris en compte (libre utilisation des sites)	

Tableau 2.2 : Critères de classification des modèles

2.4.3 Métriques de distance

Le choix de la métrique de distance est un élément fondamental dans les problèmes de localisation. Il influe directement sur la modélisation des coûts de transport, la performance des solutions et la pertinence des résultats. Différents types de distances sont utilisés en fonction de la structure spatiale du problème, allant des distances purement géométriques aux mesures tenant compte de la structure du réseau. Dans cette section, nous présentons les types de distances les plus couramment utilisés dans la littérature.

2.4.3.1 Distance euclidienne

La distance euclidienne, ou distance « à vol d'oiseau », est définie comme la racine carrée de la somme des carrés des différences entre les coordonnées des points considérés. Elle est exprimée par :

$$d_e = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (2.1)$$

Avec :

d_e = Distance euclidienne

x_a = coordonnée x du point A

x_b = coordonnée x du point B

y_a = coordonnée y du point A

y_b = coordonnée y du point B

Elle suppose un espace continu et isotrope, dans lequel les déplacements peuvent se faire dans toutes les directions sans contraintes. Cette distance est souvent utilisée pour des raisons de simplicité, notamment dans les modèles de localisation continue (Daskin, 2013).

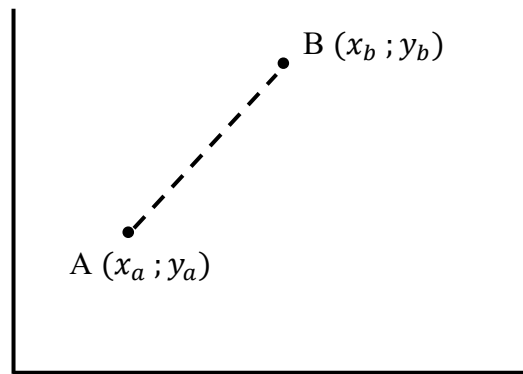


Figure 2.6 : The Euclidean distance between points A and B. (Adapted from Mwemezi and Huang 2011).

2.4.3.2 Great circle distance

La great circle distance également connue sous le nom de distance « taxicab », mesure la somme des différences absolues entre les coordonnées des deux points :

$$d_s = \alpha r \quad (2.2)$$

Avec

d_s = Great circle distance

α = Mesure de l'angle central

r = Rayon de la terre

Cette métrique est plus réaliste dans les zones urbaines organisées en grille, où les déplacements se font en suivant des axes horizontaux et verticaux. Elle est couramment utilisée

dans des environnements où la structure du réseau routier contraint les itinéraires disponibles (Melo et al., 2009)

La figure 2.7. ci-dessous représente la great circle distance entre les deux points A et B :

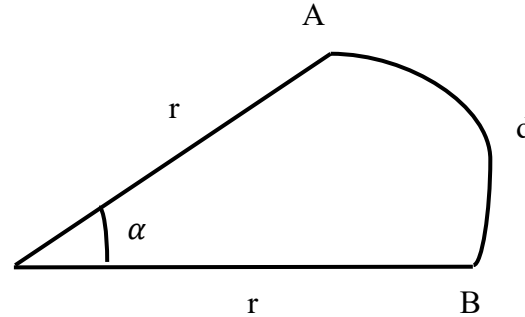


Figure 2.7 : Great circle distance on the sphere (adapted from Mwemezi and Huang 2011)

2.4.3.3 Distance sphérique

Dans les modèles à grande échelle, comme dans le cas de la localisation de centres de distribution ou d'installations logistiques couvrant plusieurs régions ou pays, l'utilisation d'une distance qui prend en compte la courbure terrestre devient nécessaire. La distance sphérique permet de calculer la distance entre deux points géographiques définis par leurs latitudes et longitudes. Elle est souvent utilisée lorsque les installations ou clients sont dispersés à travers de grandes zones géographiques.

Cette distance est généralement calculée à l'aide de la formule de Haversine :

$$d = 2R * \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta \varphi}{2} \right) + \cos(\varphi_1) * \cos(\varphi_2) * \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right)} \right) \quad (2.3)$$

Avec

φ_1, φ_2 = latitudes des deux points (en radians),

$\Delta \varphi$ = différences de latitude,

$\Delta \lambda$ = différences de et longitude,

R = rayon de la Terre (environ 6 371 km).

Cette métrique est particulièrement adaptée aux problèmes de conception de réseaux logistiques internationaux, où la précision géographique est essentielle pour l'évaluation des coûts de transport, des temps de livraison et des zones de couverture (Onnela et al., 2007).

2.4.3.4 Choix de la métrique

Le choix de la distance dépend des spécificités du problème traité. Les distances euclidiennes ou de Manhattan sont souvent utilisées dans des contextes locaux ou urbains, tandis que la distance sphérique s'impose dans les contextes internationaux ou interrégionaux où la modélisation géographique exacte est essentielle. Une bonne compréhension de la géographie opérationnelle est donc indispensable pour choisir la métrique la plus pertinente (Daskin, 2013 ; Melo et al., 2009).

2.5 Modèles de localisation continus

Un problème de se caractérise par le fait que l'espace dans lequel les sites potentiels peuvent être implantés est défini de manière continue. Autrement dit, les positions possibles ne sont pas limitées à un ensemble discret de points prédéterminés, mais peuvent être représentées par une ou plusieurs variables qui varient de façon continue dans l'espace. C'est en ce sens que Love, Morris et Wesolowsky (1988) qualifient ces modèles de *modèles de génération de sites*, soulignant que l'objectif du modèle est précisément de déterminer les emplacements optimaux, sans présupposer de sites candidats fixés au préalable.

2.5.1 Méthode du centre de gravité

Parmi les approches les plus répandues pour traiter ce type de problème, on retrouve la méthode du centre de gravité, souvent utilisée dans le contexte des systèmes logistiques. Cette méthode vise à localiser une installation (tel qu'un entrepôt ou un centre de distribution) de manière à minimiser la distance pondérée entre celle-ci et un ensemble de points de demande. L'idée sous-jacente repose sur le principe selon lequel l'installation doit être positionnée au cœur des flux pour réduire les coûts liés au transport.

2.5.1.1 Formulation mathématique

La formulation classique de cette méthode s'appuie généralement sur la distance euclidienne. Chaque point de demande est représenté dans un plan cartésien par ses coordonnées (x_i, y_i) et associé à un poids w_i , généralement proportionnel au volume ou à la fréquence de la demande. Le centre de gravité optimal (x^*, y^*) est alors donné par les formules suivantes :

$$x^* = \frac{\sum_i l_i x_i}{\sum_i l_i} \quad (2.4)$$

$$y^* = \frac{\sum_i l_i y_i}{\sum_i l_i} \quad (2.5)$$

Avec :

x^* = Longitude du point optimal

y^* = Latitude du point optimal

l_i = Poids de chaque localisation

x_i = Longitude du point candidat

y_i = Latitude du point candidat

2.5.1.2 Portée et contraintes de la méthode du centre de gravité

La méthode du centre de gravité constitue une première approche simple et rapide pour estimer un emplacement central en fonction des flux de demande. Toutefois, elle présente plusieurs limites : elle ne garantit pas une solution optimale et néglige des variables importantes comme les régimes fiscaux, les effets d'échelle ou la non-linéarité des coûts de transport (Murphy & Wood, 2008).

Une autre limite tient à l'hypothèse géométrique sous-jacente : la méthode classique repose sur une représentation plane de l'espace, ce qui devient problématique à l'échelle intercontinentale. En effet, l'utilisation de distances euclidiennes peut générer des erreurs notables, la Terre étant sphérique (Mwemezi & Huang, 2011).

Pour pallier cela, la méthode sphérique intègre la géométrie réelle de la planète en traitant les coordonnées géographiques comme des vecteurs tridimensionnels. Elle implique des étapes techniques (conversion en radians, projection sur une sphère via des coordonnées x, y, z) et un traitement mathématique plus avancé, souvent réalisé via des logiciels d'optimisation. Malgré sa complexité, elle offre une représentation plus fidèle de la réalité, particulièrement utile pour des problématiques de localisation logistique à grande échelle.

$$x = \cos(lat) * \cos(lon) \quad (2.6)$$

$$y = \cos(lat) * \sin(lon) \quad (2.7)$$

$$z = \sin(lat) \quad (2.8)$$

Avec :

lat = latitude en radians

lon = longitude en radians

La figure 2.8. présente l'idée de base des coordonnées cartésiennes tridimensionnelles pour la Terre.

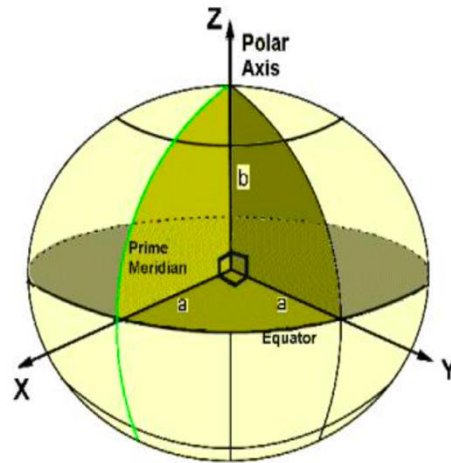


Figure 2.8 : Basic idea of the three-dimensional Cartesian coordinate system for the Earth (Clynch 2006)

Toutefois, l'utilisation de coordonnées cartésiennes tridimensionnelles présente également certaines limitations. En effet, les points obtenus à l'issue des calculs peuvent se situer à l'intérieur de la sphère terrestre, ce qui complique leur interprétation directe en tant que position géographique exploitable. Pour pallier cette difficulté, une projection de ces points vers la surface terrestre est nécessaire. Cela peut être réalisé à l'aide d'une fonction *arctangente*, permettant de convertir les coordonnées tridimensionnelles en latitudes et longitudes géographiques. Ainsi, le point projeté représente une approximation du centre de gravité à la surface de la Terre.

2.6 Les modèles de localisation discrets

Les modèles de localisation développés dans la littérature peuvent être classés en deux grandes familles selon le nombre de critères pris en compte dans le processus décisionnel : les modèles mono-critère et les modèles multi-critères. Cette distinction repose à la fois sur la complexité des problèmes abordés, les objectifs visés, et les techniques de résolution mobilisées.

Dans les modèles mono-critère, la décision est guidée par un unique objectif, tel que la minimisation des coûts de transport ou des distances totales parcourues. En revanche, les modèles multi-critères permettent d'intégrer simultanément plusieurs dimensions du problème, souvent interdépendantes, telles que les coûts, les délais, les contraintes environnementales ou réglementaires. Ces approches sont mieux adaptées aux environnements complexes, où les décisions doivent concilier performance économique, contraintes techniques et exigences sociales ou environnementales.

Plusieurs dimensions peuvent être intégrées soit comme critère de décision ou comme contraintes, on cite :

1. **Le Transport**, incluant les coûts de déplacement, les distances à parcourir, ainsi que les temps de transit.
2. **Les fonctionnalités du hub**, telles que les activités réalisées sur site ou la disponibilité d'une main-d'œuvre qualifiée.
3. **L'offre et la demande**, correspondant à la disponibilité des marchandises et aux volumes à traiter.
4. **La proximité du marché**, notamment la distance aux clients et la possibilité d'élargir la zone de couverture.
5. **Les contraintes réglementaires**, incluant la législation locale, les politiques publiques ou les éventuels avantages fiscaux.
6. **Les facteurs environnementaux**, comme les caractéristiques du terrain, les conditions climatiques ou les normes écologiques en vigueur.

Indépendamment du modèle retenu, le processus de localisation s'initie généralement par une pré-sélection de sites candidats. Comme le soulignent Gao & Dong (2012) ainsi que Dubke & Pizzolato (2011), les hubs logistiques devraient idéalement être implantés à l'intersection de corridors de transport majeurs ou à proximité de grandes infrastructures multimodales. Ce positionnement stratégique permettrait d'augmenter les volumes traités, tout en optimisant l'utilisation des réseaux existants.

Par ailleurs, les critères de sélection peuvent varier selon les contextes : certains sont centrés sur la localisation de l'offre et de la demande, d'autres sur la configuration du réseau logistique ou encore la répartition du trafic. Dans bien des cas, la présence d'infrastructures préexistantes est un facteur décisif dans la sélection initiale des sites. Lee, Huang et Teng (2009), par exemple, se sont intéressés aux centres de distribution déjà opérationnels, évaluant leurs capacités de stockage, leur potentiel en tant que plateformes de transbordement maritime, ainsi que leur proximité avec des ports régionaux.

2.6.1 Modèles mono-critère

Bien que les problèmes de localisation rencontrés dans la pratique relèvent généralement d'une approche multi-critères, ils sont souvent réduits à des formulations mono-critère afin de simplifier leur résolution (Alumur, Kara & Karasan, 2012 ; Škrinjar, Rogić & Stancović, 2012). Ces modèles cherchent à optimiser une unique fonction objective, généralement axée sur des aspects économiques ou logistiques.

Parmi les objectifs les plus fréquemment rencontrés figurent la minimisation des coûts de transport, la réduction des distances parcourues, ou encore la maximisation des revenus, comme le suggèrent les travaux de Dubke & Pizzolato (2011). D'autres approches se concentrent sur l'amélioration du niveau de service, par exemple en maximisant le nombre de clients couverts, à l'instar de la méthode proposée par Zhi & Li (2012).

Ces modèles reposent essentiellement sur une logique quantitative, mobilisant des données précises sur les flux de transport, la localisation des clients, et les volumes à traiter.

L'introduction de critères qualitatifs tels que les préférences des parties prenantes ou les conditions locales y demeure marginale.

2.6.1.1 Le modèle P-médiane

L'un des modèles les plus emblématiques de cette catégorie est le modèle de la p -médiane, qui vise à localiser p installations de manière à ce que chaque client soit desservi par le site le plus proche, tout en minimisant le coût total du système. Ce modèle repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices :

- Le nombre d'installations à implanter est fixé à l'avance ;
- Les coûts d'implantation sont considérés identiques, quel que soit le site choisi ;
- Les installations ne sont soumises à aucune contrainte de capacité.

Ce type de formulation, bien que simplifié, offre un cadre analytique robuste pour des décisions initiales de localisation, notamment dans les phases exploratoires ou lorsque les données disponibles sont limitées.

Les paramètres du modèle sont les suivants :

- n = le nombre de sites/candidats potentiels indexés par i , $i \in I = \{1, \dots, n\}$;
- m = le nombre de clients ou points de demande indexés par j , $j \in J = \{1, \dots, m\}$;
- p = le nombre d'installations à localiser, $1 \leq p \leq n$;
- f_i = la demande du client i ;
- c_{ij} = coût unitaire ou distance de desserte entre le site j et le client i .

Les variables de décision sont :

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si on localise une installation au site potentiel } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la demande } i \text{ est affectée à l'installation } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La formulation du problème de la p -médiane s'écrit comme suit :

$$\text{Minimiser } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_i c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sous contraintes

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \forall j \in J \quad (3)$$

$$x_{ij} - y_i \leq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$y_i \in \{0,1\}, \forall i \in I$$

La fonction objectif (1) vise à minimiser les coûts globaux de transport pour satisfaire la demande de chaque client à partir du site qui lui est attribué. La contrainte (2) impose l'implantation de p installations, tandis que la contrainte (3) garantit qu'un client n'est desservi que par une seule installation. La contrainte (4) veille à ce que l'affectation ne se fasse que vers des installations effectivement ouvertes.

2.6.1.2 Uncapacitated Facility Location problem UFLP

Un modèle voisin est le problème de localisation sans contrainte de capacité (*Uncapacitated Facility Location Problem*, UFL), qui diffère de la p -médiane principalement par la détermination du nombre d'installations. Dans l'UFL, ce nombre n'est pas fixé à l'avance : un coût fixe d'implantation f_j est associé à chaque site, et ce coût n'est engagé que si une installation est effectivement ouverte sur le site j .

La formulation du UFL consiste alors à :

- Supprimer la contrainte (2) ci-dessus ;
- Ajouter à la fonction objectif le terme

$$\sum_{j \in J} f_j x_j$$

À la fonction objectif où f_j est le coût pour implanter une installation au nœud j .

Ainsi, l'objectif devient de minimiser la somme des coûts de transport et des coûts fixes d'implantation :

$$\text{Minimiser } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_i c_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in J} f_j y_j$$

Ce modèle offre une plus grande flexibilité en laissant au décideur la possibilité d'implanter autant d'installations que nécessaire pour équilibrer les coûts de transport et les coûts fixes.

2.6.2 Modèles multi-critères

La localisation des hubs logistiques implique une prise de décision particulièrement complexe, en raison de la multiplicité des critères à considérer, de la diversité des parties prenantes impliquées, et de la nature souvent hétérogène des données disponibles. Une approche monocritère s'avère insuffisante pour capter cette complexité. C'est pourquoi le recours à des modèles d'évaluation multicritères est privilégié.

Ces modèles permettent de structurer la comparaison de sites alternatifs selon des critères à la fois quantitatifs (coûts, délais, volumes traités, accessibilité) et qualitatifs (attractivité territoriale, stabilité réglementaire, qualité des services de soutien). Ils visent à guider le choix vers la solution la plus équilibrée au regard des objectifs stratégiques définis.

La mise en œuvre de ces modèles débute par la sélection des critères jugés pertinents au projet, sur la base des priorités organisationnelles et des contraintes opérationnelles. Les alternatives présélectionnées sont ensuite évaluées selon leur performance pour chaque critère. Cette évaluation repose sur des données factuelles ou sur des jugements d'experts, selon la nature du critère.

Un des atouts majeurs des approches multicritères réside dans leur capacité à intégrer les préférences des différents acteurs concernés. Elles favorisent ainsi une gouvernance concertée du processus de sélection, renforçant la légitimité et l'acceptabilité des décisions retenues.

Dans ce cadre, les méthodes MCDM (Multi-Criteria Decision Making) fournissent un cadre méthodologique structuré pour analyser et hiérarchiser des alternatives dans un environnement décisionnel complexe. Elles seront détaillées dans les sections suivantes.

Le tableau ci-dessous présente une synthèse de ces modèles, leurs caractéristiques essentielles, ainsi que les principaux exemples associés.

Catégorie	Description	Exemples / Modèles
Modèles mono-critère	Modèles basés sur un objectif unique, souvent économique (minimisation des coûts ou distances).	Modèle P-médiane, UFLP
<i>P-médiane</i>	Le nombre d'installations est fixé à l'avance ; chaque client est affecté au site le plus proche.	–
<i>UFLP</i>	Le nombre d'installations n'est pas défini ; un coût fixe est associé à chaque ouverture de site.	–
Modèles multi-critères	Intègrent simultanément plusieurs critères (coût, délai, impact environnemental, etc.).	Méthodes MCDM (AHP, ELECTRE, TOPSIS...)
Critères couramment utilisés	Coût de transport, accessibilité, proximité du marché, capacité, contraintes réglementaires, facteurs environnementaux.	–
Démarche méthodologique	Pré-sélection des sites candidats, évaluation sur critères quantitatifs et/ou qualitatifs, choix final via un modèle approprié.	–

Tableau 2.3 : Synthèse de modèles de localisation discrets

2.7 Méthodes d'aide à la décision

2.7.1 La prise de décision

Herbert Simon, lauréat du prix Nobel d'économie en 1978, a souligné que la gestion est essentiellement une série de processus de décision. Cela démontre l'importance de la prise de décision. La prise de décision est un processus par lequel un choix est fait parmi plusieurs alternatives pour atteindre un ou plusieurs objectifs (Turban & Aronson, 1998).

Il existe trois types de décisions (Meier & Barabel, 2006) : décisions stratégiques, décisions administratives (tactiques) et décisions opérationnelles en fonction de la portée de la décision et de son importance.

Le tableau 2.4 ci-dessous décrit les principales différences entre les décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles :

Critères	Décisions stratégiques	Décisions tactiques	Décisions opérationnelles
Horizon temporel	Long terme Traite des problèmes fondamentaux	Moyen terme Traite de la gestion des flux	Court terme Traite de la gestion des activités
Fréquences et degré de répétitivité	Décision spécifique Situation complexe	Décisions plurielles Routine organisationnelle	Décisions nombreuses et répétitives
Degré d'incertitude et prise de risques	Très élevé	Moyenne	Faible
Impact	Global Concerne l'ensemble de l'organisation	Partiel Associé à une ou plusieurs procédures	Local spécifique à une fonction
Niveau de décision	Direction générale	Directions fonctionnelles (divisions, services, départements)	Logique de décentralisation au niveau des unités opérationnelles
Informations requises	Informations évolutives et émergentes	Informations détaillées en rapport avec les transactions courantes	Informations précises et factuelles
Champ d'actions	Mission, métier et activités Type de structure Croyances et valeurs	Procédures, règlements, Systèmes de régulations et de communication, modalité d'exécution du travail	Volume de production, délais, qualité, coûts, gestion des stocks

Tableau 2.4 : Comparaison des types de décisions Tiré de Meier et Barabel (2006, p. 183)

2.7.2 Définition de l'AMD

En supposant l'existence d'au moins une solution optimale identifiable de manière objective, l'approche multicritère d'aide à la décision (AMD) constitue un outil méthodologique pertinent pour orienter le choix parmi plusieurs alternatives. Elle permet d'analyser simultanément

différents aspects d'un problème complexe, tout en intégrant les préférences des parties prenantes concernées. Cette démarche vise à comparer plusieurs options selon un ensemble de critères, souvent hétérogènes ou conflictuels, et s'avère particulièrement adaptée aux contextes décisionnels caractérisés par une forte incertitude ou des enjeux stratégiques multidimensionnels.

2.7.3 L'approche multi-critère floue (Fuzzy MCMD)

2.7.3.1 Définitions et fondements de la théorie des ensembles flous

Définition 1. Un ensemble flou a_α de $\mathfrak{R}$, avec $\alpha \in [0, 1]$, est appelé un point flou de niveau α si :

$$\mu_{a_\alpha}(x) = \begin{cases} \alpha, & x = a \\ 0, & x \neq a \end{cases}$$

Soit $F_M(\alpha)$ la famille de tous les points flous de niveau α .

Définition 2.

(1) Un sous-ensemble flou $\tilde{A} \subset \mathbb{R}$ est convexe si chaque sous-ensemble classique $A(\alpha) = \{x \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha, \alpha \in [0, 1]\}$ est convexe, c'est-à-dire un intervalle fermé de $\mathbb{R}$.

(2) $\tilde{A}$ est normal si $\sup_{x \in \mathbb{R}} \mu_{\tilde{A}}(x) = 1$.

(3) Un nombre flou sur $\mathbb{R}$ est un sous-ensemble flou de $\mathbb{R}$ qui est à la fois convexe et normal.

Soit F_N la famille des nombres flous de $\mathbb{R}$ satisfaisant la condition 2(1). Soit $F = F_N \cup F_M(1)$, $\check{D} \in F_N$, $D(\alpha)$ est un intervalle fermé non vide et borné défini par $D(\alpha) = [D_L(\alpha), D_R(\alpha)]$, où $D_L(x)$ et $D_R(x)$ sont respectivement les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle (Kaufmann & Gupta, 1991; Yao & Wu, 2000).

Définition 3. Pour deux nombres flous $\tilde{D} \in F$ et $\tilde{E} \in F$, la distance signée entre $\tilde{D}$ et $\tilde{E}$ est définie comme suit (Voir Yao & Wu, 2000):

$$d(\tilde{D}, \tilde{E}) = \frac{1}{2} \int_0^1 [D_L(\alpha) + D_R(\alpha) - E_L(\alpha) - E_R(\alpha)] d\alpha,$$

Si $O \in F_M(1)$, alors les bornes inférieure et supérieure de ses α -coupes ($\alpha \in [0, 1]$) sont 0, pour tout $\check{D} \in F$: $d(\check{D}, O) = \frac{1}{2} \int_0^1 [D_L(\alpha) + D_R(\alpha)] d\alpha$.

Ainsi, on peut définir $d(\tilde{D}, \tilde{E}) = d(\tilde{D}, O) - d(\tilde{E}, O)$.

Définition 4. Soient $\tilde{A} = (l_1, m_1, r_1)$ et $\tilde{B} = (l_2, m_2, r_2)$ deux nombres flous, alors la distance signée est définie comme (Voir Yao & Wu, 2000)

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \frac{1}{2} \int_0^1 [l_1 + (m_1 - l_1)\alpha + r_1 - (r_1 - m_1)\alpha - l_2 - (m_2 - l_2)\alpha - r_2 + (r_2 - m_2)\alpha] d\alpha.$$

Définition 5. Une variable linguistique est une variable dont les valeurs sont des termes linguistiques (voir, e.g., Chen & Hwang, 1992; Kacprzyk, 1986).

Définition 6. Soit $\tilde{A}$ et $\tilde{B}$ deux nombres triangulaires flous paramétré par les triplets (a_1, a_2, a_3) et (b_1, b_2, b_3) respectivement, alors les lois opérationnelles de ces deux TFNs sont les suivantes :

$$\tilde{A}(+) \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3)(+)(b_1, b_2, b_3) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3)$$

$$\tilde{A}(-) \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3)(-)(b_1, b_2, b_3) = (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_3 - b_3)$$

$$\tilde{A}(\times) \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3)(\times)(b_1, b_2, b_3) = (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3)$$

$$\tilde{A}(\div) \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3)(\div)(b_1, b_2, b_3) = (a_1/b_1, a_2/b_2, a_3/b_3)$$

2.7.3.2 Méthode CFCS (*Converting Fuzzy data into Crisp Scores*)

L'obtention d'une solution optimale nécessite une prise de décision collective, dans laquelle la dynamique du consensus joue un rôle crucial. Cette dynamique émerge des interactions entre les jugements de plusieurs participants, permettant ainsi de dégager une évaluation partagée. En raison des incertitudes propres à ce type d'analyse, une agrégation fondée sur la logique floue est recommandée, incluant une étape de défuzzification. Cette dernière vise à transformer les évaluations linguistiques floues souvent modélisées sous forme de nombres flous en valeurs déterminées. Dans ce cadre, la méthode employée pour convertir les données floues en scores précis s'appuie sur l'approche d'Opricovic et Tzeng (2004). Elle consiste à extraire les scores minimaux et maximaux à partir des valeurs floues, puis à calculer un score global en appliquant une moyenne pondérée selon les fonctions d'appartenance associées.

Soit $\omega_{ij}^k = (\widetilde{a_{1ij}^k}, a_{2ij}^k, a_{3ij}^k)$, le jugement flou qui reflète l'influence du critère i sur le critère j , pour un ensemble de réponses floues indexées par k .

Normalisation

$$xa_{1ij}^k = (a_{1ij}^k - \min a_{1ij}^k) / \Delta_{\min}^{\max} \quad (2.9)$$

$$xa_{2ij}^k = (a_{2ij}^k - \min a_{2ij}^k) / \Delta_{\min}^{\max} \quad (2.10)$$

$$xa_{3ij}^k = (a_{3ij}^k - \min a_{3ij}^k) / \Delta_{\min}^{\max} \quad (2.11)$$

Où $\Delta_{\min}^{\max} = \max r_{ij}^n - \min l_{ij}^n$

Calcule des valeurs normalisées à droite (rs) et à gauche (ls) :

$$xls_{ij}^k = xa_{2ij}^k / (1 + xa_{2ij}^k - xa_{1ij}^k) \quad (2.12)$$

$$xrs_{ij}^k = xa_{3ij}^k / (1 + xa_{3ij}^k - xa_{2ij}^k) \quad (2.13)$$

Calcule des valeurs crispes normalisées totales :

$$x_{ij}^k = [xls_{ij}^k(1 - xls_{ij}^k) + xrs_{ij}^k \times xrs_{ij}^k] / (1 - xls_{ij}^k + xrs_{ij}^k) \quad (2.14)$$

$$\widetilde{\omega}_{ij}^k = min a_{ij}^n + x_{ij}^n \Delta_{min}^{max} \quad (2.15)$$

Intégration des valeurs issues des différents opinions de k répondants :

$$\widetilde{\omega}_{ij}^k = 1/k \left(\widetilde{\omega}_{ij}^1 + \widetilde{\omega}_{ij}^2 + \dots + \widetilde{\omega}_{ij}^k \right) \quad (2.16)$$

2.7.4 Quelle méthode de prise de décision choisir ?

Dans le domaine de la gestion, il existe des outils et des méthodes qui peuvent aider à prendre des décisions plus efficaces, y compris la méthode du « brainstorming », la méthode Delphi, la méthode data enveloppent analysais (DEA); la méthode de la technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale (TOPSIS), la méthode de l'analyse hiérarchique (AHP), la méthode d'analyse en réseau (ANP), la méthode de laboratoire d'évaluation et de processus de décision (DEMATEL), la méthode de l'évaluation globale floue (FCE), etc. Les différentes méthodes de prise de décision ont différents champs d'application.

Le tableau 2.5 adapté de Hsu et al. (2013) présente une analyse détaillée des avantages et inconvénients des différentes méthodes d'évaluation :

Brainstorming	• Capacité de compléter et d'améliorer continuellement les conseils en matière de prise de décisions. • Prise des décisions en groupe. • Simple à utiliser.	• Nécessite une connaissance relativement approfondie des problèmes de prise de décision. • Couteuse en temps.
Delphi	• Permet aux experts de réfléchir indépendamment sans avoir à se réunir en personne (Dalkey and Helmer, 1963). • Enrichie les opinions pour certains experts par le feedback de Delphi (Dalkey and Helmer, 1963).	• Manque de conseils sur l'interprétation et l'analyse des résultats.
AED	• Utilisation des unités performantes comme des repères pour évaluer les unités inefficaces. • Les entrées et les sorties (Inputs and outputs) peuvent avoir différentes unités de mesure.	• Calcule uniquement l'efficacité relative et non l'efficacité absolue ou maximale • Un grand nombre de formules de programme linéaire peut causer un processus d'unités des décisions fastidieuses.
TOPSIS	• Indique simultanément les valeurs scalaires des meilleures et des pires alternatives. • Possibilité de visualisation.	• Les pondérations des indicateurs ne sont pas fournies. • L'alternative idéale et l'alternative idéale négative représentent les situations extrêmes.
AHP	• Hiérarchise et quantifie le processus de la pensée humaine.	• Structure linéaire descendante, sans rétroaction des niveaux inférieurs vers des niveaux supérieurs. • Les éléments sont considérés comme indépendants les uns des autres.
ANP	• Mise en place d'une structure de réseau avec des relations de dépendance et de rétroaction.	• La construction de la matrice de jugement est longue et complexe. • Nécessité de clarifier les relations entre les différents facteurs et envisager une simplification des relations.
DEMATEL	• Analyse efficacement l'interaction entre différents facteurs (directs et indirects). • Visualise les relations entre les facteurs.	• La pondération relative des critères n'est pas prise en compte. • Mauvaise performance en ce qui concerne la prise en compte de l'ambiguïté.
FCE	• Quantifie efficacement les facteurs flous et imprécis du processus décisionnel.	• Lorsque les indicateurs de décision sont nombreux, les résultats des calculs peuvent être trop proches les uns des autres, ce qui crée une hyper ambiguïté.

Tableau 2.5 : Analyse des avantages et inconvénients des méthodes d'évaluation

Chaque méthode a ses propres avantages et son champ d'application n'est pas identique. La plupart des méthodes conservent l'hypothèse commune d'une relation d'indépendance entre les indicateurs de décision (Hsu et al., 2013). Cependant, l'hypothèse d'une telle structure linéaire simplifie à l'excès la situation réelle. Les relations non linéaires (interactions et rétroaction) entre les critères doivent être prises en compte, car chaque action pourrait affecter et être affectée par d'autres actions (Pessanha & Prochnik, 2006). En raison de la complexité des décisions relatives à la sélection des concepts, il est nécessaire d'envisager la sélection et l'intégration de plusieurs méthodes de décision afin de pallier les insuffisances d'une seule méthode. En combinant et en intégrant deux ou plusieurs méthodes, nous pouvons obtenir un effet de complémentarité entre les forces et les faiblesses de chacune. Le niveau et la précision de l'évaluation peuvent être améliorés. Deuxièmement, grâce à la combinaison et à l'intégration de diverses méthodes, les attributs de l'objet d'évaluation peuvent être décrits sous différents angles, ce qui permet d'obtenir un résultat d'évaluation plus complet et plus objectif.

2.7.5 La méthode DEMATEL floue

La méthode DEMATEL (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory), proposée en 1971 par le laboratoire Battelle Memorial Institute de Genève, est une méthode efficace d'analyse et d'identification des relations factorielles à l'aide de la théorie des diagrammes et d'outils matriciels (Falatoonitoosi et al., 2014). Elle repose sur la construction d'une matrice des influences directes, fondée sur l'évaluation des interactions entre les facteurs étudiés. À partir de cette matrice, il est possible de calculer des indices de centralité, ce qui permet d'identifier les éléments exerçant un rôle causal ou dépendant, ainsi que leur niveau d'interconnexion (Huang & Gardoni, 2020b).

Grâce à sa précision dans la modélisation des relations causales, elle est souvent couplée à d'autres approches comme l'ANP, afin de consolider la pondération des critères. Gölcük et Baykasoğlu (2016) proposent d'ailleurs une synthèse détaillée des bénéfices et des modalités de l'intégration DEMATEL-ANP dans les problématiques multicritères.

Processus de la méthode DEMATEL

L'analyse DEMATEL est généralement divisée en cinq étapes (Gölcük et Baykasoğlu, 2016 ; Hsu et al., 2013) :

Étape 01 : Identification des éléments et construction de la matrice d'influence directe

Considérons un ensemble de critères $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$. Les relations entre paires de critères sont évaluées à l'aide de terme linguistiques traduits en nombres flous triangulaires selon l'échelle linguistique de la Table n. Cette évaluation repose généralement sur l'expertise de spécialistes, qui attribuent des scores selon l'intensité perçue de l'effet exercé par un facteur sur un autre. Ces évaluations permettent par la suite de construire une matrice floue $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{n \times n}$ des relations directes, que l'on convertit ensuite en valeurs précises via la méthode

CFCS “**Converting Fuzzy data into Crisp Scores**”(Opricovic & Tzeng, 2003), obtenant ainsi la matrice initiale $Z = [Z_{ij}]$ des relations directes nettes, ou z_{ij} est un nombre entre 0 et 1.

Very low	0	0	0.3
Low	0	0.3	0.5
Medium	0.2	0.5	0.8
High	0.5	0.7	1
Very high	0.7	1	1

Tableau 2.6 : Pondération supposée basée sur la théorie floue triangulaire

Étape 02 : Normalisation de la matrice d’influence directe

Afin d’assurer une convergence des calculs ultérieurs, la matrice d’influence directe est soumise à un processus de normalisation pour produire la matrice des relations directes normalisées $\aleph$. Les formules associées à cette étape sont présentées comme suit :

$$\aleph = [n_{ij}]_{n \times n} = s.Z, \text{ avec } s = 1/\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n Z_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2.17)$$

Étape 03 : Calcul de la matrice d’influence totale

Une fois la matrice normalisée, il est possible de déterminer l’influence globale exercée par chaque élément du système. Pour cela, la méthode calcule une **matrice d’influence totale**, qui intègre à la fois les effets directs et les effets indirects transmis par l’intermédiaire d’autres facteurs. Ce calcul repose sur l’hypothèse que les puissances successives de la matrice convergent, ce qui permet de résumer l’ensemble des interactions indirectes sous une forme analytique stable (Shieh et al., 2010).

$$T = [t_{ij}]_{n \times n} = \aleph(I - \aleph)^{-1}, \text{ avec } I \text{ matrice identité} \quad (2.18)$$

Étape 04 : Évaluation des indices de centralité et de causalité

A partir de la matrice d’influence totale T , on calcule la somme des lignes (effet émis) et la somme des colonnes (effet reçu) pour chaque facteur. Ces deux indicateurs permettent de déterminer :

- La centralité (somme des effets émis et reçus), qui reflète l’importance systémique d’un facteur ;
- Le degré de causalité (différence entre effets émis et reçus), qui permet de distinguer les éléments causaux (influent) des éléments réactifs (influencés).

$$D = \sum_{j=1}^n t_{ij}, R = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad (2.19)$$

Étape 05 : Construction du diagramme causal

Un diagramme causal est ensuite généré en traçant les composantes D+R (intensité totale/ niveau d'interaction globale du critère) et D-R (influence nette) permettant de distinguer les critères causes (+) et effets (-), et de structurer le modèle hiérarchique ou réseau en conséquence.

Ce diagramme fournit une aide précieuse pour la prise de décision, en mettant en évidence les éléments structurants du système. Il illustre notamment la dynamique des influences indirectes : un facteur A peut exercer un effet sur un facteur C par l'intermédiaire d'un facteur B, même en l'absence de lien direct entre A et C. Cette logique d'influence transmise est au cœur du raisonnement DEMATEL (Hsieh & Yeh, 2015).

2.7.6 Pondération des critères d'évaluation suivant AHP/ANP

L'évaluation des critères repose souvent sur le jugement subjectif des décideurs, ce qui rend difficile l'obtention de pondérations objectives (Chen, 2000 ; Chen & Tzeng, 2004). Pour modéliser les relations de dépendance et d'indépendance entre critères, la combinaison des approches AHP/ANP est largement utilisées.

2.7.6.1 Méthode de l'analyse hiérarchique

L'analyse hiérarchique (AHP) a été proposée en 1971 par le professeur Thomas L. Saaty de l'université de Pittsburgh. La méthode AHP est un moyen de quantifier les jugements subjectifs des gens (Hu, 2005).

L'AHP comporte quatre étapes, comme indiqué ci-dessous :

Étape 01 : Décomposer le problème à analyser en une structuration hiérarchique.

La première étape de l'AHP consiste à structurer la hiérarchie des problèmes suivant une approche Top-down. Au niveau supérieur, il y a l'objectif principal de tout le processus décisionnel. Le deuxième niveau regroupe les critères qui contribuent à l'objectif, et les différents candidats sont au niveau inférieur (Saaty 1990).

Étape 02 : Comparer les éléments de la hiérarchie par paires.

Par suite de cela, les décideurs se basent sur cette structure hiérarchique dans leurs évaluations de chaque paire de critères en utilisant l'échelle de 1 à 9 proposée par Saaty (1980). Chaque paire est comparée une seule fois et la valeur réciproque est attribuée automatiquement à la comparaison inverse.

Intensité	Définition	Explication
1	Égale	Les deux critères contribuent de façon égale à l'objectif
3	Marginalement fort	L'expérience et le jugement favorisent légèrement un critère par rapport à un autre
5	Fort	L'expérience et le jugement favorisent fortement un critère par rapport à un autre
7	Très Fort	Un critère est favorisé très fortement par rapport à un autre et sa dominance est démontrée dans la pratique
9	Extrêmement fort	Un critère est hautement favorisé par rapport à un autre et sa dominance est démontrée dans la pratique
2,4,6	Valeurs intermédiaires	Lorsque le compromis est nécessaire

Tableau 2.7 : Échelle d'évaluation tirée de Saaty (2004, p.4)

Étape 03 : Déterminer les priorités des actions.

Une fois les comparaisons effectuées, le vecteur des priorités locales w_1 est calculé à partir de la matrice de comparaison A :

$$Aw_1 = \lambda_{max}w_1, \quad \lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{w_i} \quad (2.20)$$

Où λ_{max} est la valeur propre maximale de la matrice A. Le vecteur est ensuite normalisé pour obtenir le vecteur de priorité locale w_2 .

Étape 04 : Vérifier la cohérence logique.

Les comparaisons par paires et les jugements de priorité sont essentiellement fondés sur des discussions et débats. Ainsi, ils ne sont pas des faits réels mais des opinions soigneusement réfléchies (Villanen 2013). Ce pourquoi il est nécessaire d'effectuer une vérification des incohérences. Cette dernière est approximée avec le Ratio de Consistance (CR), qui est dit acceptable lorsque sa valeur est inférieure ou égale à 0,1. En premier lieu, on calcule l'index de cohérence (CI), selon la formule suivante :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.21)$$

Avec : n = taille de la matrice.

L'index de cohérence est par la suite divisé par une valeur cohérente d'index aléatoire (RI), qui est un indice de consistance aléatoire moyen dérivé d'un échantillon.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.22)$$

Le random index RI est obtenu par consultation du tableau suivant :

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45

Tableau 2.8 : Random index RI

Une valeur CR inférieure ou égale à 0.1 est acceptable. Si le CR est supérieur à 0.1, Saaty (2004) suggère de refaire des comparaisons.

2.7.6.2 Méthode d'analyse en réseau ANP

L'Analytic Network Process (ANP) constitue une méthode d'aide à la décision particulièrement pertinente dans les environnements complexes où les critères sont interdépendants. Contrairement à l'AHP, qui suppose l'indépendance entre critères, l'ANP permet de modéliser les interactions et dépendances entre plusieurs objectifs qui peuvent parfois rentrer en conflit.

Le problème de décision est donc transformé en une structure en réseau construite sur la base de la compréhension du problème est des liens entre les différents facteurs.

Les différents composant d'un réseau sont :

- Le composant source (pas de flèches entrantes – Goal),
- Le composant puits (pas de flèches sortantes),
- L'état récurrent (cycle),
- L'état transitoire.

La figure 2.9 adapté de Saaty (2008) montre la comparaison entre la structure hiérarchique et la structure en réseau des deux méthodes AHP/ANP :

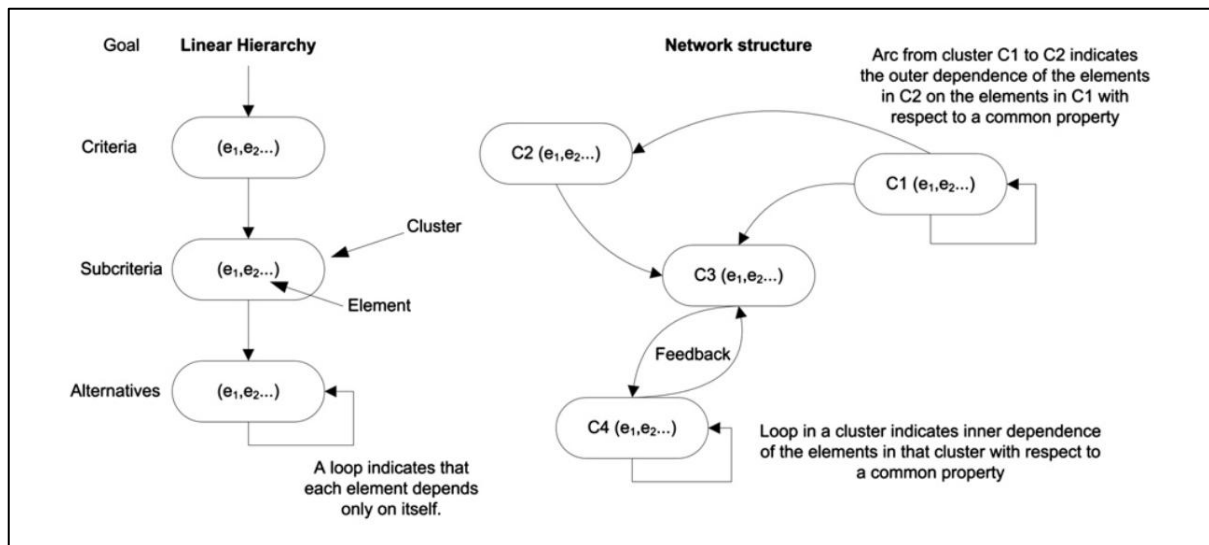


Figure 2.9 : Différence entre la structure hiérarchique et la structure en réseau

La mise en œuvre de l'ANP repose sur une série d'étapes structurées (Saaty, 2008 ; Hussey, 2014) :

1. Définition du problème de modélisation du réseau

Le décideur commence par clarifier l'objectif général, identifier les critères, sous-critères et alternatives, puis construire une représentation en réseau du problème.

2. Évaluation des relations via des comparaisons par paires

Une fois le problème de décision transformé en une structure de réseau spécifique, des comparaisons par paires entre les différents clusters et éléments sont effectuées afin de dériver les priorités globales. Le décideur fournit un jugement selon l'échelle fondamentale AHP (échelle de rapport de 1 à 9, développée par Saaty, *section 2.7.5.1*). Ce jugement reflète la dominance entre les critères ou clusters dans le réseau ANP ; il donne réponse à deux types de questions :

Étant donné un critère, lequel de deux éléments est plus dominant par rapport à ce critère ?

Lequel de deux éléments influence un troisième élément davantage par rapport à un critère ?

Toutes les influences doivent être considérées par rapport au même critère pour dériver les priorités globales, ce qui signifie que toutes les comparaisons doivent être effectuées à l'égard d'un seul critère, le critère de contrôle (c'est-à-dire le critère « but » dans la Fig. 2.9) du réseau ANP.

La structure de la matrice de comparaison s'il y a n composants est définie comme suit :

$$B = (b_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Où b_{ij} représente l'importance relative de la composante de la ligne i par rapport à la composante de la colonne j .

La matrice de jugement doit respecter les propriétés suivantes :

- $b_{ij} > 0$;
- $b_{ij} = 1/b_{ji}$;
- $b_{ii} = 1$.

Une fois toutes les comparaisons par paires terminées, les vecteurs de poids des priorités (w_i) sont calculés à l'aide de l'équation suivante :

$$w_i = \left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{1/n} / \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{1/n} \quad (2.24)$$

Par la suite, l'indice de cohérence est évalué en suivant la même méthodologie citée dans la section précédente.

3. Construction des super matrices

Trois types de super matrices sont utilisés :

- La super matrice non pondérée, qui capture l'influence locale d'un facteur sur un autre selon un critère donné.
- La super matrice pondérée, obtenue en ajustant la précédente avec les poids des clusters, de manière à former une matrice stochastique (somme des colonnes égale à 1).
- La super matrice limite, obtenue en élevant la super matrice pondérée à des puissances successives jusqu'à convergence. Les priorités finales extraites de cette matrice reflètent les poids globaux des facteurs dans le système.

a. Construction de la super matrice non pondérée

Une fois que toutes les comparaisons par paires ont réussi le test de cohérence, la moyenne géométrique des résultats de la priorité est appliquée pour intégrer les jugements des experts et former une super matrice W non pondérée.

La forme générale de la super matrice est décrite dans la figure ci-dessous :

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} c_1 \\ \vdots \\ c_i \\ \vdots \\ c_n \end{array}
\begin{array}{c} e_{11} \\ e_{12} \\ \vdots \\ e_{1m_1} \\ \vdots \\ e_{i1} \\ e_{i2} \\ \vdots \\ e_{im_i} \\ \vdots \\ e_{n1} \\ e_{n2} \\ \vdots \\ e_{nm_n} \end{array}
\left[\begin{array}{cccc}
c_1 & \dots & c_j & \dots & c_n \\
e_{11}e_{12} \dots e_{1m_1} & \dots & e_{j1}e_{j2} \dots e_{jm_j} & \dots & e_{n1}e_{n2} \dots e_{nm_n} \\
W_{11} & \dots & W_{1j} & \dots & W_{1n} \\
\vdots & & \vdots & & \vdots \\
W_{i1} & \dots & W_{ij} & \dots & W_{in} \\
\vdots & & \vdots & & \vdots \\
W_{n1} & \dots & W_{nj} & \dots & W_{nn}
\end{array} \right]
\end{array}$$

Figure 2.10 : Structure générale d'une super matrice Tirée de Saaty (2008, p.6).

b. Pondération de la super matrice

Deux approches principales permettent de pondérer les super matrices (Yang & Tzeng, 2011 ; Yang et al., 2013) :

- **Approche 1 : Normalisation uniforme**

Les colonnes sont normalisées en divisant les vecteurs propres par n , supposant que tous les groupes de critères ont la même importance. Cette simplification facilite le calcul mais peut sous-estimer la structure réelle du problème.

- **Approche 2 : Comparaisons par paires des clusters**

Chaque groupe (ou cluster) est pondéré par une comparaison par paires indépendante, permettant de refléter des degrés d'importance variables. Cette méthode offre une meilleure précision mais alourdit considérablement le processus, en particulier lorsque le nombre de critères est élevé. Toutes les matrices doivent également être testées pour leur cohérence.

c. Calcul de la super matrice limite

La super matrice pondérée est ensuite élevée à une très grande puissance afin d'obtenir les valeurs convergentes ou stables, en d'autres termes, pour obtenir une matrice dans laquelle toutes les colonnes sont identiques et chaque colonne donne le vecteur de priorité globale (Bottero & Lami, 2010). Les valeurs de cette matrice limite sont les priorités des éléments par rapport à l'objectif.

$$Matricelimit = \lim_{k \rightarrow \infty} W^{th^k} \quad (2.25)$$

Où W^{th} est la super matrice pondérée et k égale le nombre de puissances successives par lesquelles la super matrice pondérée est élevée. La valeur de la super matrice limite est le vecteur de priorité globale.

Les étapes de l'ANP sont synthétisées dans la figure suivante :

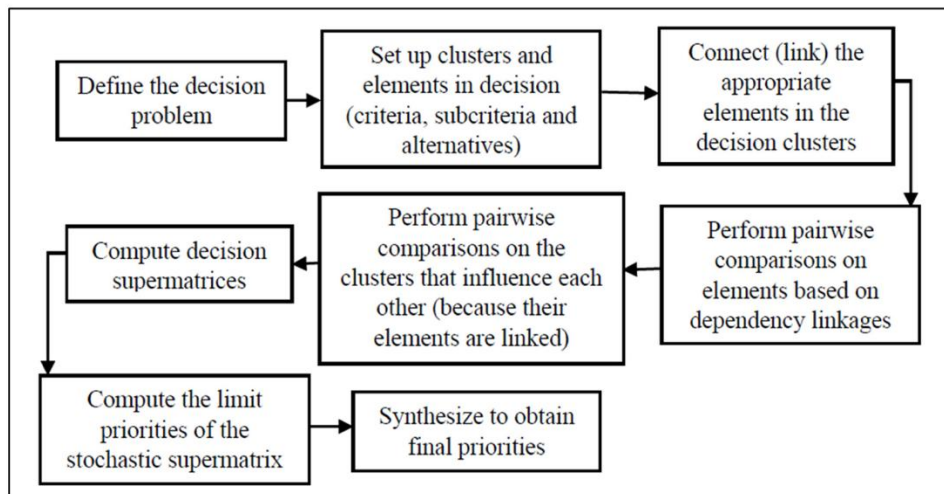


Figure 2.11 : Processus ANP – Analytical Network Process

2.7.7 TOPSIS

La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) est une approche de décision multicritère largement reconnue, introduite par Hwang et Yoon en 1981. Elle repose sur le principe que la meilleure alternative est celle qui se situe le plus proche d'une solution idéale et la plus éloignée d'une solution anti-idéale. La solution idéale correspond à la meilleure performance observée pour chacun des critères, tandis que la solution anti-idéale regroupe les pires performances possibles (Bao et al., 2012).

Toutefois, dans les contextes décisionnels complexes, les jugements des experts peuvent être imprécis, subjectifs ou exprimés en termes qualitatifs. Pour tenir compte de cette incertitude, une version floue de la méthode a été développée : le **TOPSIS flou**. Cette variante permet de convertir des évaluations linguistiques (comme « élevé », « moyen », « faible ») en nombres flous, généralement sous forme de nombres flous triangulaires, afin d'améliorer la robustesse du classement final (Buyukozkan & Cifci, 2012).

Le processus de la méthode TOPSIS floue suit plusieurs étapes :

Étape 01 : Construction de la matrice de décision floue normalisée pondérée

Chaque alternative est évaluée par rapport aux critères à l'aide de termes linguistiques (ex. : « élevé », « moyen »), convertis en valeurs floues triangulaires. Ces évaluations sont multipliées par les poids des critères, obtenus à partir de questionnaires ou de méthodes de pondération spécifiques, afin d'obtenir une matrice de décision floue normalisée et pondérée :

$$\tilde{v} = [\tilde{v}_{ij}]_{n \times m}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{x}_{ij} * w_j \quad (2.26)$$

Où w_j est le poids du critère j .

Étape 02 : Détermination des solutions idéales et anti-idéales floues

Deux profils de référence sont établis :

- La **solution idéale floue (FPIS)** contient les meilleures valeurs (maximum pour les critères bénéfiques, minimum pour les critères de coût) :

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_i^*\} = \{(max_j v_j, i \in \omega_b), (min_j v_j, i \in \omega_c)\} \quad (2.27)$$

- La **solution anti-idéale floue (FNIS)** est constituée des pires valeurs (minimum pour les critères bénéfiques, maximum pour les critères de coût) :

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_i^-\} = \{(max_j v_j, i \in \omega_b), (min_j v_j, i \in \omega_c)\} \quad (2.28)$$

Où ω_b représente l'ensemble des critères bénéfiques et ω_c représente l'ensemble des critères coût.

Étape 04 : Calcul des distances aux solutions de référence

Pour chaque alternative, on calcule :

- La distance à la solution idéale floue d_i^* :

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*) \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (2.29)$$

- La distance à la solution anti-idéale floue d_i^- :

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*) \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (2.30)$$

Étape 05 : Calcul du coefficient de proximité

Enfin, pour chaque alternative A_i , un indice de proximité est calculé pour refléter sa position relative par rapport à la solution idéale A^* :

$$FC_i = \frac{D_i^-}{D_i^* + D_i^-}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.31)$$

Plus cette valeur est proche de 1, plus l'alternative est considérée comme favorable.

2.7.8 Méthode hybride

Dans les problématiques logistiques complexes, notamment la sélection d'un site optimal pour l'implantation d'un hub, les critères à considérer sont souvent multiples, flous et interdépendants. Aucune méthode de décision unique ne permet à elle seule de prendre en charge cette complexité. C'est pourquoi il est courant d'avoir recours à une approche dite « hybride », combinant plusieurs outils complémentaires.

La méthodologie retenue repose sur la combinaison séquentielle de trois techniques : DEMATEL flou, ANP flou et TOPSIS flou. Chaque méthode intervient à une étape spécifique du processus décisionnel :

- **DEMATEL flou** est mobilisée pour modéliser les interrelations causales entre les critères. Les experts évaluent l'intensité des influences entre facteurs à l'aide de variables linguistiques floues, transformées ensuite en valeurs numériques via une méthode de défuzzification (CFCS). La matrice d'influence totale obtenue permet d'identifier les critères les plus influents dans le système.
- **F-ANP (ANP avec logique floue)** utilise ces relations pour construire une super matrice de priorités, tenant compte des dépendances entre critères. Ce réseau de dépendance reflète une structure plus réaliste que les modèles hiérarchiques classiques, notamment dans les contextes logistiques internationaux.
- **TOPSIS flou**, enfin, permet de classer les différentes alternatives (sites potentiels) en fonction de leur proximité à une solution idéale. Chaque site est évalué par rapport aux critères pondérés, les distances à l'option idéale et anti-idéale sont calculées, et un score de préférence est attribué à chaque alternative.

Ce processus séquentiel permet de combiner les avantages de chaque méthode : la structuration des dépendances (DEMATEL), le calcul des poids pondérés (ANP) et la sélection robuste de l'alternative optimale (TOPSIS).

2.7.9 Applicabilité des modèles et techniques

Dans le cadre du concept de hub logistique, il est essentiel d'évaluer la pertinence et l'adéquation des modèles de localisation ainsi que des techniques de résolution disponibles pour répondre à ce type de problématique.

Le choix du modèle dépend fortement des objectifs et perspectives propres à chaque étude. L'approche multicritère est principalement adoptée dans des études allant vers une vision macro-économique, permettant de guider et d'améliorer la compétitivité, en intégrant des critères qualitatifs comme ceux liés aux aspects politiques et juridiques. À l'inverse, les modèles à critère unique privilégient une perspective micro-économique, centrée sur les bénéfices directs pour les utilisateurs du hub, tel que la réduction des coûts ou l'augmentation des revenus.

Jusqu'à aujourd'hui, aucun modèle recensé ne parvient à combiner ces deux visions (macro et micro-économique) de manière intégrée. Dès lors, compte tenu de la diversité des critères à la fois qualitatifs et quantitatifs influençant la prise de décision en matière de localisation des hubs logistiques, les modèles multicritères semblent offrir une meilleure adéquation. Leur souplesse permet d'intégrer des critères conflictuels ainsi que les visions de différentes parties prenantes. Toutefois, ces modèles n'offrent pas la possibilité d'évaluer la répartition des flux ni leurs impacts sur le réseau de transport. Or, ces informations sont primordiales pour les décisions stratégiques, notamment en matière de planification d'infrastructures.

Aucun modèle pris isolément ne permet d'aborder l'ensemble des problématiques liées à la localisation des hubs logistiques. Une approche analytique combinant les caractéristiques des modèles multi-critères et mono-critère semble plus adaptée. Une première phase pourrait consister à utiliser un modèle multi-critères pour identifier un ou plusieurs emplacements potentiels, en se basant sur des enjeux stratégiques. Les résultats pourraient ensuite servir d'entrée à un **modèle de flux sur réseau** plus générique, permettant d'examiner les différentes routes, d'évaluer l'effet hub-and-spoke sur la répartition des flux, et de prendre en compte les considérations microéconomiques (réduction des coûts de transport, amélioration du niveau de service).

Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques et méthodologiques nécessaires à l'analyse de la problématique de localisation d'un hub logistique dans un contexte globalisé. Il a exposé les spécificités de la Supply Chain dans le secteur des services pétroliers, la nature des infrastructures logistiques, les principaux modèles de localisation, et les approches mathématiques et multicritères associées.

L'analyse a mis en évidence la complexité croissante des décisions logistiques, due à la multiplicité des critères à considérer, à la variabilité des environnements d'implantation, et aux interdépendances entre facteurs. Dans ce contexte, les approches hybrides intégrant des méthodes telles que DEMATEL, ANP et TOPSIS apparaissent comme des outils puissants pour structurer le raisonnement décisionnel.

Le chapitre suivant sera consacré à l'application de ces concepts à l'étude de cas spécifique traitée dans ce mémoire, à travers la construction d'un modèle de localisation pour le choix d'un hub régional destiné à desservir l'Afrique du Nord.

CHAPITRE 03 : Solution proposée

Introduction

À la lumière des constats posés dans le diagnostic (chapitre 01) et des apports conceptuels issus de la revue de littérature (chapitre 02), ce chapitre a pour objectif de traduire les enjeux identifiés en une démarche méthodologique concrète. Il s'agit ici d'appliquer les outils de modélisation, d'optimisation et d'aide à la décision pour proposer une solution réaliste et opérationnelle de restructuration du réseau logistique SLB en Afrique du Nord.

Plus précisément, le chapitre est structuré autour de trois volets complémentaires : Une première étape exploratoire basée sur la méthode du centre de gravité. Une seconde phase, plus fine, recourant à la programmation linéaire discrète. Enfin, une dernière séquence mobilisant des approches multicritères hybrides (DEMATEL, ANP, AHP, TOPSIS). L'ensemble de la démarche débouche sur une étude de cas détaillée, illustrée par des simulations technico-économiques et des analyses comparatives de scénarios, afin d'appuyer le choix final de la configuration logistique recommandée.

Le schéma ci-dessous résume l'enchaînement suivi pour ce chapitre :

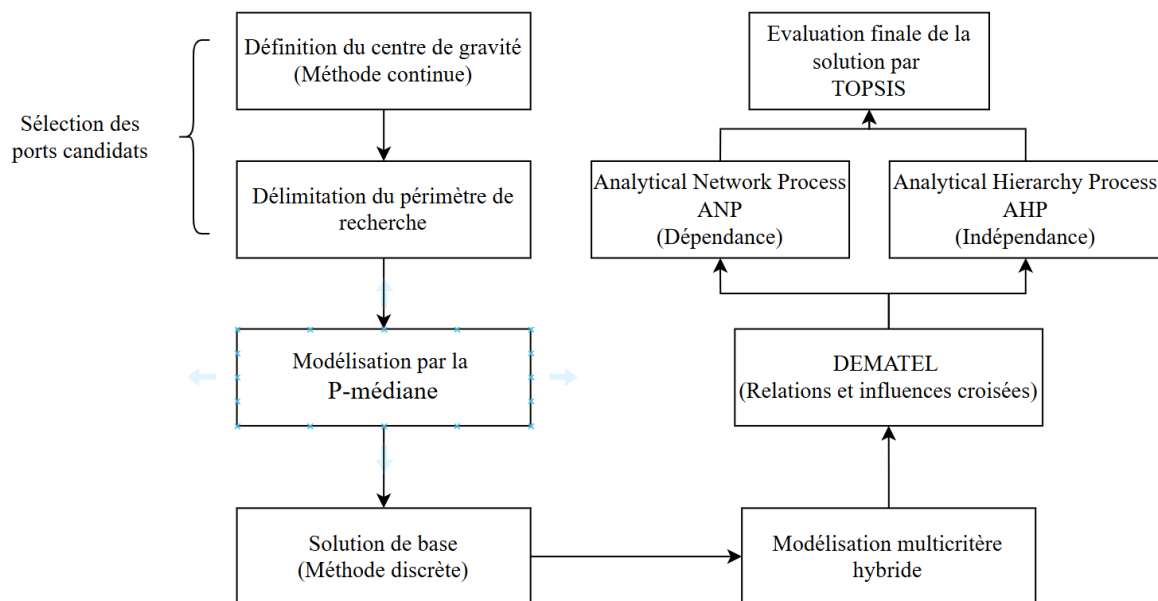


Schéma du chapitre 3

3.1 Détermination de la zone optimale : Application de la méthode du centre de gravité

Dans un premier temps, la méthode du centre de gravité a été utilisée comme outil d'approximation spatiale afin d'identifier une zone géographique centrale optimale entre les points de réception ciblés en Afrique du Nord.

Cette approche permet d'obtenir une première estimation de localisation en minimisant les distances globales entre le hub potentiel et les centres de consommation. Elle constitue ainsi une base rationnelle et exploratoire, utile pour restreindre l'espace de recherche avant le recours à des modèles plus élaborés intégrant des critères multiples.

3.1.1 Collecte et traitement des données

Avant d'appliquer les méthodes de calcul, il est indispensable de disposer des coordonnées géographiques précises des points de destination concernés. Dans le cadre de cette étude, les points de réception sélectionnés sont les suivants : Al Abraq, Kufra, Benghazi, Mitiga, Tripoli, Bizerte, Nabeul, Radès, Sidi Bouzid, Sfax, Tunis, Alger, Hassi Messaoud et Annaba.

Les coordonnées géographiques (latitude et longitude) de ces villes ont été extraites à partir de bases de données cartographiques ouvertes telles qu'OpenStreetMap et Google Maps, puis vérifiées et arrondies afin d'assurer une cohérence de traitement.

À partir de ces coordonnées, deux approches ont été mises en œuvre pour calculer le centre de gravité : la première repose sur un modèle sphérique, prenant en compte la courbure terrestre, tandis que la seconde utilise une approximation euclidienne dans un repère cartésien. Ces deux variantes permettent ainsi de comparer la sensibilité des résultats à la nature géométrique de l'espace considéré.

3.1.2 Calcul du centre de gravité selon la métrique sphérique

Le calcul des coordonnées cartésiennes du centre de gravité, basé sur la fréquence des expéditions à destination des différents points de réception de la région NAF et en utilisant la métrique de distance sphérique (section 2.3.1), donne les résultats suivants :

$$X^* = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} = \frac{3376,80432}{4125} = 0,818619229 \text{ rad}$$

$$Y^* = \frac{\sum w_i y_i}{\sum w_i} = \frac{711,827973}{4125} = 0,172564357 \text{ rad}$$

$$Z^* = \frac{\sum w_i z_i}{\sum w_i} = \frac{2246,68121}{4125} = 0,54464991 \text{ rad}$$

Le point calculé (0.818619229, 0.172564357, 0.54464991) a ensuite été projeté sur la surface terrestre. Ainsi les coordonnées réelles du point de gravite en degrés décimaux sont comme suit :

$$X^* = \text{latitude} = 34.5173^\circ$$

$$Y^* = \text{longitude} = 12.496^\circ$$

Ce point (34.5173, 12.496) ou 34°31'02.3"N 12°29'45.6"E est situé à environ 100km au sud de Lampedusa, une île italienne située dans la mer méditerranée, à mi-chemin entre la Tunisie et la Libye. Environ 200km au nord de la capitale Tripoli et à environ 160km de la ville tunisienne de Sfax.

Le tableau suivant présente les données utilisées pour le calcul du centre de gravité selon la métrique sphérique, en intégrant la fréquence des expéditions vers chaque point de réception.

Port	Latitude (°)	Longitude (°)	Frequence W	Latitude (rad)	Longitude (rad)	x _i	y _i	z _i	w _i *x _i	w _i *y _i	w _i *z _i
Al Abraq	32,0875	20,6192	2	0,56003	0,35987	0,79297	0,29836	0,53121	1,58593	0,59672	1,06243
Kufra	24,1558	23,3097	21	0,42160	0,40683	0,83796	0,36105	0,40922	17,59721	7,58209	8,59360
BenGhazi	32,1144	20,0664	142	0,56050	0,35022	0,79557	0,29061	0,53161	112,97129	41,26651	75,48883
Mitiga	32,8981	13,4633	231	0,57418	0,23498	0,81656	0,19549	0,54315	188,62628	45,15740	125,46687
Tripoli	32,875	13,1875	2618	0,57378	0,23017	0,81771	0,19160	0,54281	2140,76130	501,61832	1421,07146
Bizerte	37,275	9,8733	2	0,65057	0,17232	0,78395	0,13645	0,60564	1,56790	0,27289	1,21128
Nabeul	36,4565	10,7347	1	0,63629	0,18736	0,79023	0,14981	0,59421	0,79023	0,14981	0,59421
Rades	36,7769	10,1725	1	0,64188	0,17754	0,78838	0,14146	0,59870	0,78838	0,14146	0,59870
Sidi Bouzid	35,0333	9,4667	2	0,61145	0,16523	0,80767	0,13467	0,57405	1,61533	0,26935	1,14810
Sfax	34,7404	10,7603	107	0,60633	0,18780	0,80729	0,15342	0,56986	86,38042	16,41592	60,97492
Tunis	36,8065	10,1815	302	0,64239	0,17770	0,78806	0,14153	0,59911	237,99266	42,74231	180,93256
Alger	36,7538	3,0588	165	0,64147	0,05339	0,80007	0,04275	0,59838	132,01199	7,05431	98,73233
Hassi Messaoud	30,5833	6,0833	524	0,53378	0,10617	0,85604	0,09123	0,50879	448,56631	47,80568	266,60623
Annaba	36,8667	7,75	7	0,64345	0,13526	0,79273	0,10789	0,59996	5,54908	0,75520	4,19969
SUM / Center of Gravity			4125	8,29770	2,94485	11,27520	2,43633	7,80670	3376,80432	711,82797	2246,68121
x _c					0,81862	Mer Méditerranée – au sud de Lampedusa (Italie)					
y _c					0,17256						
z _c					0,54465						
X*					34,5173						
Y*					12,4960						

Tableau 3.1 : Calcul du centre de gravité selon la métrique sphérique

3.1.3 Calcul du centre de gravité suivant la métrique euclidienne

Afin de vérifier l'optimalité de la méthode sphérique, le centre de gravité a également été calculé sans tenir compte de la forme sphérique de la Terre. En utilisant une métrique de distance euclidienne, les coordonnées obtenues sont les suivantes :

$$X^* = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} = \frac{136196,6316}{4125} = 33,0173652^\circ$$

$$Y^* = \frac{\sum w_i y_i}{\sum w_i} = \frac{49047,4217}{4125} = 11,890284^\circ$$

La différence entre les deux méthodes est minime dans ce cas, car la non-linéarité du système de coordonnées terrestres n'affecte principalement que les pôles. Cependant, l'étendue de la zone étudiée était importante, ce qui explique que les résultats ne soient pas identiques. Il est donc raisonnable de privilégier le résultat qui prend en compte la nature sphérique de la Terre.

Le tableau ci-dessus présente les calculs réalisés sous Excel pour déterminer les coordonnées du centre de gravité en tenant compte de la sphéricité de la Terre :

Port	Latitude	Longitude	Frequence	n*X	n*Y
Al Abraq	32,0875	20,6192	2	64,175	41,2384
Kufra	24,1558	23,3097	21	507,2718	489,5037
BenGhazi	32,1144	20,0664	142	4560,2448	2849,4288
Mitiga	32,8981	13,4633	231	7599,4611	3110,0223
Tripoli	32,875	13,1875	2618	86066,75	34524,875
Bizerte	37,275	9,8733	2	74,55	19,7466
Nabeul	36,4565	10,7347	1	36,4565	10,7347
Rades	36,7769	10,1725	1	36,7769	10,1725
Sidi Bouzid	35,0333	9,4667	2	70,0666	18,9334
Sfax	34,7404	10,7603	107	3717,2228	1151,3521
Tunis	36,8065	10,1815	302	11115,563	3074,813
Alger	36,7538	3,0588	165	6064,377	504,702
Hassi Messaoud	30,5833	6,0833	524	16025,6492	3187,6492
Annaba	36,8667	7,75	7	258,0669	54,25
Somme	475,4232	168,7272	4125	136196,6316	49047,4217
X*		33,0173652	Mer Méditerranée – au large de Zuwara		
Y*		11,890284			

Tableau 3.2 : Coordonnées pondérées des points de réception et calcul du centre de gravité euclidien

3.1.4 Délimitation du périmètre de recherche et sélection des ports candidats

Sur la base du centre de gravité calculé, un rayon de 600 km a été initialement retenu pour identifier les ports candidats à l'accueil d'un hub logistique intermédiaire.

Ce seuil correspond à une distance logistique raisonnable, fréquemment utilisée comme rayon d'influence pour les hubs régionaux. Il permet de couvrir les principaux ports de la Méditerranée centrale accessibles en moins d'une journée de transit, tout en assurant une desserte efficace vers les points de réception en Afrique du Nord.

Ce rayon s'appuie également sur des recommandations issues de la littérature logistique, qui situent la zone optimale de desserte d'un hub entre 400 et 800 km, en fonction des infrastructures disponibles et de la nature des flux logistiques [1].

Toutefois, pour ne pas exclure des ports majeurs offrant un potentiel stratégique avéré, la sélection finale a également intégré quelques sites légèrement en dehors de ce périmètre. Ce choix constitue un compromis entre la proximité géographique théorique et la pertinence logistique opérationnelle. Il repose en outre sur une recommandation explicite de l'équipe logistique de SLB, qui a souligné l'importance de prendre en compte certains ports à forte valeur stratégique.

Par ailleurs, seuls des ports européens ont été retenus, un choix éclairé par plusieurs éléments issus de l'analyse PESTEL (Section 1.3.1. Chapitre 1). Bien que certains ports d'Afrique du Nord, tels que Alger, Radès ou même Djendjen, présentent un potentiel de développement à moyen terme, ils restent confrontés à des contraintes structurelles : saturation partielle, retards dans les processus de modernisation, faiblesse des connexions ferroviaires et routières, et manque d'intégration logistique régionale. À cela s'ajoutent des incertitudes d'ordre

géopolitique (instabilité politique, contraintes douanières, risques de blocage ou de congestion) qui peuvent compromettre la fiabilité d'un hub à vocation internationale. À l'inverse, les ports européens offrent une meilleure stabilité institutionnelle, des infrastructures portuaires et arrière-portuaires plus robustes, ainsi qu'un accès direct à des corridors logistiques multimodaux performants. Ce différentiel en matière de maturité logistique et de résilience opérationnelle justifie le recentrage stratégique de l'analyse sur des ports exclusivement européens pour accueillir le hub SLB.

Nous avons donc décidé de retenir sept (07) localisations qui feront l'objet de notre analyse :

a. Naples, Piraeus, Cagliari, Palerme et Malte : ports les plus proches du point théorique, positionnés au cœur de la Méditerranée, offrant une excellente couverture vers l'Afrique du Nord.

b. Gênes, Marseille, Barcelone et Valence : ports plus éloignés du centre mais disposant de capacités portuaires avancées, d'infrastructures intermodales solides, et d'une connectivité maritime directe avec les pays NAF.

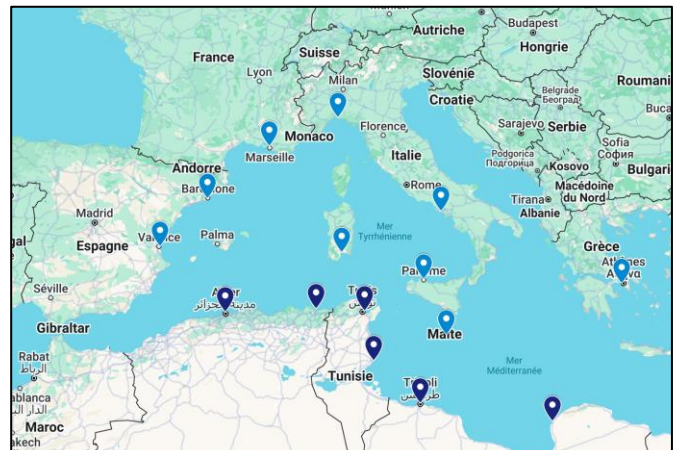


Figure 3.1 : Points de réception et ports de sélection

3.2 Optimisation discrète de la localisation : Modélisation par le problème de la p -médiane

Après l'identification d'une zone centrale grâce à la méthode du centre de gravité, il était nécessaire de recourir à une modélisation plus opérationnelle pour sélectionner le ou les ports les mieux adaptés parmi un ensemble fini d'alternatives.

Dans cette optique, plusieurs modèles issus de la littérature ont été envisagés. Notre choix s'est finalement porté sur la formulation p -médiane, en raison de sa parfaite adéquation avec les objectifs logistiques et les spécificités du problème étudié.

Ce choix méthodologique s'explique par la correspondance directe entre ce modèle et les objectifs opérationnels ainsi que les caractéristiques structurelles du problème. L'enjeu principal consiste à identifier, parmi un ensemble fini de ports présélectionnés, ceux qui permettent de minimiser les coûts de transport et les délais (*lead times*) entre les hubs potentiels et les points de réception. Le modèle de la p -médiane répond précisément à cette logique en visant la réduction globale des distances ou des temps de transit, ce qui est cohérent avec l'objectif de rationalisation des coûts logistiques.

Par ailleurs, aucune contrainte de capacité ni de coût fixe d'activation des sites n'étant prise en compte dans ce cadre, il n'était ni pertinent ni nécessaire d'utiliser des modèles plus complexes, tels que les modèles *capacitated*. La formulation p -médiane offre également une grande souplesse : elle permet d'imposer la sélection d'un site donné (comme Marseille, exigé par SLB pour les flux à destination de l'Algérie) et autorise la simulation de différents scénarios via le paramètre p , représentant le nombre de hubs à activer.

Enfin, ce modèle bénéficie d'un ancrage solide dans la littérature scientifique, où il est reconnu comme un outil robuste et éprouvé pour la localisation de plateformes logistiques dans des contextes sans contraintes capacitaires explicites.

3.2.1 Modélisation mathématique

La présente section détaille la mise en œuvre opérationnelle du modèle mathématique basé sur l'approche de la p -médiane.

Ce modèle s'appuie sur des données terrain précises, notamment les fréquences d'expédition pour chaque site client ainsi que les distances géographiques réelles calculées entre chaque couple (hub candidat, point de réception). Il intègre également des contraintes spécifiques au contexte étudié :

- L'activation obligatoire du hub existant de Marseille, qui doit être impérativement retenue, indépendamment des résultats du modèle. Cette contrainte découle d'une décision stratégique interne à SLB, qui dispose déjà d'un hub opérationnel dans cette ville, dédié à la consolidation des expéditions vers l'Algérie.
- La limitation à deux hubs le nombre total de sites à implanter, afin de respecter une configuration réaliste et maîtrisée du réseau logistique, conformément à la volonté de SLB.
- L'affectation exclusive de chaque point de réception à un seul hub sélectionné, garantissant ainsi la traçabilité, la cohérence des flux et la simplicité opérationnelle. Cette règle s'inscrit dans les pratiques logistiques de SLB, qui privilégient des schémas de distribution unifiés par destination pour limiter la fragmentation des expéditions.

Ensemble, paramètres et variables de décision

Indices :

- $i \in I$: ensemble des sites candidats à l'implémentation des hubs (ports européen)
- $j \in J$: ensemble des points de réception (sites clients de la région NAF)

Paramètres :

- a_{ij} : distance entre le site i et client j
- f_j : fréquence des expéditions associées au client j
- p : nombre de hubs à sélectionner ($p = 2$)
- $i_0 \in I$: site devant obligatoirement être activé (Marseille)

Variables de décision :

- $x_i \in \{0,1\}$: 1 si le site i est sélectionné comme hub, 0 sinon
- $y_{ij} \in \{0,1\}$: 1 si le client j est affecté au hub i , 0 sinon

Fonction objectif :

$$\text{Minimiser } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_j a_{ij} y_{ij}$$

Contraintes :

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} y_{ij} &= 1, \quad \forall j \in J \\ \sum_{i \in I} x_i &= 2 \\ y_{ij} &\leq x_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J \\ x_{i_0} &= 1 \\ x_i &\in \{0,1\}, \quad y_{ij} \in \{0,1\} \end{aligned}$$

3.2.2 Implémentation du modèle dans CPLEX

Le modèle de localisation fondé sur la p-médiane a été implémenté à l'aide du langage de modélisation OPL (Optimization Programming Language) dans l'environnement IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Cette plateforme a été choisie pour sa puissance de résolution en programmation linéaire en nombres entiers mixtes (PLNE) et pour sa flexibilité dans la déclaration des paramètres et des contraintes.

3.2.2.1 Définition des ensembles et des paramètres

Les ensembles représentant les ports candidats (hubs potentiels) et les villes portuaires nord-africaines (points de réception) ont été définis dans un fichier de données externe (.dat).

- Les distances entre les ports et les clients ont été calculées à partir des coordonnées GPS recueillies dans le cadre de l'analyse géographique.
- Les fréquences d'expéditions associées à chaque destination ont été extraites et calculées à partir d'une base de données opérationnelle de SLB, traitée et consolidée lors du diagnostic logistique initial (Chapitre 01).

3.2.2.2 Déclaration des variables et des contraintes

Le modèle OPL comporte la déclaration des variables de décision x_i (activation d'un hub) et y_{ij} (affectation client-hub), suivie de l'expression de la fonction objectif et de l'ensemble des contraintes : affectation unique, limitation à deux hubs, dépendance de l'affectation à l'ouverture effective d'un hub, et activation obligatoire de Marseille.

Organisation du code

Des extraits de l'implémentation sont présentés en figures ci-dessous, illustrant la structure du programme dans CPLEX :

La figure 3.2 présente la déclaration des ensembles, paramètres et variables :

```
main{
    // Generating & Solving initial model
    thisOplModel.generate(); // Generating the current model instance
    if (cplex.solve())
    {
        var ofile = new IloOplOutputFile("C:/CPLEX/PMEDIANDET.txt");
        ofile.writeln(thisOplModel.printSolution());
        ofile.writeln("Solving CPU Elapsed Time in (Seconds): ", cplex.getCplexTime());
        ofile.close();
        var obj = cplex.getObjValue();
        writeln("The Value of the Objective Function Value is (Total Weighted Distance): ", obj);
        writeln("Solving CPU Elapsed Time in (Seconds): ", cplex.getCplexTime());
        thisOplModel.postProcess();
    }
    else {
        writeln("No Solution");
    }
}
// indicies
{string} Hubs =...;
{string} Customers =...;

// Parameters and Data
int MaxHubsP =...;
float Demand[Customers] =...;
float Distance[Hubs][Customers]=...;

// Decision Variables
dvar boolean Open[Hubs];
dvar boolean Assign[Hubs][Customers];
```

Figure 3.2 : Déclaration du modèle en OPL

Par la suite, la figure 3.3 regroupe la formulation de la fonction objectif et des contraintes :

```
// Model

// Total demand weighted distance
minimize sum(w in Hubs, c in Customers) Distance[w][c]*Demand[c]*Assign[w][c];

subject to{

    // Each customer must be served
    forall(c in Customers)
        EachCustomersDemandMustBeMet:
            sum(w in Hubs) Assign[w][c] == 1;

    // Open exactly MaxHubsP hubs
    UseMaximum_P_Hubs:
        sum(w in Hubs) Open[w] == MaxHubsP;

    // Do not assign a customer to a closed hub
    forall(w in Hubs, c in Customers)
        CannotAssignCustomertoH_UnlessItIsOpen:
            Assign[w][c] <= Open[w];

    // Fix Marseille to always be open
    FixMarseilleHub:
        Open["Marseille"] == 1; // Marseille must always be open
}
```

Figure 3.3 : Fonction objectif et contraintes en OPL

Enfin, la figure 3.4 recense le chargement et structuration des données dans le fichier .dat :

```

// List of Hubs
Hubs = { "Marseille", "Barcelone", "Valence", "Genes", "Naples", "Palerme", "Malte", "Piraeus", "Cagliari" };

// List of Customers (Countries)
Customers = { "Alger", "Annaba", "Tunis", "Sfax", "Benghazi", "Tripoli" };

// Maximum number of hubs that can be opened
MaxHubsP = 2;

// Demand for each customer
Demand = [2003,15,515,333,928,4344];

// Distance matrix between Hubs and Customers
Distance = [
[759, 759, 874, 1248, 1827, 1374], // Marseille
[516, 698, 905, 1279, 1866, 1405], // Barcelone
[418, 775, 1005, 1411, 2016, 1537], // Valence
[977, 833, 864, 1207, 1687, 1327], // Genes
[1072, 694, 572, 831, 1111, 929], // Naples
[931, 525, 340, 587, 1003, 687], // Palerme
[1079, 666, 444, 401, 651, 353], // Malte
[847, 1983, 1350, 1363, 740, 1176], // Piraeus
[603, 287, 301, 666, 1259, 792] // Cagliari
];

```

Figure 3.4 : Déclaration et implémentation des données

3.2.3 Résultats du modèle et arbitrages

La résolution du modèle de localisation p-médiane sous IBM CPLEX, intégrant les contraintes spécifiques à notre étude, a conduit à l'identification des sites optimaux suivants :

- Marseille, imposé comme hub stratégique en raison de l'existence d'une plateforme opérationnelle déjà en place dédiée à l'Algérie.
- Malte, sélectionné comme second site en raison de sa centralité géographique.

3.2.3.1 Affectation des points de réception

La figure 3.5 suivante présente les résultats obtenus après compilation du programme :

```

// solution (optimal) with objective 4030020
// Quality Incumbent solution:
// MILP objective                                4,0300200000e+06
// MILP solution norm |x| (Total, Max)           3,00000e+00  1,00000e+00
// MILP solution error (Ax=b) (Total, Max)       0,00000e+00  0,00000e+00
// MILP x bound error (Total, Max)               0,00000e+00  0,00000e+00
// MILP x integrality error (Total, Max)         0,00000e+00  0,00000e+00
// MILP slack bound error (Total, Max)          0,00000e+00  0,00000e+00
//
Assign = [
[1 0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0]
[0 1 1 1 1 1]
[0 0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0]];
Open = [1 0 0 0 0 1 0 0];

Solving CPU Elapsed Time in (Seconds): 1547670.781

```

Figure 3.5 : Résultats de la modélisation p-médiane

Les résultats de la résolution ont donc abouti à la configuration suivante :

- Marseille dessert Alger (Algérie), conformément à la logique historique des flux SLB.
- Malte prend en charge Tunis, Sfax (Tunisie), Tripoli, Benghazi (Libye) et Annaba (Algérie), ce qui permet une meilleure couverture géographique de l'axe central méditerranéen.

3.2.3.2 Interprétation stratégique des résultats

Bien que le modèle p-médiane ait attribué Annaba au hub de Malte sur la base de la distance minimale, un ajustement managérial a été réalisé, rattachant ce flux à Marseille. Cette décision repose sur :

- La cohérence nationale des flux algériens,
- La consolidation des opérations via l'infrastructure SLB existante à Marseille,
- La simplification opérationnelle et douanière.

Ce cas souligne les limites d'une approche purement mathématique : si la p-médiane permet une configuration efficace basée sur la minimisation des distances, la localisation d'un hub logistique reste une décision multidimensionnelle. Elle doit intégrer des critères stratégiques, réglementaires et opérationnels interdépendants, au-delà du simple coût.

C'est dans cette optique que la suite de ce travail s'appuie sur une approche multicritère intégrée, mobilisant des méthodes d'aide à la décision floues (DEMATEL, ANP et TOPSIS), afin d'aboutir à un choix de hub fondé sur une vision globale et pondérée des facteurs en jeu.

3.3 Modélisation décisionnelle multicritère hybride appliquée à la localisation du hub

Après avoir obtenu une première estimation de la localisation optimale à l'aide de la méthode du centre de gravité, puis modélisé les flux dans un cadre mathématique structuré, il demeure indispensable d'intégrer des dimensions qualitatives et stratégiques difficilement quantifiables, pourtant déterminantes dans le choix d'un hub logistique.

Dans ce contexte, une méthode d'aide à la décision multicritère, combinant la logique floue à plusieurs outils complémentaires, a été retenue. Cette approche permet notamment de prendre en compte :

- L'interdépendance entre les critères logistiques et stratégiques,
- L'incertitude et la subjectivité des jugements experts,
- La nécessité de pondérer et hiérarchiser les alternatives disponibles.

La démarche s'articule autour de trois outils : **DEMATEL flou**, utilisé pour identifier et structurer les relations causales entre critères ; **ANP flou**, pour calculer les pondérations globales dans un réseau interdépendant ; et **TOPSIS flou**, pour évaluer et classer les sites portuaires potentiels en fonction de leur proximité à une solution idéale.

Cette section présente donc, étape par étape, l'application de cette méthode hybride à notre cas d'étude.

3.3.1 Détermination des critères de sélection

L'efficacité d'une méthode d'aide à la décision multicritère repose en grande partie sur la pertinence des critères retenus. Dans le cadre de cette étude, le choix d'un hub logistique intermédiaire pour desservir la région Afrique du Nord a nécessité la prise en compte de critères à la fois quantitatifs et qualitatifs, reflétant les différentes dimensions stratégiques, économiques, techniques et opérationnelles liées à ce type de décision.

La sélection des critères s'est appuyée sur plusieurs sources complémentaires :

- Une revue de la littérature scientifique relative à la localisation des hubs multimodaux et maritimes ;
- Les orientations stratégiques de l'entreprise SLB, notamment en matière de réduction des délais, d'amélioration de la qualité des flux logistiques et d'optimisation des coûts.

Afin de structurer l'évaluation des ports candidats de manière cohérente et exhaustive, les critères retenus ont été classés en trois grandes catégories complémentaires : Performance logistique, Port & capacité, et Macro-environnement.

1. **Performance logistique** : Cette catégorie regroupe les critères liés à l'efficacité opérationnelle et à la fluidité des flux. Elle reflète la capacité d'un port à assurer des délais réduits, une connectivité maritime dense, et cela a un coût compétitif.
2. **Port & Capacité** : Cette dimension englobe les aspects physiques et humains liés aux infrastructures du port et à sa capacité d'accueil. Ces critères permettent d'évaluer la capacité du port à absorber des volumes importants et à s'intégrer dans un réseau multimodal fluide.
3. **Macro-environnement** : Cette dernière catégorie prend en compte les facteurs exogènes liés au contexte politique, économique et institutionnel dans lequel le port est implanté. Elle comprend la stabilité politique, les incitations économiques, la clarté des procédures douanières, et la sécurité juridique. Ces éléments, bien que difficilement quantifiables, jouent un rôle déterminant dans la pérennité des opérations logistiques et la confiance des opérateurs.

Les critères retenus sont résumés dans le tableau suivant :

Catégorie	Code	Critère	Description	Type
Performance logistique	C1	Coût logistique	Coût total incluant transport, manutention, accostage, droits, etc.	Quantitatif
	C2	Localisation relative	Proximité du port des marchés (points de départ/destination)	Quantitatif
	C3	Lead time	Durée moyenne de traitement et d'acheminement	Quantitatif
	C4	Densité de la ligne maritime	Fréquence des départs vers les destinations nord-africaines	Quantitatif
Port & capacité	C5	Infrastructures et équipements portuaires	Disponibilité des entrepôts, plateformes, connexions intermodales (rail, aéroport)	Qualitatif
	C6	Qualité de la main-d'œuvre	Compétences, coût et accessibilité de la main d'œuvre locale	Qualitatif
	C8	Système d'exploitation portuaire et degré de digitalisation	Utilisation des technologies modernes, accès aux services numériques portuaires	Qualitatif
Macro-environnement	C7	Stabilité politique	Niveau de sécurité, stabilité gouvernementale, climat socio-politique	Qualitatif
	C9	Avantages économiques	Présence de zones franches, incitations fiscales, subventions logistiques	Qualitatif
	C10	Facilité douanière et garanties juridiques	Simplicité des procédures, sécurité juridique, transparence administrative	Qualitatif

Tableau 3.2 : Critères de sélection des hubs logistiques

3.3.2 Analyse de la causalité des critères à l'aide de la méthode DEMATEL

3.3.2.1 Analyse des relations entre critères

La méthode DEMATEL a été mobilisée dans cette étude afin d'analyser les relations causales et d'interdépendances entre les critères de sélection des ports logistiques candidats. Elle permet de structurer le système décisionnel en identifiant les facteurs les plus influents, ainsi que ceux qui dépendent fortement des autres.

Dans le cadre de ce travail, les degrés d'influence entre critères ont été évalués à partir d'une analyse experte, fondée sur : une revue approfondie de la littérature sur les facteurs de succès des hubs portuaires internationaux, ainsi que l'expertise de l'équipe SLB.

Étape 01 : Création de la matrice d'influence directe

Cette démarche qualitative a permis de construire une matrice d'influence directe, dans laquelle chaque cellule représente le niveau d'impact estimé d'un critère sur un autre. Ainsi, la matrice suivante traduit les évaluations des relations causales entre critères sous forme linguistique, selon une gradation floue allant de « aucune influence » à « influence très forte »:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	No	VL	L	VL	L	VL	VL	VL	VL	L
C2	L	No	VH	L	H	VL	VL	VL	VL	VL
C3	H	VL	No	L	H	VL	VL	VL	VL	VL
C4	VH	VL	VH	No	H	VL	VL	VL	VL	VL
C5	H	H	H	VH	No	L	VL	L	L	H
C6	L	VL	L	VL	VL	No	VL	VL	VL	VL
C7	H	VL	H	H	H	H	No	H	VH	VH
C8	L	VL	L	L	L	H	VL	No	L	H
C9	L	L	L	L	L	L	L	L	No	VH
C10	H	VL	VH	H	H	L	H	L	VH	No

Tableau 3.3 : Matrice d'influence entre les dix critères de sélection

Par la suite, la Fuzzy matrice d'influence directe initiale a été remplie selon une l'échelle linguistique (section 2. Table 4) transformée en notation floue. Le tableau 3.4 présente cette dernière :

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	(0,0,0)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)
C2	(0,0.3,0.5)	(0,0,0)	(0.7,1,1)	0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)
C3	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0)	0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)
C4	(0.7,1,1)	(0,0,0.3)	(0.7,1,1)	(0,0,0)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)
C5	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0.7,1,1)	(0,0,0)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)
C6	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)
C7	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0)	(0.5,0.7,1)	(0.7,1,1)	(0.7,1,1)
C8	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)
C9	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0)	(0.7,1,1)
C10	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0.7,1,1)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)	(0,0.3,0.5)	(0.7,1,1)	(0,0,0)

Tableau 3.4 : Matrice floue des influences directes entre critères de sélection

Étape 02 : Défuzzification de la matrice d'influence directe (Méthode CFCS)

La matrice d'influence directe obtenue à l'étape précédente exprime les relations entre critères sous forme de nombres flous triangulaires (a, b, c), afin de capturer l'incertitude inhérente à l'évaluation experte. Toutefois, pour poursuivre le traitement mathématique et appliquer les étapes suivantes de la méthode DEMATEL, il est nécessaire de transformer ces évaluations floues en valeurs numériques précises.

Ce processus de transformation est appelé défuzzification. Parmi les différentes techniques existantes, la méthode CFCS (Converting Fuzzy data into Crisp Scores) a été retenue dans cette étude pour sa capacité à conserver les proportions relatives des jugements tout en assurant une cohérence globale des valeurs obtenues.

La méthode CFCS repose sur les étapes suivantes :

1. Tout d'abord, on commence par le calcul du score normalisé pour chaque nombre flou triangulaire, selon les équations 2.9, 2.10 et 2.11.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	(0,0,0)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)
C2	(0,0.3,0.5)	(0,0,0)	(0.7,1,1)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)
C3	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)
C4	(0.7,1,1)	(0,0,0.3)	(0.7,1,1)	(0,0,0)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)
C5	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0.7,1,1)	(0,0,0)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)
C6	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)	(0,0,0.3)
C7	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0)	(0.5,0.7,1)	(0.7,1,1)	(0.7,1,1)
C8	(0,0.3,0.5)	(0,0,0.3)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0,0,0)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)
C9	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0.3,0.5)	(0,0,0)	(0.7,1,1)
C10	(0.5,0.7,1)	(0,0,0.3)	(0.7,1,1)	(0.5,0.7,1)	(0.5,0.7,1)	(0,0.3,0.5)	(0.5,0.7,1)	(0,0.3,0.5)	(0.7,1,1)	(0,0,0)

Tableau 3.5 : Matrice d'influence directe normalisée

2. À la suite de cette étape, on détermine le degré de proximité de chaque valeur par rapport à l'idéal, à l'aide des équations 2.12 et 2.13.

À titre illustratif, le tableau 3.6 présente les valeurs normalisées droite et gauche xls_{i1} et xrs_{i1} du critère C1 "Coût logistique" :

Tableau 3.6 : Calcul des valeurs normalisées du critère coût logistique

	C1									
xls_{i1}	0	0.23	0.58	0.77	0.58	0.23	0.58	0.23	0.23	0.58
xrs_{i1}	0	0.42	0.77	1	0.77	0.42	0.77	0.42	0.42	0.77

$$xls_{21} = xb_{21}/(1 + xb_{21} - xa_{21}) \quad xrs_{21} = xc_{21}/(1 + xc_{21} - xb_{21})$$

Le calcul des degrés de proximité des neuf autres critères figure en annexe A.1.

3. Conversion finale en une valeur numérique unique dite *crisp* suivant les équations 2.14 et 2.15.

À titre d'exemple, pour une évaluation donnée avec $xls = 0.23$ et $xrs = 0.42$, la valeur crisp obtenue est :

$$x_{21} = [xls_{21}(1 - xls_{21}) + xrs_{21} \times xrs_{21}]/(1 - xls_{21} + xrs_{21})$$

$$x_{21} = [0.23 \times (1 - 0.23) + 0.42 \times 0.42]/(1 - 0.23 + 0.42) = 0.296$$

Les valeurs des éléments de la matrice d'influence directe finale sont présentés ci-dessous :

$$R = \begin{bmatrix} 0,0000 & 0,0433 & 0,2961 & 0,0433 & 0,2961 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0433 & 0,0433 & 0,2961 \\ 0,296 & 0,0000 & 0,9567 & 0,2961 & 0,0433 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0433 \\ 0,7039 & 0,9567 & 0,0000 & 0,7039 & 0,2961 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0433 & 0,0433 & 0,0433 \\ 0,9567 & 0,0433 & 0,0433 & 0,0000 & 0,7039 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0433 & 0,0433 & 0,0433 \\ 0,7039 & 0,2961 & 0,7039 & 0,9567 & 0,0000 & 0,2961 & 0,0433 & 0,2961 & 0,2961 & 0,7039 \\ 0,2960 & 0,0433 & 0,2961 & 0,0433 & 0,2961 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0433 & 0,0433 & 0,0433 \\ 0,7039 & 0,0433 & 0,7039 & 0,7039 & 0,7039 & 0,7039 & 0,0000 & 0,7039 & 0,9567 & 0,9567 \\ 0,2960 & 0,0433 & 0,2961 & 0,2961 & 0,2961 & 0,7039 & 0,2961 & 0,0000 & 0,2961 & 0,7039 \\ 0,2960 & 0,2961 & 0,2961 & 0,2961 & 0,2961 & 0,2961 & 0,2961 & 0,2961 & 0,0000 & 0,9567 \\ 0,7039 & 0,0433 & 0,9567 & 0,0433 & 0,7039 & 0,2961 & 0,7039 & 0,2961 & 0,9567 & 0,0000 \end{bmatrix}$$

Étape 03 : Calcul de la matrice de relation directe normalisée et de la matrice d'influence totale

La matrice d'influence directe (R) est ensuite normalisée selon l'équation 2.17, pour former la matrice d'influence directe normalisée (N).

$$N = \begin{bmatrix} 0,000 & 0,007 & 0,048 & 0,007 & 0,048 & 0,000 & 0,000 & 0,007 & 0,007 & 0,048 \\ 0,048 & 0,000 & 0,155 & 0,048 & 0,007 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,007 \\ 0,114 & 0,115 & 0,000 & 0,114 & 0,048 & 0,000 & 0,000 & 0,007 & 0,007 & 0,007 \\ 0,155 & 0,007 & 0,007 & 0,000 & 0,114 & 0,000 & 0,000 & 0,007 & 0,007 & 0,007 \\ 0,114 & 0,048 & 0,114 & 0,155 & 0,000 & 0,048 & 0,007 & 0,048 & 0,048 & 0,114 \\ 0,048 & 0,007 & 0,048 & 0,007 & 0,048 & 0,000 & 0,000 & 0,007 & 0,007 & 0,007 \\ 0,114 & 0,007 & 0,114 & 0,114 & 0,114 & 0,114 & 0,000 & 0,114 & 0,115 & 0,155 \\ 0,048 & 0,007 & 0,048 & 0,048 & 0,048 & 0,114 & 0,048 & 0,000 & 0,048 & 0,114 \\ 0,048 & 0,048 & 0,048 & 0,048 & 0,048 & 0,048 & 0,048 & 0,048 & 0,000 & 0,155 \\ 0,114 & 0,007 & 0,155 & 0,007 & 0,114 & 0,048 & 0,114 & 0,048 & 0,155 & 0,000 \end{bmatrix}$$

Puis, la matrice d'influence totale T est calculée selon l'équation 2.18, où I est la matrice identité :

$$T = \begin{bmatrix} 0,033 & 0,024 & 0,075 & 0,031 & 0,068 & 0,011 & 0,010 & 0,017 & 0,024 & 0,065 \\ 0,088 & 0,030 & 0,172 & 0,076 & 0,032 & 0,004 & 0,003 & 0,005 & 0,008 & 0,019 \\ 0,167 & 0,171 & 0,053 & 0,145 & 0,083 & 0,009 & 0,006 & 0,017 & 0,020 & 0,033 \\ 0,190 & 0,024 & 0,045 & 0,032 & 0,137 & 0,013 & 0,008 & 0,019 & 0,024 & 0,040 \\ 0,215 & 0,091 & 0,189 & 0,208 & 0,078 & 0,076 & 0,034 & 0,073 & 0,091 & 0,165 \\ 0,073 & 0,022 & 0,068 & 0,208 & 0,063 & 0,007 & 0,005 & 0,014 & 0,016 & 0,023 \\ 0,264 & 0,073 & 0,237 & 0,208 & 0,224 & 0,172 & 0,050 & 0,16 & 0,227 & 0,259 \\ 0,131 & 0,040 & 0,121 & 0,098 & 0,111 & 0,143 & 0,073 & 0,030 & 0,095 & 0,165 \\ 0,139 & 0,082 & 0,133 & 0,103 & 0,116 & 0,084 & 0,079 & 0,078 & 0,057 & 0,207 \\ 0,231 & 0,071 & 0,251 & 0,103 & 0,196 & 0,099 & 0,142 & 0,093 & 0,211 & 0,102 \end{bmatrix}$$

Étape 04 : Calcul des coefficients d'importance relative et de polarité des critères

La somme des lignes, des colonnes, des valeurs de $(R_i + C_j)$ et $(R_i - C_j)$ de la matrice T est calculée à partir des équations 2.19, comme indiqué sur le tableau 3.7 :

Critère	D	R	D+R	D-R	Polarité
C1	0.357	1.531	1.89	-1.17	Effet
C2	0.435	0.627	1.06	-0.19	Effet
C3	0.703	1.344	2.05	-0.64	Effet
C4	0.531	1.032	1.56	-0.50	Effet
C5	1.218	1.108	2.33	0.11	Cause
C6	0.320	0.617	0.94	-0.3	Effet
C7	1.874	0.409	2.28	1.47	Cause
C8	1.009	0.506	1.51	0.5	Cause
C9	1.079	0.773	1.85	0.31	Cause
C10	1.500	1.079	2.58	0.42	Cause

Tableau 3.7 : Somme des influences exercées et subies pour chaque critère

La valeur seuil est par la suite calculée et présentée dans le tableau 3.8 ci-dessous selon différents critères :

Seuil	
Min	0.003
Average	0.090
Higher	0.177
Max	0.264

Tableau 3.8 : Seuil de limitation des relations d'influence

Étape 05 : Génération du diagramme cause à effet

Dans notre cas, afin de limiter le graphe de causalité aux relations les plus significatives, le seuil d'influence retenu pour l'interprétation a été fixé à 0.09, conformément à la méthode proposée par Tzeng et al. (2007), selon laquelle il convient de retenir uniquement les influences dont l'intensité dépasse la moyenne des éléments de la matrice d'influence totale.

Le graphe de causalité est construit à partir des valeurs $(D_i + R_j)$ et $(D_i - R_j)$ des indicateurs de décision. Le diagramme de causalité (Figure 3.6) est présenté ci-dessous :

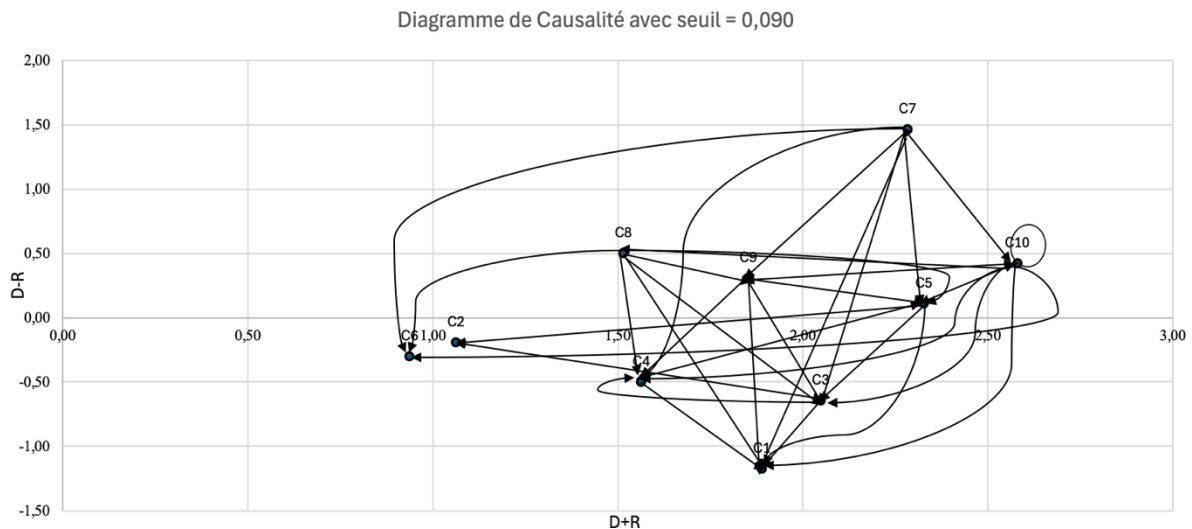


Figure 3.6 : Diagramme de causalité

Étape 06 : Analyse du diagramme DEMATEL

1. Importance relative des critères – Interconnexion globale ($D_i + R_j$)

La somme $D_i + R_j$ traduit le niveau d'implication globale d'un critère, c'est-à-dire la somme des influences qu'il exerce et subit. Plus cette valeur est élevée, plus le critère est central dans le réseau décisionnel.

Le critère ayant la plus grande valeur de $D_i + R_j$ est C10 – Facilité douanière et garanties juridiques, avec une valeur de 2,58, suivi par C5 – Infrastructures portuaires (2,33) et C7 – Stabilité politique (2,28). Ces résultats indiquent que ces trois critères sont les plus connectés au système de décision, influençant et étant influencés par de nombreux autres facteurs.

À l'inverse, C6 – Qualité de la main-d'œuvre (0,94) et C2 – Localisation relative (1,06) apparaissent comme des critères moins interconnectés, avec un rôle plus périphérique.

2. Polarité des critères ($D_i - R_j$) – Rôle causal ou effet

Le score $D_i - R_j$ permet de distinguer les critères causes (influenceurs, $D_i - R_j > 0$) des critères effets (influencés, $D_i - R_j < 0$).

L'analyse révèle que C7 – Stabilité politique (1,47), C8 – Digitalisation du port (0,5), C9 – Avantages économiques (0,31), C10 – Facilité douanière (0,42) et C5 – Infrastructures portuaires (0,11) constituent le groupe des causes. Ces critères exercent une forte influence sur les autres dimensions.

À l'inverse, les critères tels que C1 – Coût logistique (-1,17), C3 – Lead time (-0,64) et C4 – Densité de la ligne maritime (-0,50) appartiennent au groupe des effets. Cela signifie qu'ils

sont principalement impactés par d'autres variables du système, notamment les facteurs d'environnement macroéconomique et d'infrastructure.

3.3.2.2 Analyse des influences entre Cluster

Dans un environnement décisionnel complexe, les dépendances ne se limitent pas aux interactions entre critères, mais peuvent également exister entre les catégories (ou clusters) de critères eux-mêmes. Par exemple, les performances logistiques d'un port peuvent être directement affectées par les infrastructures disponibles, tandis que le contexte macro-environnemental peut conditionner la capacité du port à attirer des investissements logistiques.

Afin de modéliser ces influences croisées entre clusters, une seconde application de la méthode DEMATEL a été réalisée au niveau agrégé, en considérant les trois grandes catégories :

- **Performance logistique,**
- **Macro-environnement,**
- **Port & Capacités**

Une matrice d'influence directe entre ces clusters a été construite à partir d'une évaluation experte, selon les mêmes principes que ceux appliqués à la matrice critère-critère. Cette matrice permet de déterminer la structure de la super matrice de contrôle dans l'ANP.

	CL1	CL2	CL3
CL1	No	L	M
CL2	H	No	M
CL3	H	L	No

Tableau 3.9 : Matrice d'influence

Par la suite, la Fuzzy matrice d'influence directe initiale a été remplie à l'aide de la même échelle linguistique.

	CL1	CL2	CL3
CL1	(0 ; 0 ; 0)	(0 ; 0.3 ; 0.5)	(0.2 ; 0.5 ; 0.8)
CL2	(0.5 ; 0.7 ; 1)	(0 ; 0 ; 0)	(0.2 ; 0.5 ; 0.8)
CL3	(0.5 ; 0.7 ; 1)	(0 ; 0.3 ; 0.5)	(0 ; 0 ; 0)

Tableau 3.10 : Matrice d'influence directe floue

En suivant les mêmes étapes de la méthode CFCS (Annexe A.2), la matrice R des relations directes à valeurs crisp est présentée ci-dessous :

$$R = \begin{bmatrix} 0,000 & 0,278 & 0,488 \\ 0,704 & 0,000 & 0,488 \\ 0,704 & 0,278 & 0,000 \end{bmatrix}$$

Par la suite, on obtient la matrice des relations directes T en suivant les mêmes étapes précédentes :

$$T = \begin{bmatrix} 0,576 & 0,450 & 0,703 \\ 1,140 & 0,399 & 0,881 \\ 1,013 & 0,501 & 0,525 \end{bmatrix}$$

La matrice T est ensuite normalisée pour obtenir la matrice T^{th} (ci-après dénommée « matrice normalisée »). Cette matrice sera utilisée pour construire la super matrice pondérée ANP de la présente étude.

$$T^{th} = \begin{bmatrix} 0,211 & 0,333 & 0,333 \\ 0,418 & 0,295 & 0,418 \\ 0,371 & 0,371 & 0,249 \end{bmatrix}$$

3.3.3 Pondération des critères

Dans une logique comparative, cette étude adopte une double approche pour l'évaluation des poids des critères :

- L'approche F-ANP, qui repose sur l'hypothèse que les critères sont interdépendants et interagissent selon un réseau de relations causales (identifié via DEMATEL) ;
- L'approche F-AHP, qui suppose que les critères sont indépendants les uns des autres, et peuvent être évalués selon une structure hiérarchique simple.

Cette seconde hypothèse permet de tester la robustesse des résultats, tout en offrant un cadre plus classique et plus largement utilisé en décision multicritère. L'objectif est de comparer les poids globaux obtenus dans les deux cas, afin d'identifier d'éventuelles variations significatives liées à la structure du modèle.

3.3.3.1 Ponderation des critères selon l'Analytical Network Process approach (ANP)

Étant donné que les interactions entre critères et clusters influencent fortement l'analyse ANP, la méthode DEMATEL a été mobilisée afin de représenter graphiquement la structure des dépendances sous forme de réseau. Une fois les relations causales identifiées, l'approche ANP a permis d'estimer les pondérations globales des critères. Les principales étapes de cette démarche sont détaillées ci-dessous :

Étape 01 : Construction de la structure en réseau ANP

Le réseau de dépendance ANP a été construit en s'appuyant sur les relations causales identifiées à l'aide de DEMATEL.

Ce réseau structurel présenté dans la figure 3.7 ci-dessous, modélise les interactions entre clusters et critères, servant de base à la construction des super matrices dans les étapes suivantes

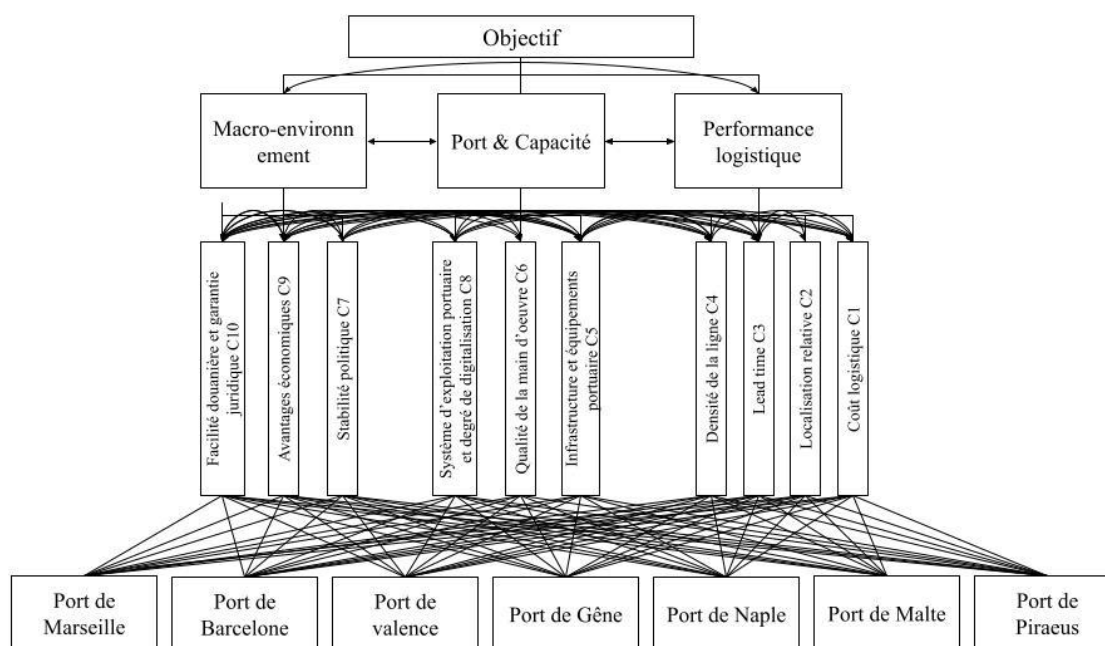


Figure 3.7 : Structure d'un réseau ANP

Étape 02 : Construction de la matrice non pondérée

Dans cette étude, l'échelle d'évaluation de 1 à 9 définie par Saaty (voir tableau 5, section2.) est utilisée quant au processus de comparaison par paires, identifiant ainsi le degré d'importance relative des indicateurs de décision.

Les comparaisons par paires ont été menées selon trois configurations principales :

- **Comparaison des critères vis-à-vis de l'objectif global**

Cela consiste à évaluer, pour chaque cluster, l'importance relative de ses critères par rapport à l'objectif final (ici : sélectionner le port optimal). Les priorités locales obtenues sont placées dans la colonne de l'objectif, avec les critères correspondants en ligne.

Par exemple, pour la catégorie « Performance logistique », les critères C1 à C4 sont comparés deux à deux : en répondant à la question, par exemple, « Entre le coût logistique (C1) et le lead time (C3), lequel a le plus d'impact sur l'objectif, et dans quelle mesure ? ».

Le tableau 3.11 représente la matrice de comparaison des critères du cluster performance logistique par rapport à l'objectif :

Performance logistique	C1	C2	C3	C4
C1	1	3	1/3	1/2
C2	1/3	1	1/4	1/3
C3	3	4	1	2
C4	2	3	1/2	1

Tableau 3.11 : Matrice de comparaison par paires des critères

Cette opération est répétée pour les critères des deux autres clusters : Macro-environnement et Port & capacités (Annexe B.4 et annexe B.5).

- **Comparaison des critères entre eux vis-à-vis d'un critère de contrôle**

Cette étape consiste à établir les matrices de comparaison par paires, en évaluant l'importance relative des éléments par rapport à un critère de contrôle commun (Annexe B8-B.20). Cette étape permet de construire les vecteurs de priorité locale, qui serviront ensuite à alimenter la colonne du critère de contrôle de la super matrice non pondérée.

À titre d'illustration, le tableau 3.12 suivant présente une matrice de comparaison par paires entre les critères C1, C2, C3, C4, C9 et C10, évalués par rapport au critère de contrôle C5 (infrastructures et équipements portuaires). Ce dernier critère a été identifié comme influent dans le système, et son rôle de contrôle permet de pondérer les autres critères en fonction de leur réponse à cette influence.

C5	C1	C2	C3	C4	C9	C10
C1	1	1/3	5	5	1/2	2
C2	3	1	4	6	2	4
C3	1/5	1/4	1	1/2	1/4	1/3
C4	1/5	1/6	2	1	1/4	1/3
C9	2	1/2	4	4	1	3
C10	1/2	1/4	3	3	1/3	1

Tableau 3.12 : Matrice de comparaison intra-Cluster selon les relations de dépendance

- **Comparaison des clusters entre eux vis-à-vis de l'objectif**

Enfin, les catégories de critères (ou clusters) sont également comparées entre elles, toujours par rapport à l'objectif final. Cette étape permet de déterminer l'importance relative de chaque groupe dans le système global.

Par exemple, si l'on considère que le cluster « Performance logistique » est cinq fois plus important que le cluster « Macro-environnement », cette préférence est traduite sur l'échelle de Saaty, puis normalisée. Les poids obtenus (Annexe B.2, par exemple 0,63 pour « Performance logistique » et 0,11 pour « Macro-environnement ») servent à pondérer les colonnes correspondantes de la super matrice, afin de former la super matrice pondérée dans l'étape suivante.

Objectif	Performance logistique	Macro-environnement	Port & Capacités
Performance logistique	1	5	3
Macro-environnement	1/5	1	1/3
Port & Capacités	1/3	3	1

Tableau 3.13 : Matrice de comparaison par paires des clusters

La super matrice non pondérée des indicateurs est obtenue lorsque toutes les comparaisons par paires pour lesquelles il existe des relations d'interaction sont terminées.

$$\mathcal{W} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.18 & 0.25 & 0.00 & 0.13 & 0.17 & 0.19 & 0.00 & 0.10 & 0.05 & 0.28 & 0.03 \\ 0.09 & 0.00 & 0.00 & 0.23 & 0.00 & 0.35 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.45 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.05 & 0.00 & 0.04 & 0.04 & 0.09 & 0.06 \\ 0.28 & 0.00 & 0.00 & 0.64 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.04 & 0.09 & 0.18 & 0.06 \\ 0.63 & 0.25 & 0.00 & 0.00 & 0.83 & 0.00 & 0.17 & 0.08 & 0.20 & 0.45 & 0.12 \\ 0.11 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.33 & 0.14 & 0.23 & 0.00 & 0.09 \\ 0.23 & 0.15 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.29 \\ 0.26 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.20 & 0.15 & 0.00 & 0.00 & 0.20 \\ 0.10 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.25 & 0.30 & 0.18 & 0.14 & 0.00 & 0.16 \\ 0.67 & 0.35 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.11 & 0.00 & 0.29 & 0.24 & 0.46 & 0.36 \end{bmatrix}$$

Étape 03 : Calcul de la super matrice pondérée

La super matrice pondérée $\mathcal{W}^*$ résultante est obtenue en multipliant chaque bloc de la supermatrice non pondérée $\mathcal{W}$ par le poids correspondant de son cluster de contrôle, tel que défini dans les étapes précédentes :

- Les éléments de la colonne G (Goal - Objectif) seront multipliés par les poids des clusters issus de la matrice de comparaison de la section 3. Tableau.15
- Le reste des éléments seront multipliés par la matrice T^{th} obtenue dans la section 3.1.1.1.

$$\mathcal{W}^* = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.12 & 0.05 & 0.00 & 0.03 & 0.04 & 0.06 & 0.00 & 0.03 & 0.02 & 0.09 & 0.01 \\ 0.05 & 0.00 & 0.00 & 0.05 & 0.00 & 0.12 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.28 & 0.00 & 0.21 & 0.00 & 0.00 & 0.02 & 0.00 & 0.01 & 0.01 & 0.03 & 0.02 \\ 0.18 & 0.00 & 0.00 & 0.13 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.03 & 0.06 & 0.02 \\ 0.17 & 0.09 & 0.00 & 0.00 & 0.31 & 0.00 & 0.04 & 0.03 & 0.05 & 0.17 & 0.05 \\ 0.03 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.08 & 0.05 & 0.06 & 0.00 & 0.03 \\ 0.02 & 0.06 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.09 \\ 0.07 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.05 & 0.05 & 0.00 & 0.00 & 0.07 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.10 & 0.13 & 0.05 & 0.06 & 0.00 & 0.05 \\ 0.07 & 0.15 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.05 & 0.00 & 0.08 & 0.10 & 0.13 & 0.11 \end{bmatrix}$$

Étape 04 : Calcul de la super matrice limite

Pour obtenir la super matrice limite, la super matrice pondérée a été élevée successivement à la puissance K, jusqu'à convergence des vecteurs colonnes. Dans cette étude, la convergence a été atteinte à l'itération K=22, ce qui permet d'obtenir les poids globaux stables des critères.

$$\mathcal{W}_{lim} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 \\ 0.09 & 0.09 & 0.09 & 0.09 & 0.09 & 0.09 & 0.09 & 0.09 & 0.09 & 0.09 & 0.09 \\ 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 \\ 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0.11 \\ 0.19 & 0.19 & 0.19 & 0.19 & 0.19 & 0.19 & 0.19 & 0.19 & 0.19 & 0.19 & 0.19 \\ 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 \\ 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 \\ 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 \\ 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 \\ 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 \end{bmatrix}$$

Étape 05 : Interprétation des poids globaux et hiérarchisation des critères

L'analyse de la super matrice limite permet d'obtenir les poids globaux de chaque critère, en tenant compte à la fois des dépendances internes (intra-cluster) et des influences croisées (inter-cluster). Ces poids reflètent l'importance systémique des critères dans le processus décisionnel.

Le tableau suivant présente les poids normalisés des dix critères de sélection, ainsi que leur classement décroissant en fonction de leur contribution globale à l'objectif :

Critère	Poids	Classement
C5	0.192	1
C10	0.162	2
C3	0.114	3
C4	0.108	4
C1	0.104	5
C9	0.103	6
C2	0.089	7
C7	0.05	8
C8	0.041	9
C6	0.037	10

Tableau 3.14 : Poids des critères et classement selon l'ANP

3.3.3.2 Ponderation des critères avec AHP

La méthode AHP floue (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) a été utilisée afin de déterminer les poids relatifs des critères de sélection dans un cadre hiérarchique classique. Cette approche repose sur le principe des comparaisons par paires, permettant d'évaluer l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de l'objectif principal, en utilisant une logique floue pour mieux intégrer l'incertitude et la subjectivité des jugements.

La démarche de l'AHP flou se déroule en plusieurs étapes :

Étape 01 : Construction de la matrice de comparaison floue

Les critères ont été comparés deux à deux, selon leur importance relative pour atteindre l'objectif de localisation du hub. L'échelle de Saaty floue a été utilisée pour encoder ces préférences, comme présenté dans les tableaux ci-dessous.

Le premier tableau présente les comparaisons par paires, en suivant l'échelle de 1 à 9 citée dans la section :

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	1	3	1/2	1/2	2	7	3	7	3	3
C2	1/3	1	1/4	1/5	1/3	3	1/3	1/3	1/3	1/3
C3	2	4	1	2	3	7	3	3	3	3
C4	2	5	1/2	1	1/2	7	2	2	2	2
C5	1/2	3	1/3	2	1	5	3	5	3	2
C6	1/7	1/3	1/7	1/7	1/5	1	1/4	1/3	1/2	1/3
C7	1/3	3	1/3	1/2	1/3	4	1	3	3	1/3
C8	1/7	3	1/3	1/2	1/5	3	1/3	1	1	1/2
C9	1/3	3	1/3	1/2	1/3	2	1/3	1	1	1/2
C10	1/3	3	1/3	1/2	1/2	3	3	2	2	1

Tableau 3.15 : Matrice de comparaison des paires de critères - AHP

Tandis que le second tableau a été obtenu à la suite de la conversion des valeurs Crisp du tableau 3.15, sur la base de l'échelle Floue :

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	(1,1,1)	(2,3,4)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(1,2,3)	(6,7,8)	(1/4,1/3,1/2)	(6,7,8)	(2,3,4)	(2,3,4)
C2	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1/5,1/4,1/3)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)
C3	(1,2,3)	(3,4,5)	(1,1,1)	(1,2,3)	(2,3,4)	(6,7,8)	(2,3,4)	(2,3,4)	(2,3,4)	(2,3,4)
C4	(1,2,3)	(4,5,6)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)	(6,7,8)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)
C5	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,2,3)	(1,1,1)	(4,5,6)	(2,3,4)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,2,3)
C6	(1/8,1/7,1/6)	(1/4,1/3,1/2)	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(0.2,0.25,0.33)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)
C7	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(3,4,5)	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)
C8	(1/8,1/7,1/6)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)
C9	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,2,3)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)
C10	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,1,1)

Tableau 3.16 : Matrice de comparaison floue - AHP

Étape 02 : Calcul du poids global de chaque critère

La méthode du Fuzzy geometric mean a été utilisée pour calculer le poids flou de chaque critère, avant de procéder à la défuzzification. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant

	Geometric Mean Value $\check{r}_i$
C1	(1.5157 ; 2.1368 ; 2.9455)
C2	(0.3458 ; 0.4279 ; 0.5676)
C3	(1.8882 ; 2.7764 ; 3.6030)
C4	(1.1031 ; 1.7568 ; 2.5508)
C5	(1.2671 ; 1.8421 ; 2.5210)
C6	(0.2254 ; 0.2774 ; 0.3701)
C7	(0.7071 ; 0.9603 ; 1.3493)
C8	(0.4745 ; 0.6101 ; 0.8360)
C9	(0.4941 ; 0.6711 ; 0.9716)
C10	(0.7490 ; 1.1161 ; 1.6438)

Tableau 3.17 : Geometric mean value

Par la suite, on calcul les poids Fuzzy ω_i et Crisp ω_i^* des dix critères de sélection, comme illustré dans l'exemple ci-dessous. Le tableau suivant regroupe les poids des différents critères:

Tableau 3.18 : Calcul des poids des critères de sélection selon l'AHP

	$\check{r}_i$	ω_i	M_i	ω_i^*
C1	(1.5157 ; 2.1368 ; 2.9455)	(0.09 ; 0.17 ; 0.34)	0.20	0.17
C2	(0.3458 ; 0.4279 ; 0.5676)	(0.02 ; 0.03 ; 0.06)	0.04	0.03
C3	(1.8882 ; 2.7764 ; 3.6030)	(0.11 ; 0.22 ; 0.41)	0.25	0.21
C4	(1.1031 ; 1.7568 ; 2.5508)	(0.06 ; 0.14 ; 0.29)	0.16	0.14
C5	(1.2671 ; 1.8421 ; 2.5210)	(0.07 ; 0.15 ; 0.29)	0.17	0.15
C6	(0.2254 ; 0.2774 ; 0.3701)	(0.01 ; 0.02 ; 0.04)	0.03	0.02
C7	(0.7071 ; 0.9603 ; 1.3493)	(0.04 ; 0.08 ; 0.15)	0.09	0.08
C8	(0.4745 ; 0.6101 ; 0.8360)	(0.03 ; 0.05 ; 0.10)	0.06	0.05
C9	(0.4941 ; 0.6711 ; 0.9716)	(0.03 ; 0.05 ; 0.11)	0.06	0.06
C10	(0.7490 ; 1.1161 ; 1.6438)	(0.04 ; 0.09 ; 0.19)	0.11	0.09

$$\omega_{10} = \check{r}_{10} * (r_{min} + r_{med} + r_{max})^{-1} = (0.7490; 1.1161; 1.6438) * \left(\frac{1}{0.0576} + \frac{1}{0.0795} + \frac{1}{0.1140} \right) = (0.04; 0.09; 0.19)$$

Étape 03 : Classement final des critères AHP floue

Les poids obtenus ont permis de classer les critères selon leur importance perçue dans le processus de décision. Ce classement est ensuite comparé à celui obtenu via l'ANP afin d'évaluer la cohérence des deux approches.

Critère	Poids	Classement
C3	0.21	1
C2	0.17	2
C5	0.15	3
C4	0.14	4
C10	0.09	5
C7	0.08	6
C9	0.06	7
C8	0.05	8
C2	0.03	9
C6	0.02	10

Tableau 3.19 : Poids des critères de sélection et classement selon l'AHP

3.3.4 Comparaison des résultats obtenus par les méthodes F-AHP et F-ANP

Afin d'analyser les résultats de manière plus approfondie, une comparaison est réalisée entre les poids globaux des critères obtenus à l'aide des deux approches utilisées dans cette étude : l'ANP flou, qui modélise les interdépendances entre critères et catégories, et l'AHP flou, qui repose sur une structure hiérarchique supposant l'indépendance des facteurs.

Cette comparaison vise à évaluer la cohérence générale des classements issus des deux méthodes et à mettre en évidence les différences d'interprétation qu'entraîne la prise en compte (ou non) des interactions entre critères.

3.3.4.1 Tableau de synthèse comparative

Le tableau ci-dessous présente les poids normalisés issus de chaque méthode, ainsi que les classements associés :

Code	Critère	Poids ANP	Rang ANP	Poids AHP	Rang AHP
C1	Coût logistique	0.104	5	0.17	2
C2	Localisation relative	0.089	7	0.03	9
C3	Lead time	0.114	3	0.21	1
C4	Densité de la ligne maritime	0.108	4	0.14	4
C5	Infrastructures et équipements portuaires	0.192	1	0.15	3
C6	Qualité de la main d'œuvre	0.037	10	0.02	10
C7	Stabilité politique	0.050	8	0.08	6
C8	Degré de digitalisation et système d'exploitation	0.041	9	0.05	8
C9	Avantages économiques	0.103	6	0.06	7
C10	Facilité douanière et garanties juridiques	0.162	2	0.09	5

Tableau 3.20 : Comparaison des poids selon les deux méthode ANP/AHP

3.3.4.2 Analyse et interprétation

L'analyse croisée des résultats issus des deux méthodes (F-AHP et F-ANP) met en évidence une cohérence globale dans l'identification des critères clés, avec un recoupement significatif sur les critères stratégiques majeurs. Les deux approches convergent sur l'importance élevée du critère C5 (Infrastructures portuaires), classé premier en ANP et troisième en AHP, ainsi que de C3 (Lead time), classé premier en AHP et troisième en ANP.

On remarque également certaines variations dans la hiérarchisation, qui s'expliquent par la structure méthodologique propre à chaque approche.

L'approche AHP floue, fondée sur une hypothèse d'indépendance entre critères, permet une évaluation directe et intuitive, souvent influencée par l'importance perçue des critères pris isolément. En revanche, l'approche ANP floue intègre les relations de dépendance et de rétroaction identifiées via DEMATEL, permettant une modélisation plus fine et plus réaliste des interactions systémiques entre critères.

- **Le cas de C5 — Infrastructures portuaires**

Le critère C5 est classé premier dans l'ANP et troisième dans l'AHP. Cette position dominante dans l'ANP s'explique par son rôle causal central identifié dans le diagramme de DEMATEL : il influence directement plusieurs autres critères, notamment le lead time (C3), la fréquence des liaisons maritimes (C4), et la localisation relative (C2). Autrement dit, des infrastructures portuaires de qualité permettent d'améliorer indirectement d'autres dimensions de performance logistique. L'ANP capture cette influence transversale, ce que ne fait pas l'AHP, qui traite C5 comme une dimension isolée.

- **Le cas de C10 — Facilité douanière et garanties juridiques**

Ce critère est deuxième en ANP, mais seulement cinquième en AHP. Dans l'ANP, il ressort comme un critère structurant, car il affecte directement la rapidité des opérations (C3), les avantages économiques (C9), et la confiance logistique générale. Le traitement rapide des formalités et la prévisibilité juridique sont en effet des conditions nécessaires à l'efficacité d'un hub logistique international. L'AHP, en l'absence de structure causale, tend à sous-estimer cet effet systémique.

- **Le cas de C1 — Coût logistique**

En AHP, C1 est fortement valorisé (rang 2), car perçu comme un critère objectif, mesurable et souvent prioritaire dans les décisions opérationnelles. En ANP, son poids est réduit (rang 5), car il est considéré comme un critère dépendant, influencé par d'autres (comme C5, C10 et C3). Autrement dit, le coût est une conséquence, et non un levier direct, ce que l'ANP permet de modéliser.

- **Le cas de C3 — Lead time**

Le lead time est classé troisième dans l'ANP et premier dans l'AHP. Cette position en tête dans l'AHP est logique du point de vue d'une hiérarchie classique, mais l'ANP révèle que le lead time est fortement influencé par les infrastructures (C5) **et la** facilité douanière (C10). Il est donc un indicateur de performance résultant, non une variable stratégique indépendante.

- **Le cas de C4 — Densité de la ligne**

La densité des liaisons reste relativement stable dans les deux méthodes : rang 4 en ANP, rang 4 en AHP. Cette stabilité confirme qu'il s'agit d'un critère considéré comme objectivement prioritaire dans les deux approches. Toutefois, dans le modèle ANP, son poids est aussi amplifié par son lien avec C5 (infrastructures portuaires), qui conditionne en grande partie la fréquence des lignes. On peut donc affirmer que C4 est un critère opérationnel central, mais partiellement dépendant d'un facteur d'amont.

- **Critères secondaires — C6,C7,C8,C9,C2**

Concernant les critères liés au macro-environnement, comme la stabilité politique (C7) ou les avantages économiques (C9), on observe une pondération plus modérée dans l'ANP, ce qui s'explique par leur faible pouvoir de différenciation entre ports européens. Le modèle ANP identifie qu'en l'absence de disparités marquées entre les alternatives sur ces points, leur impact sur la décision est secondaire, sans être négligeable.

Le critère de localisation relative (C2) occupe une place modeste dans les classements, ceci s'explique par le fait que la localisation géographique seule ne garantit pas une performance logistique élevée.

Enfin, les critères C6 (qualité de la main-d'œuvre) et C8 (digitalisation) restent marginaux dans les deux approches, indiquant un consensus sur leurs faible influence stratégique dans ce contexte. Ce qui reflète probablement leurs rôles de facilitateur, mais non de critère déterminant à court terme.

3.3.4.3 Synthèse des résultats F-AHP/F-ANP

Les écarts observés entre les deux classements ne traduisent ni contradiction ni incohérence, mais au contraire la richesse des approches. L'approche ANP floue s'avère ainsi plus pertinente et plus robuste pour capter les logiques causales qui sous-tendent les critères de localisation portuaire. Elle ne se contente pas de hiérarchiser les critères selon leur poids apparent, mais tient compte de leur position dans le système logistique, en distinguant les facteurs moteurs des indicateurs résultants.

Cette capacité d'analyse systémique permet de prioriser les leviers stratégiques d'action (comme l'infrastructure portuaire, la douane, et les services logistiques) plutôt que leurs effets

secondaires (coût, délai, fréquence), ce qui donne au classement ANP une valeur ajoutée décisive dans la sélection du port optimal.

3.3.5 Évaluation finale des ports candidats par l'approche TOPSIS

La méthode Fuzzy-TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) a été mobilisée pour classer les différents ports présélectionnés en fonction de leur performance globale vis-à-vis des dix critères de sélection pondérés par les méthodes F-ANP et F-AHP.

L'approche F-TOPSIS présente l'intérêt de combiner une évaluation qualitative exprimée en termes linguistiques à une formalisation mathématique basée sur les nombres flous triangulaires, ce qui permet d'intégrer l'incertitude des jugements.

Par souci de validation croisée, les mêmes calculs ont également été effectués en utilisant les pondérations issues de la méthode AHP, afin de comparer les résultats avec ceux obtenus via l'ANP. Les étapes de mise en œuvre sont présentées ci-après :

Étape 01 : Construction de la matrice d'évaluation floue

Dans cette première étape, chaque port candidat est évalué par rapport à chacun des critères à l'aide de termes linguistiques tels que "faible", "élevé", ou "très élevé".

L'évaluation s'est appuyée sur une combinaison de données quantitatives vérifiées et d'appréciations qualitatives structurées, conformément à l'approche F-TOPSIS.

a. Critères qualitatifs

Pour les critères non directement mesurables tels que :

- **C5** : Infrastructures et équipements portuaires,
- **C6** : Qualité de la main-d'œuvre,
- **C7** : Stabilité politique,
- **C8** : Degré de digitalisation,
- **C9** : Avantages économiques,
- **C10** : Facilité douanière et garanties juridiques,

L'évaluation a été réalisée à partir d'une revue documentaire approfondie (rapports d'institutions, études comparatives, classements internationaux) ainsi que sur la base de l'expertise des collaborateurs de SLB, sollicités dans le cadre de ce travail pour valider les jugements qualitatifs attribués à chaque port.

Les appréciations ont ensuite été traduites en valeurs linguistiques floues, selon une échelle standardisée.

b. Critères quantitatifs

Pour les critères chiffrables, des données concrètes ont été recueillies comme suit :

- **C1 (Coût logistique)** : Basé uniquement sur les coûts de transport, les frais fixes (manutention, stockage, douane) étant supposés similaires entre ports. Les valeurs proviennent de devis réels fournis par THO Shipping, partenaire logistique spécialisé dans le maritime international.
- **C2 (Localisation relative)** : Mesurée via les distances entre ports candidats, hubs SLB (Houston, Rotterdam, Dubaï) et les destinations NAF (Alger, Tunis, Tripoli). Les calculs ont été réalisés sous Excel ; la matrice figure en annexe.
- **C3 (Lead time)** : Estimé selon les temps de transit maritime (hors dédouanement et attente), à partir des données CMA CGM, transporteur majoritaire de SLB.
- **C4 (Fréquence des lignes)** : Calculée à partir des départs hebdomadaires vers la NAF, selon les données publiques de CMA CGM.

L'ensemble des données brutes utilisées pour l'évaluation des critères quantitatifs (coût de transport, lead time, distance et fréquence) est présenté en annexe D. Ce matériau source permet de retracer la construction des évaluations floues pour chaque critère.

Le tableau suivant synthétise les jugements qualitatifs portés sur chaque port selon les dix critères retenus :

Port	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Marseille	Faible	Élevé	Faible	Élevé	Très élevé	Très élevé	Élevé	Élevé	Moyen	Très élevé
Barcelone	Moyen	Faible	Élevé	Élevé	Très élevé	Très élevé	Élevé	Très élevé	Élevé	Très élevé
Valence	Moyen	Moyen	Élevé	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé	Très élevé	Élevé	Très élevé
Gênes	Élevé	Très élevé	Moyen	Moyen	Élevé	Élevé	Moyen	Moyen	Moyen	Élevé
Naples	Très élevé	Élevé	Très élevé	Faible	Moyen	Moyen	Moyen	Faible	Moyen	Moyen
Malte	Très faible	Très faible	Très faible	Élevé	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé	Très élevé	Élevé
Piraeus	Très élevé	Élevé	Très élevé	Faible	Élevé	Moyen	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé

Tableau 3.21 : Évaluations linguistiques floues des ports selon les dix critères

Les évaluations floues sont par la suite saisies dans une matrice de décision, où chaque cellule représente un triplet flou correspondant à un port et un critère donné, selon l'échelle linguistique. Ce tableau regroupe l'ensemble des valeurs floues obtenues :

Port	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Marseille	(1,3,5)	(5,7,9)	(1,1,3)	(5,7,9)	(7,9,9)	(7,9,9)	(5,7,9)	(5,7,9)	(3,5,7)	(7,9,9)
Barcelone	(3,5,7)	(1,3,5)	(5,7,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)
Valence	(3,5,7)	(3,5,7)	(5,7,9)	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)
Gênes	(5,7,9)	(7,9,9)	(3,5,7)	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)	(3,5,7)	(3,5,7)	(3,5,7)	(5,7,9)
Naples	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(1,3,5)	(3,5,7)	(3,5,7)	(3,5,7)	(1,1,3)	(3,5,7)	(3,5,7)
Malte	(1,1,3)	(1,1,3)	(1,1,3)	(5,7,9)	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(5,7,9)
Piraeus	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(1,3,5)	(5,7,9)	(3,5,7)	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)	(5,7,9)

Tableau 3.22 : Matrice de décision floue TOPSIS - Triplets flous par critère et port

Étape 02 : Normalisation de la matrice floue

Une normalisation des valeurs floues est appliquée afin de rendre comparables les critères de type "coût" (à minimiser) et "bénéfice" (à maximiser). Cette étape permet de ramener toutes les évaluations à une échelle commune.

a. Critères Coût

Les critères de type « coût » (à minimiser), tels que C1, C2 et C3, sont traités selon une logique inverse à celle des critères de type bénéfice. En effet, une performance plus faible sur ces critères est préférable.

Pour chaque triplet flou (l,m,u), les valeurs idéales négatives sont déterminées. Ce tableau présente les extrêmes observés pour chaque critère à minimiser, servant de base à la normalisation :

Port	C1	C2	C3
Marseille	(1,3,5)	(5,7,9)	(1,1,3)
Barcelone	(3,5,7)	(1,3,5)	(5,7,9)
Valence	(3,5,7)	(3,5,7)	(5,7,9)
Genes	(5,7,9)	(7,9,9)	(3,5,7)
Naples	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)
Malte	(1,1,3)	(1,1,3)	(1,1,3)
Piraeus	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)
C_j^-	1	1	1

$$C_1^- = \min a_{i1} = \min\{1,3,3,5,7,1,7\}$$

Tableau 3.23 : Valeurs normalisées - Critères cout

Ensuite, chaque valeur est transformée selon la méthode de normalisation inverse propre aux critères de type coût. Le tableau suivant regroupe les valeurs normalisées :

Port	C1	C2	C3
Marseille	(0.2,0.33,1)	(0.11,0.14,0.2)	(0.33,1,1)
Barcelone	(0.14,.02,0.33)	(0.2,0.33,1)	(0.11,0.14,0.2)
Valence	(0.14,.02,0.33)	(0.14,.02,0.33)	(0.11,0.14,0.2)
Gênes	(0.11,0.14,0.2)	(0.11,0.11,0.14)	(0.14,.02,0.33)
Naples	(0.11,0.11,0.14)	(0.11,0.14,0.2)	(0.11,0.11,0.14)
Malte	(0.33,1,1)	(0.33,1,1)	(0.33,1,1)
Piraeus	(0.11,0.11,0.14)	(0.11,0.14,0.2)	(0.11,0.11,0.14)

$$\begin{aligned}\widetilde{r}_{13} &= \left(\frac{C_1^-}{C_{13}^-}, \frac{C_1^-}{b_{13}^-}, \frac{C_1^-}{a_{13}^-} \right) \\ &= \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1} \right) \\ &= (0.33 ; 1 ; 1)\end{aligned}$$

Tableau 3.24 : Valeurs normalisées – Critères coût

b. Critères bénéfice

Les critères dits « bénéfice » (à maximiser) incluent notamment le C4, C5, ou encore C10. Pour ces critères, une valeur plus élevée est considérée comme préférable.

Ce tableau présente les valeurs floues maximales utilisées pour normaliser les critères à maximiser :

Tableau 3.25 : Valeurs normalisées - Critères bénéfice

Port	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Marseille	(5,7,9)	(7,9,9)	(7,9,9)	(5,7,9)	(5,7,9)	(3,5,7)	(7,9,9)
Barcelone	(5,7,9)	(7,9,9)	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)
Valence	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)
Gênes	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)	(3,5,7)	(3,5,7)	(3,5,7)	(5,7,9)
Naples	(1,3,5)	(3,5,7)	(3,5,7)	(3,5,7)	(1,1,3)	(3,5,7)	(3,5,7)
Malte	(5,7,9)	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(5,7,9)
Piraeus	(1,3,5)	(5,7,9)	(3,5,7)	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)	(5,7,9)
C_j^+	9	9	9	9	9	9	9

$$C_j^+ = \max C_{ij} = \max\{9,9,7,7,5,9,5\}$$

La normalisation des critères bénéfice suit une méthode directe. Ce tableau montre les valeurs normalisées de chaque port selon les critères à maximiser.

Port	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Marseille	(0.56,0.78,1)	(0.78,1,1)	(0.78,1,1)	(0.56,0.78,1)	(0.56,0.78,1)	(0.33,0.56,0.78)	(0.78,1,1)
Barcelone	(0.56,0.78,1)	(0.78,1,1)	(0.78,1,1)	(0.56,0.78,1)	(0.78,1,1)	(0.56,0.78,1)	(0.78,1,1)
Valence	(0.33,0.56,0.78)	(0.56,0.78,1)	(0.56,0.78,1)	(0.56,0.78,1)	(0.78,1,1)	(0.56,0.78,1)	(0.78,1,1)
Gênes	(0.33,0.56,0.78)	(0.56,0.78,1)	(0.56,0.78,1)	(0.33,0.56,0.78)	(0.33,0.56,0.78)	(0.33,0.56,0.78)	(0.56,0.78,1)
Naples	(0.11,0.33,0.56)	(0.33,0.56,0.78)	(0.33,0.56,0.78)	(0.33,0.56,0.78)	(0.11,0.11,0.33)	(0.33,0.56,0.78)	(0.33,0.56,0.78)
Malte	(0.56,0.78,1)	(0.33,0.56,0.78)	(0.56,0.78,1)	(0.56,0.78,1)	(0.56,0.78,1)	(0.78,1,1)	(0.56,0.78,1)
Piraeus	(0.11,0.33,0.56)	(0.56,0.78,1)	(0.33,0.56,0.78)	(0.33,0.56,0.78)	(0.56,0.78,1)	(0.56,0.78,1)	(0.56,0.78,1)

Tableau 3.26 : Valeurs normalisées – Critère bénéfice

$$\tilde{r}_{71} = \left(\frac{a_{21}}{C_j^+}; \frac{b_{21}}{C_j^+}; \frac{c_{21}}{C_j^+} \right) = \left(\frac{1}{9}; \frac{3}{9}; \frac{5}{9} \right) = (0.11; 0.33; 0.56)$$

Étape 03 : Pondération de la matrice normalisée

La matrice normalisée est ensuite pondérée à l'aide des poids issus de la super matrice limite ANP. Chaque valeur normalisée est multipliée par le poids du critère correspondant.

En raison du grand nombre de critères et d'alternatives, la matrice pondérée a été divisée en deux sous-tableaux pour des raisons de lisibilité.

Cette première partie du tableau pondère les cinq premiers critères par leur poids respectifs :

Poids	(0.094,0.104,0.115)	(0.080,0.089,0.098)	(0.103,0.114,0.126)	(0.097,0.108,0.119)	(0.172,0.192,0.211)
Marseille	(0.2,0.03,0.11)	(0.01,0.01,0.02)	(0.03,0.11,0.13)	(0.05,0.08,0.12)	(0.13,0.19,0.21)
Barcelone	(0.01,0.02,0.04)	(0.02,0.03,0.10)	(0.01,0.02,0.03)	(0.05,0.08,0.12)	(0.13,0.19,0.21)
Valence	(0.01,0.02,0.04)	(0.01,0.02,0.03)	(0.01,0.02,0.03)	(0.03,0.06,0.09)	(0.10,0.15,0.21)
Gênes	(0.01,0.01,0.02)	(0.01,0.01,0.01)	(0.01,0.02,0.04)	(0.03,0.06,0.09)	(0.10,0.15,0.21)
Naples	(0.01,0.01,0.02)	(0.01,0.01,0.02)	(0.01,0.01,0.02)	(0.01,0.04,0.07)	(0.06,0.11,0.16)
Malte	(0.03,0.10,0.11)	(0.03,0.09,0.10)	(0.03,0.11,0.13)	(0.05,0.08,0.12)	(0.06,0.11,0.16)
Piraeus	(0.01,0.01,0.02)	(0.01,0.01,0.02)	(0.01,0.01,0.02)	(0.01,0.04,0.07)	(0.10,0.15,0.21)

Tableau 3.27 : Matrice de décision floue pondérée

La deuxième partie complète la matrice avec les cinq critères restants :

Poids	(0.034,0.037,0.041)	(0.045,0.05,0.055)	(0.037,0.041,0.045)	(0.092,0.103,0.113)	(0.146,0.162,0.178)
Marseille	(0.03,0.04,0.04)	(0.02,0.04,0.05)	(0.02,0.03,0.05)	(0.03,0.06,0.09)	(0.11,0.16,0.18)
Barcelone	(0.03,0.04,0.04)	(0.02,0.04,0.05)	(0.03,0.04,0.05)	(0.05,0.08,0.11)	(0.11,0.16,0.18)
Valence	(0.02,0.03,0.04)	(0.02,0.04,0.05)	(0.03,0.04,0.05)	(0.05,0.08,0.11)	(0.11,0.16,0.18)
Gênes	(0.02,0.03,0.04)	(0.01,0.03,0.04)	(0.01,0.02,0.04)	(0.03,0.06,0.09)	(0.08,0.13,0.18)
Naples	(0.01,0.02,0.03)	(0.01,0.03,0.04)	(0.00,0.00,0.02)	(0.03,0.06,0.09)	(0.05,0.09,0.14)
Malte	(0.02,0.03,0.04)	(0.02,0.04,0.05)	(0.02,0.03,0.05)	(0.07,0.10,0.11)	(0.08,0.13,0.18)
Piraeus	(0.01,0.02,0.03)	(0.01,0.03,0.04)	(0.02,0.03,0.05)	(0.05,0.08,0.11)	(0.08,0.13,0.18)

Tableau 3.28 : Matrice de décision floue pondérée

Étape 04 : Détermination des solutions idéales

Deux profils de référence sont définis :

- La solution idéale positive (A^+) : combinaison des meilleures valeurs floues sur chaque critère.
- La solution idéale négative (A^-) : combinaison des moins bonnes valeurs observées.

Ce tableau présente les valeurs floues représentant respectivement le meilleur et le pire profil de performance possible pour chaque critère :

$$A^* = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \tilde{v}_2^+)$$

$$= \max(v_{a_{i10}}, v_{b_{i10}}, v_{c_{i10}})$$

$$= (0.11 ; 0.16 ; 0.18)$$

	A^+	A^-
C1	(0.03 ; 0.10 ; 0.11)	(0.01 ; 0.01 ; 0.02)
C2	(0.03 ; 0.09 ; 0.10)	(0.01 ; 0.01 ; 0.01)
C3	(0.03 ; 0.11 ; 0.13)	(0.01 ; 0.01 ; 0.02)
C4	(0.41 ; 0.08 ; 0.12)	(0.01 ; 0.04 ; 0.07)
C5	(0.13 ; 0.19 ; 0.21)	(0.06 ; 0.11 ; 0.16)
C6	(0.03 ; 0.04 ; 0.04)	(0.01 ; 0.02 ; 0.03)
C7	(0.02 ; 0.04 ; 0.05)	(0.01 ; 0.03 ; 0.04)
C8	(0.03 ; 0.04 ; 0.05)	(0.00 ; 0.00 ; 0.02)
C9	(0.07 ; 0.10 ; 0.11)	(0.03 ; 0.06 ; 0.09)
C10	(0.11 ; 0.16 ; 0.18)	(0.05 ; 0.09 ; 0.14)

Tableau 3.29 : Solution idéales et anti-idéales

Étape 05 : Calcul des distances floues

À cette étape, les distances entre chaque port candidat et les deux profils de référence sont calculées. Ces distances permettent d'évaluer à quel point chaque port s'approche du meilleur scénario possible et s'éloigne du pire.

Ce tableau présente, pour chaque port, la distance agrégée à la solution idéale positive, correspondant au profil le plus performant possible sur l'ensemble des critères.

Marseille	Barcelone	Valence	Gênes	Naples	Malte	Piraeus
0,041	0,066	0,066	0,075	0,079	0,000	0,079
0,064	0,035	0,056	0,067	0,064	0,000	0,064
0,000	0,082	0,082	0,072	0,086	0,000	0,086
0,205	0,205	0,213	0,213	0,221	0,205	0,221
0,000	0,000	0,033	0,033	0,071	0,071	0,033
0,000	0,000	0,006	0,006	0,014	0,006	0,014
0,000	0,000	0,000	0,011	0,011	0,000	0,011
0,007	0,000	0,000	0,015	0,031	0,007	0,007
0,038	0,018	0,018	0,038	0,038	0,000	0,018
0,000	0,000	0,000	0,028	0,060	0,028	0,028
0,355	0,406	0,481	0,566	0,689	0,318	0,574

Tableau 3.30 : Distances floues à la solution idéale A^+

Tandis que le tableau ci-dessous indique, pour chaque port, la distance cumulée à la solution la moins favorable, représentant la combinaison des pires performances sur tous les critères.

Marseille	Barcelone	Valence	Gênes	Naples	Malte	Piraeus
0,059	0,023	0,023	0,013	0,009	0,084	0,006
0,004	0,050	0,012	0,000	0,004	0,067	0,004
0,086	0,005	0,005	0,015	0,000	0,086	0,000
0,048	0,048	0,027	0,027	0,000	0,048	0,000
0,071	0,071	0,043	0,043	0,000	0,000	0,043
0,014	0,014	0,008	0,008	0,000	0,008	0,000
0,011	0,011	0,011	0,000	0,000	0,011	0,000
0,025	0,031	0,031	0,016	0,000	0,025	0,025
0,000	0,023	0,023	0,000	0,000	0,038	0,023
0,060	0,060	0,060	0,036	0,000	0,036	0,036

Tableau 3.31 : Distances floues à la solution anti-idéale A^-

Les distances agrégées calculées entre chaque port et les deux solutions idéales sont regroupées ci-dessous :

Port	D^*	D^-
Marseille	0.355	0.379
Barcelone	0.406	0.336
Valence	0.481	0.240
Gênes	0.566	0.156
Naples	0.689	0.013
Malte	0.318	0.405
Piraeus	0.574	0.137

Tableau 3.32 : Distances floues aux solutions idéales et anti-idéales

Étape 06 : Calcul du coefficient de proximité CC_i

Ensuite, un coefficient de similarité est obtenu, représentant la proximité de chaque alternative à la solution idéale.

Les scores de similarité obtenus sont présentés dans le tableau 3.32 ci-dessous :

Port	D^*	D^-	CC_i	Rang
Marseille	0.355	0.379	0.516	2
Barcelone	0.406	0.336	0.453	3
Valence	0.481	0.240	0.333	4
Gênes	0.566	0.156	0.216	5
Naples	0.689	0.013	0.019	7
Malte	0.318	0.405	0.560	1
Piraeus	0.574	0.137	0.192	6

Tableau 3.33 : Score de similarité floue et classement final des ports

Interprétation des résultats

L'analyse TOPSIS révèle que Malte, Barcelone et Marseille figurent en tête du classement, avec des scores de similarité élevés, indiquant leur forte performance globale sur l'ensemble des critères évalués. Ces ports présentent un équilibre favorable entre connectivité maritime, qualité des infrastructures, et conditions macro-environnementales.

Les ports tels que Piraeus et Naples se positionnent en queue de classement. Bien que proches géographiquement du centre de gravité, ils souffrent de limitations en termes de digitalisation, de connectivité intermodale ou de complexité administrative, ce qui diminue leur attractivité logistique.

Enfin, Marseille, bien qu'imposé dans la configuration finale, reste très bien classé, grâce à ses performances, notamment sur les critères C5, C6 et C10.

Cette étape permet ainsi de confirmer les résultats des méthodes précédentes, tout en les enrichissant par une vision holistique fondée sur les performances globales.

3.4 Évaluation comparative des configurations logistiques : coûts, délais et performance globale

Cette section vise à évaluer de manière chiffrée et comparative les performances logistiques des différentes configurations identifiées lors des étapes précédentes du travail. Elle s'inscrit dans la continuité du chapitre 3, où plusieurs méthodes de résolution ont été mobilisées pour analyser la problématique de localisation optimale des hubs d'exportation vers la région Afrique du Nord.

À l'issue de la modélisation mathématique (approche p-médiane) et de l'analyse multicritère (DEMATEL, F-ANP, Fuzzy-TOPSIS), trois scénarios logistiques ont été retenus pour être confrontés dans le cadre d'une analyse technico-économique approfondie. Chaque scénario correspond à une structure de réseau différente, combinant des hubs d'expédition, des itinéraires, des modes de transport et des volumes spécifiques.

Scénario 01 : Centralisation via Marseille uniquement

Ce scénario suppose une centralisation totale des flux à travers Marseille, hub logistique historique de l'entreprise. Tous les produits transitent par ce point unique, quelle que soit leur destination finale (Algérie, Tunisie ou Libye).

Scénario 02 : Configuration hybride Marseille-Malte

Identifié comme optimal par la modélisation mathématique et validé par l'analyse multicritère, ce scénario repose sur une configuration à deux hubs :

- Marseille, imposé comme site existant,
- Malte, sélectionné pour sa position géographique centrale et sa connectivité maritime vers la Tunisie et la Libye.

Scénario 03 : Configuration actuelle – Situation de référence

Ce scénario reflète l'état logistique actuel tel qu'observé en 2024. Les expéditions à destination de l'Algérie sont consolidées au hub de Marseille. En revanche, aucune consolidation n'est organisée pour la Tunisie et la Libye.

3.4.1 Préparation et structuration des données logistiques

Avant de procéder aux simulations économiques et temporelles des scénarios logistiques, une phase de préparation et de structuration des données a été nécessaire.

Elle s'est articulée autour de quatre opérations successives : segmentation des produits, pondération des volumes, affectation modale, et ventilation par type d'unité de transport.

1. Segmentation des familles de produits : Deux grandes familles ont été distinguées

- Produits chimiques, soumis à des contraintes réglementaires strictes, exclusivement acheminés par voie maritime ;
- Maintenance & Service (M&S), comprenant les équipements et services opérationnels, transportés par voie maritime ou aérienne selon les pratiques observées.

2. Pondération des volumes expédiés : À partir des historiques de transport 2024, une base de données a été extraite, nettoyée et structurée. Ensuite, Les expéditions ont été classées par tranches de poids, avec usage de la valeur médiane comme référence, multipliée par le nombre d'expéditions, afin de refléter un volume pondéré réaliste.

3. Affectation des modes de transport : Les modes de transport ont été attribués à chaque type de produit selon les ratios modaux historiques, valide avec les experts de l'entreprise.

4. Répartition selon les unités de charge : les volumes ont été convertis en unités standards selon les cas : Conteneurs 20 pieds (Capacité maximale : 21 tonnes), palette (Capacité maximale 2300kg) ou fret aérien (évalué au kg selon les standards IATA).

Pour permettre une analyse claire et comparable, chaque scénario a été modélisé selon deux segments logistiques :

- Leg 1 : flux amont reliant les hubs d'origine aux points de consolidation.
- Leg 2 : flux aval reliant ces hubs aux pays de destination en Afrique du Nord.

Les figures présentées ci-dessous illustrent les flux logistiques propres à chaque scénario. Elles mettent en évidence les origines et destinations des marchandises, tout en intégrant l'analyse de la répartition modale (maritime, aérien, routier), fondée sur les données opérationnelles internes de SLB.

La première figure représente les flux logistiques associés au premier scénario :

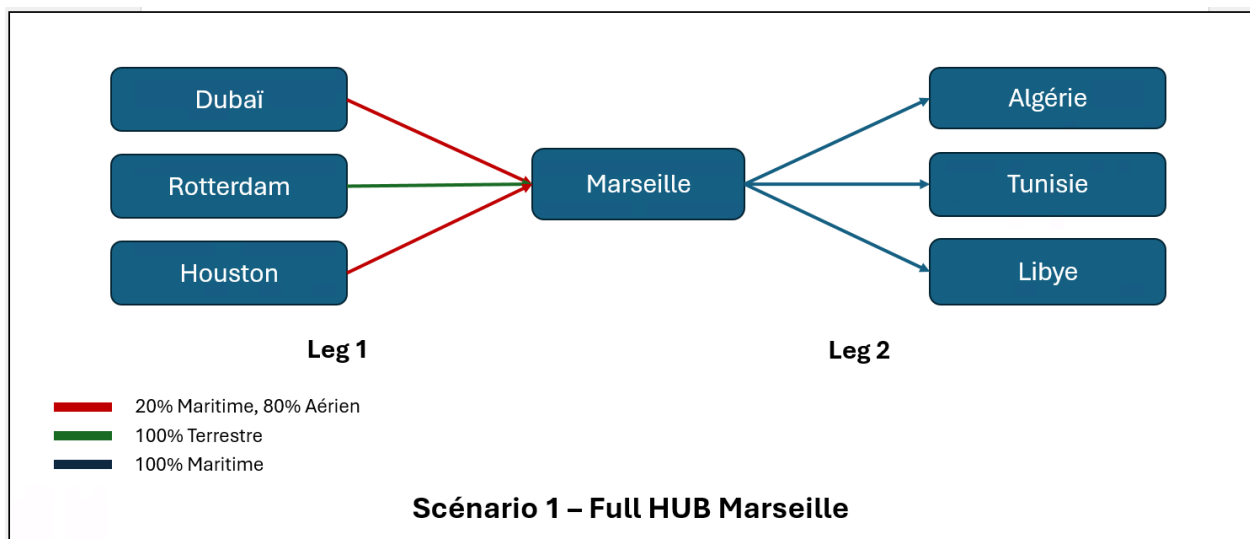


Figure 3.8 : Découpage logistique du scénario 1 - Centralisation via Marseille

La seconde quant à elle, représente les flux associés au deuxième scénario. Ici, les flux vers l'Algérie passent par Marseille, tandis que ceux vers la Tunisie et la Libye transitent par Malte.

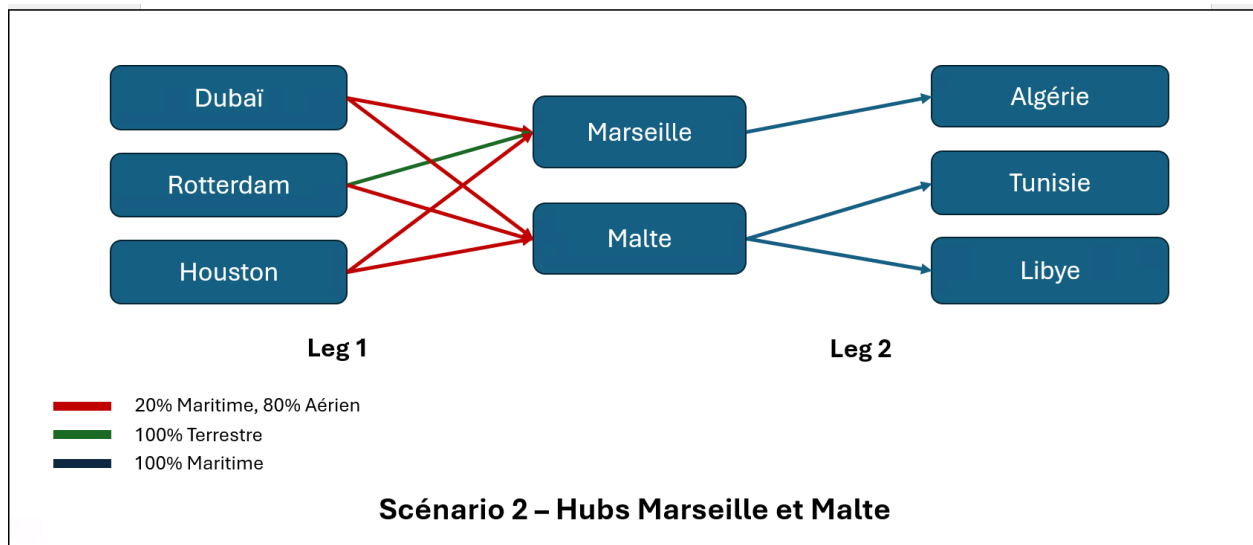


Figure 3.9 : Découpage logistique du scénario 2 - Configuration hybride Marseille–Malte

Pour la troisième et dernière illustration, elle reflète la configuration actuelle des flux logistiques, sans centralisation avec hub unique.

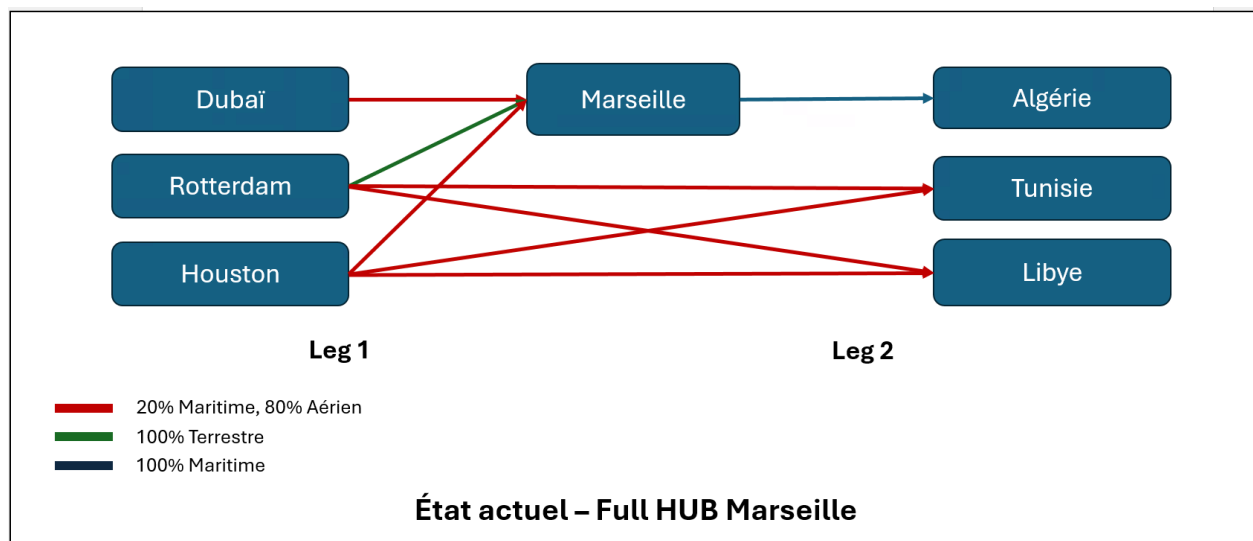


Figure 3.10 : Découpage logistique du scénario 3 - Situation actuelle sans consolidation

3.4.2 Estimation des coûts logistiques

L'estimation des coûts logistiques a été réalisée pour les trois scénarios définis en intégrant l'ensemble des flux amont et aval, ainsi que les opérations aux points de rupture logistique (consolidation, transbordement, manutention).

Les couts de transport couvrent :

- Leg 1 : acheminement depuis les hubs SLB (Houston, Rotterdam, Dubaï) vers Malte/Marseille.
- Leg 2 : distribution vers l’Afrique du Nord depuis les ports européens.

Les estimations s’appuient sur des devis réels fournis par THO Shipping et incluent :

- Les volumes pondérés selon la destination, le mode de transport et l’unité de chargement ;
- Les différences tarifaires par itinéraire et les effets de massification dans les scénarios centralisés.

Les coûts de transbordement (déchargement, consolidation, documentation, transit) ont également été intégrés selon les standards du secteur et les volumes manipulés.

3.4.3 Étude de cas : Analyse détaillée du scénario hybride Marseille–Malte

Cette section présente une évaluation complète des coûts logistiques associés au scénario 2, qui combine les hubs de Marseille et Malte pour desservir l’Afrique du Nord. Sélectionné comme configuration optimale à l’issue des analyses de localisation (modèle p-médiane) et de hiérarchisation multicritère (DEMATEL–ANP–TOPSIS). L’objectif est d’estimer les coûts totaux (Leg 1, Leg 2, manutention et documentation) pour les trois destinations : Algérie, Tunisie et Lybie.

Les calculs détaillés par pays sont présentés ci-après. Les résultats des deux autres scénarios sont disponibles en annexe E à titre de comparaison.

3.4.3.1 Volumes expédiés vers la région NAF et hypothèses de base

L’analyse porte ici sur les expéditions réalisées en 2024 à destination des trois pays de la région NAF : Algérie (Alger, Annaba), Tunisie (Tunis, Sfax) et Libye (Tripoli, Benghazi). Les données exploitées proviennent des historiques réels consolidés par SLB, et sont structurées selon la typologie de produits expédiés (produits chimiques, pièces M&S, etc.).

Les tableaux ci-dessous présentent une synthèse des volumes expédiés depuis Rotterdam vers les différents points d’entrée logistiques de la région NAF, fondée sur les flux effectivement observés au cours de l’année 2024.

Rotterdam	Libye			Tunisie			Algerie		
	Nombre d'expéditions	Médiane	Poids total	Nombre d'expéditions	Médiane	Poids total	Nombre d'expéditions	Médiane	Poids total
0-45kg									
Chemical	12	22,5	270	0	22,50	0,00	3	22,50	67,50
M&S	668	22,5	15030	125	22,50	2812,50	218	22,50	4905,00
45kg-70kg									
Chemical	2	57,5	115	0	57,50	0,00	0	57,50	0,00
M&S	71	57,5	4082,5	4	57,50	230,00	27	57,50	1552,50
70kg-100kg									
Chemical	4	85	340	0	85,00	0,00	0	85,00	0,00
M&S	44	85	3740	5	85,00	425,00	33	85,00	2805,00
100kg-200kg									
Chemical	3	150	450	0	150,00	0,00	1	150,00	150,00
M&S	76	150	11400	5	150,00	750,00	55	150,00	8250,00
200kg-300kg									
Chemical	6	250	1500	0	250,00	0,00	0	250,00	0,00
M&S	30	250	7500	4	250,00	1000,00	15	250,00	3750,00
>300kg									
Chemical	81	908,84	73615,92	46	908,84	41806,57	76	908,84	69071,72
M&S	66	908,84	59983,34	10	908,84	9088,38	31	908,84	28173,99

Tableau 3.34 : Synthèse des poids expédiés depuis Rotterdam vers la région NAF

Les volumes expédiés depuis Dubaï et Houston ont également été pris en compte dans le cadre de l'évaluation financière complète, et figurent en annexe pour consultation détaillée.

3.4.3.2 Itinéraires envisagés et coûts associés

Les flux à destination de la Libye et de la Tunisie sont regroupés à Malte, et ceux en direction de l'Algérie sont regroupés à Marseille, avec des acheminements en Leg 1 depuis Rotterdam, Dubaï et Houston, puis une expédition finale en Leg 2 vers les ports libyens, tunisiens et algériens.

Transport intercontinental - Leg 1

Les tableaux suivants présentent le détail des coûts estimés pour l'acheminement intercontinental (Leg 1) entre les hubs logistiques principaux (Rotterdam, Dubaï, Houston) et les centres de consolidation (Marseille ou Malte). Les données intègrent les volumes réels observés par famille de produits (Chimique, M&S), les modes de transport activés (maritime, aérien), le nombre d'unités (conteneurs ou palettes), ainsi que les coûts unitaires issus de devis fournis par le prestataire THO Shipping.

Malte					
Rotterdam	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	115,422		Maritime	6C	11188,3
M&S	69,071	34,535	Maritime	3C	5066,4
		34,535	Aérien	/	22000
Marseille					
Chimique	69,071		Terrestre	3C et 3P	8573
M&S	28,173			3C	6131,8
				Cout total (€)	52959,5

Tableau 3.35 : Détail des coûts Leg 1 – Rotterdam

Malte					
Houston	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palettes	Cout de transport
Chimique	126,46		Maritime	6C	13200
M&S	195,50	39,10	Maritime	2C	3960
		156,40	Aérien	/	500491,41
Marseille					
Chimique	32,30		Maritime	2C	3294,09
M&S	113,74	22,75	Maritime	1C et 1P	2475
		90,99	Aérien	/	272983,1122
				Cout total (€)	796403,61

Tableau 3.36 : Détail des coûts Leg 1 – Houston

Malte					
Dubai	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palettes	Cout de transport
Chimique	114,20		Maritime	6C	11560
M&S	154,86	30,97	Maritime	2C	3187,5
		123,88	Aérien	/	34687,64
Marseille					
Chimique	50,87361653		Maritime	3C	6712,8
M&S	73,0364705	14,61	Maritime	1C	1398,5
		58,43	Aérien	/	17600
				Cout total (€)	75146,44

Tableau 3.37 : Détail des coûts Leg 1 – Dubaï

Coûts de manutention et documentation

Les flux arrivant dans les hubs européens font l'objet d'opérations de reconditionnement logistique. Les tableaux suivants présentent les coûts différenciés pour chaque hub.

a) Coûts de documentation :

	Coût documentation (€)
Libye	1 758.25
Tunisie	545.5
Algerie	1 211

Tableau 3.38 : Coût de documentation – Scénario 02

b) Coûts de manutention :

Scénario 2	Nombre de C à charger	Nombre de C à décharger	Nombre de palettes à charger	Nombre de palettes à décharger	Cout total (€)
Marseille	18	18	4	6	31 048
Malte	20	39	-	3	42360
Coût total (€)					73408

Tableau 3.39 : Coûts de manutention – Scénario 02

Transport régional Leg 2

Cette section détaille les coûts du segment final (Leg 2), les données comprennent le poids total par type de marchandise, le mode de transport retenu (principalement maritime), le nombre d'unités de transport mobilisées et le coût associé par destination.

Marseille				
Algerie	Poids total	Mode de transport	Nombre de conteneur / palette	Cout de transport
Chimique	152,46	Maritime	7C et 3P	8316
M&S	236,22	Maritime	11C et 3P	12732
Coût total (€)				21048
Malte				
Tunisie	Poids total	Mode de transport	Nombre de conteneur / palette	Cout de transport
Chimique	62,99	Maritime	3C	1608
M&S	44,26	Maritime	2C et 1P	1194
Coût total (€)				2802
Malte				
Libye	Poids total	Mode de transport	Nombre de conteneur / palette	Cout de transport
Chimique	295,76	Maritime	14C et 1P	12212,84
M&S	422,14	Maritime	20C et 1P	17429
Coût total (€)				29641,84

Tableau 3.40 : Détail des coûts Leg 2 – Scénario 02

3.4.3.3 Bilan des coûts logistiques

À l'issue de l'estimation complète des coûts logistiques pour le scénario hybride à deux hubs (Marseille pour l'Algérie, Malte pour la Tunisie et la Libye), l'ensemble des flux depuis les centres logistiques internationaux (Dubai, Houston, Rotterdam) jusqu'aux destinations finales a été modélisé et valorisé.

Le tableau ci-dessous présente une analyse comparative consolidée des trois scénarios logistiques étudiés, en termes de coût global. Cette synthèse permet non seulement d'identifier le scénario le plus efficient, mais également de mesurer, pour chaque alternative, le gain économique réalisé par rapport aux configurations actuelles et à un modèle centralisé.

	Cout total (€)	Gain (€)	Gain en %	Gain Scénario choisi (€)
État actuel	1525256	/	/	473846
Scénario 1	1064686	460570	30.196	
Scénario 2	1051409	473846	31.067	

Tableau 3.41 : Comparaison des coûts logistiques totaux par scénario

3.4.3.4 Résultats et discussions

Après analyse approfondie des différentes configurations logistiques pour la desserte de la région NAF, il ressort que le scénario à deux hubs de transbordement avec l'Algérie desservie via Marseille, et la Tunisie et la Libye via le hub de Malte constitue la solution la plus performante en termes de coûts logistiques totaux.

Cette configuration permet d'optimiser la consolidation des flux, de réduire les coûts de transport et de manutention, tout en préservant la flexibilité opérationnelle. Par rapport à la situation actuelle, elle génère un gain global de 31,07 %, ce qui confirme sa pertinence économique.

En comparaison avec le scénario 1, dans lequel un seul hub est utilisé, le gain reste réel mais relativement modeste. Ainsi, bien que le scénario à deux hubs reste légèrement plus avantageux financièrement, il devient nécessaire de compléter l'analyse par une évaluation comparative des délais (lead times), afin d'arbitrer de manière plus fine entre ces deux options et d'intégrer pleinement la dimension temporelle dans la décision finale.

3.4.3.5 Évaluation comparative des délais d'acheminement logistique

Dans le cadre de cette analyse, la comparaison des délais logistiques ne porte pas sur l'ensemble du processus end-to-end, mais se concentre exclusivement sur la phase allant de l'envoi des commandes depuis les hubs principaux jusqu'à leur réception dans les bases opérationnelles en Afrique du Nord.

Trois segments spécifiques ont été pris en compte :

- Le temps de transit international, entre les hubs logistiques (Marseille et/ou Malte) et les centres de distribution locaux des pays desservis ;
- Les éventuels temps de connexion au niveau des Hubs (Temps de cross docking) ;
- Le délai de livraison locale, entre les centres de distribution et les bases opérationnelles dans chaque pays.

Pour chacun de ces scénarios, un tableau récapitulatif des délais d'acheminement a été établi, en distinguant les temps de transit internationaux des délais de distribution locale.

- Les délais de livraison locale ont été estimés en collaboration avec les responsables import/export de l'entreprise, sur la base de leur retour d'expérience et de leur connaissance des conditions terrain.

- Les temps de transit internationaux ont été extraits des données officielles publiées par le transporteur CMA-CGM.

Les tableaux ci-dessous présentent une synthèse structurée des délais logistiques totaux estimés pour chacun des trois scénarios envisagés.

Le tableau 3.42, donne les résultats à l'issue de l'étude pour le scénario 2 :

	Hub-> CC	Cross dock time	CC	Destination	Transit time	Local delivery time	TLT
Dubai	42	6	Marseille	Algerie	6	12	66
	34	5	Malte	Tunisie	1	10	50
				Libye	2	14	55
Houston	38	6	Marseille	Algerie	6	12	62
	32	5	Malte	Tunisie	1	10	48
				Libye	2	14	53
Rotterdam	1	6	Marseille	Algerie	6	12	25
	12	5	Malte	Tunisie	1	10	28
				Libye	2	14	33

Tableau 3.42 : Délais d'acheminement estimés pour le scénario 2 – Configuration hybride Marseille–Malte

Le tableau 3.43, donne les résultats à l'issue de l'étude pour le scénario 1 :

	Hub-> CC	Cross dock time	CC	Destination	Transit time	Local delivery time	TLT
Dubai	33	6	Marseille	Algerie	3	12	54
				Tunisie	2	10	51
				Libye	4	14	57
Houston	30	6	Marseille	Algerie	3	12	51
				Tunisie	2	10	48
				Libye	4	14	54
Rotterdam	1	6	Marseille	Algerie	3	12	22
				Tunisie	2	10	19
				Libye	4	14	25

Tableau 3.43 : Délais d'acheminement estimés pour le scénario 1 – Centralisation via Marseille

Le tableau 3.44, donne les résultats à l'issue de l'étude pour le scénario de référence :

Hub	Hub-> CC	CC	Cross Dock	Destination	LT	LTD	TLT
Dubai	33	Marseille	6	Algerie	3	12	48
				Tunisie	32	45	77
				Libye	31	45	76
Houston	30	Marseille	6	Algerie	3	12	51
				Tunisie	34	45	79
				Libye	36	45	81
Rotterdam	1	Marseille	6	Algerie	3	12	22
				Tunisie	17	45	62
				Libye	18	45	63

Tableau 3.34 : Délais d'acheminement dans la configuration logistique actuelle (situation de référence)

Comparaison globale des performances logistiques selon les scénarios

Afin de comparer de manière globale les trois configurations logistiques, un tableau récapitulatif a été élaboré. Il permet de visualiser, pour chaque scénario, les temps totaux de lead time vers chacun des pays de la région NAF, et d'évaluer les gains potentiels en termes de délais pour chaque destination.

Houston	Etat actuel	Scénario 01	Gain 01	Scénario 02	Gain 02	Gain relatif (1-2)
Algerie	62	62	/	62	/	/
Tunisie	87	55	32	48	39	7
Libye	90	67	23	53	37	14

Tableau 3.45 : Comparaison des délais d'acheminement selon les scénarios – Expéditions depuis Houston

Dubai	Etat actuel	Scénario 01	Gain 01	Scénario 02	Gain 02	Gain relatif (1-2)
Algerie	66	66	/	66	/	/
Tunisie	84	59	25	50	34	9
Libye	83	71	12	55	28	16

Tableau 3.46 : Comparaison des délais d'acheminement selon les scénarios – Expéditions depuis Dubaï

Rotterdam	Etat actuel	Scénario 01	Gain 01	Scénario 02	Gain 02	Gain relatif (1-2)
Algerie	25	25	/	25	/	/
Tunisie	62	18	44	28	34	-10
Libye	63	30	33	33	30	-3

Tableau 3.47 : Comparaison des délais d'acheminement selon les scénarios – Expéditions depuis Rotterdam

Une représentation graphique a été également réalisée afin de visualiser plus clairement les différences observées entre les scénarios en termes de délais de livraison.

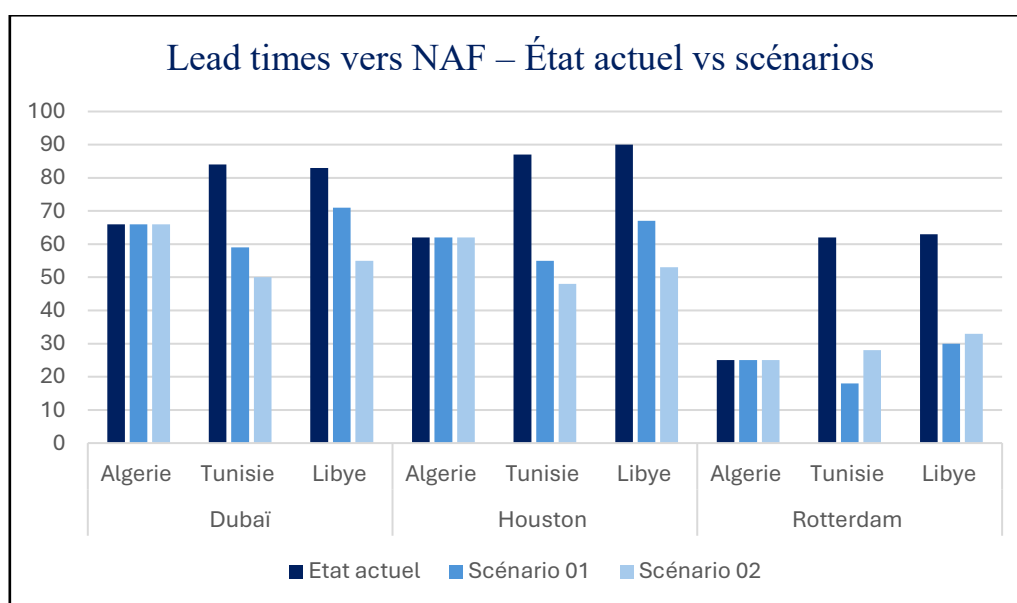


Figure 3.11 : Comparaison des Lead times des scénarios

Résultats et interprétations stratégiques

L'analyse des performances logistiques met en évidence la supériorité du scénario 2, fondé sur une double consolidation via Marseille (Algérie) et Malte (Tunisie, Libye). Ce scénario permet une réduction notable des délais, en particulier sur les flux les plus longs.

Depuis Dubaï, les délais d'expédition, souvent supérieurs à 80 jours dans le scénario actuel, chutent à 50–60 jours. Un gain similaire est observé depuis Houston, où les envois vers la Tunisie et la Libye passent de plus de 90 jours à environ 55–60 jours. Depuis Rotterdam, le scénario 1 offre des délais légèrement meilleurs vers la Tunisie, mais sans impact décisif sur la performance globale.

En moyenne, le scénario 2 permet une réduction des temps de transit de 30 à 40 %, tout en assurant une meilleure homogénéité entre flux. Cette configuration optimise la répartition de la charge entre deux hubs, limite les congestions et réduit la variabilité des délais, un facteur clé pour renforcer la fiabilité de la chaîne d'approvisionnement.

Par ailleurs, l'usage combiné de deux hubs bien positionnés géographiquement améliore la visibilité, facilite la planification logistique et accroît la résilience face aux aléas régionaux (douanes, port, instabilité politique). Ainsi, malgré quelques écarts ponctuels en faveur du scénario 1, la solution mixte s'impose comme la plus équilibrée, robuste et durable à l'échelle régionale.

3.4.3.6 Recommandation et synthèse des résultats

L'analyse comparative confirme la supériorité du scénario 2, qui concilie performance logistique, maîtrise des coûts et adaptation au contexte régional NAF. Il se distingue par des délais réduits, une meilleure régularité des flux, et des coûts optimisés grâce à une gestion plus rationnelle des itinéraires, des modes de transport et des opérations de consolidation.

Une mise en œuvre progressive est recommandée, débutant par un projet pilote ciblé, accompagné d'un suivi rigoureux des indicateurs clés (coût, délai, taux de service) pour valider les performances avant généralisation à l'ensemble de la zone.

Conclusion

Ce chapitre marque le passage de l'analyse conceptuelle à une mise en œuvre opérationnelle des méthodes de localisation et d'aide à la décision dans un contexte logistique concret. En articulant des approches complémentaires : d'abord un modèle continu (centre de gravité) pour orienter les premières hypothèses, puis un modèle discret (p-médiane) pour affiner la sélection, et enfin des méthodes multicritères hybrides (DEMATEL, ANP, AHP, Fuzzy-TOPSIS) pour intégrer des dimensions qualitatives complexes, la démarche a permis de construire une solution cohérente, rigoureusement justifiée et adaptée aux spécificités du réseau SLB.

Ce croisement méthodologique renforce la robustesse de la recommandation finale en tenant compte à la fois des données quantitatives, des interdépendances entre critères et des arbitrages stratégiques à opérer. Ainsi, cette approche intégrée constitue une base solide pour éclairer les décisions de localisation dans un environnement logistique en mutation.

Conclusion Générale

Le présent mémoire s'inscrit dans une volonté claire de renforcer durablement la performance logistique de SLB dans la région Afrique du Nord, en proposant une démarche rigoureuse, méthodique et contextualisée d'aide à la décision pour la localisation d'un hub régional. Ce projet répond à un enjeu stratégique majeur pour le groupe : repenser et optimiser ses flux logistiques internationaux dans une région soumise à des pressions géopolitiques, économiques et opérationnelles complexes, tout en alignant la chaîne d'approvisionnement sur les objectifs globaux de compétitivité, de résilience et de durabilité du groupe.

La démarche adoptée a été construite sur une base itérative et systémique, intégrant successivement des analyses quantitatives, qualitatives et multicritères, afin de garantir une vision holistique du problème. Elle a débuté par un diagnostic opérationnel fin du réseau logistique existant, basé sur la cartographie des flux intercontinentaux (depuis Houston, Dubaï et Rotterdam), l'étude des infrastructures portuaires et douanières dans la région nord-africaine, et l'identification de goulots d'étranglement potentiels sur les corridors logistiques stratégiques. Cette phase d'analyse a permis de révéler les fragilités du modèle en place – en particulier les délais de transit allongés, la dépendance excessive à certains hubs lointains, et le manque d'agilité face aux perturbations politiques ou climatiques.

Face à ces constats, une problématique opérationnelle et stratégique s'est imposée : comment repenser le schéma logistique afin de gagner en réactivité, en efficacité et en maîtrise des coûts ?

Pour y répondre, une série d'outils d'aide à la décision a été mobilisée. Les modèles classiques de localisation (centre de gravité, p-médiane) ont fourni un socle analytique robuste pour la sélection préliminaire de sites candidats. Ces approches ont ensuite été enrichies par une combinaison de méthodes multicritères avancées – notamment DEMATEL pour cartographier les influences croisées entre critères, ANP pour gérer les dépendances, AHP pour pondérer les priorités stratégiques, et Fuzzy-TOPSIS pour intégrer l'incertitude dans l'évaluation des alternatives.

Ces méthodes ont permis d'intégrer des dimensions essentielles à la décision : performance logistique (lead time, fiabilité, fréquence d'expédition), accessibilité portuaire (profondeur, connectivité maritime, capacité de traitement), coûts totaux (transport, manutention, formalités douanières), stabilité géopolitique, proximité des marchés, et perspectives de développement d'infrastructures. Trois scénarios de localisation ont été simulés et comparés, chacun intégrant des hypothèses opérationnelles distinctes sur les volumes, les fréquences d'expédition, et les évolutions géopolitiques prévisibles. La construction de ces scénarios s'est appuyée sur une logique d'intelligence économique logistique, visant à croiser données de terrain, prévisions sectorielles, et objectifs stratégiques du groupe.

D'un point de vue méthodologique, cette approche s'inscrit dans les meilleures pratiques du network design stratégique, telles que recommandées dans la littérature professionnelle (Simchi-Levi et al., 2014) et dans les grands groupes internationaux en transformation. Elle a permis de dépasser une simple logique de minimisation des coûts pour intégrer les leviers modernes de compétitivité logistique : résilience face aux ruptures (Sheffi, 2005), agilité des schémas de distribution (Christopher & Holweg, 2017), et adaptation proactive aux pressions environnementales et réglementaires.

Au-delà de l'approche technique, ce projet a constitué une expérience professionnalisante majeure. Il nous a permis de développer des compétences transversales, en combinant des savoir-faire analytiques pointus (modélisation mathématique, gestion des incertitudes), des capacités stratégiques (analyse des parties prenantes, scénarisation prospective), et des compétences en communication décisionnelle, notamment à travers la production de livrables synthétiques et visuellement impactants destinés à des comités de pilotage exécutifs. Nous avons également pu interagir avec des experts métiers (logisticiens, douaniers, analystes géopolitiques, partenaires externes) et inscrire notre réflexion dans une dynamique d'amélioration continue, en cohérence avec la démarche Lean et les objectifs ESG du groupe.

En conclusion, cette étude ouvre des perspectives d'amélioration concrètes pour SLB, tant en matière de réduction des délais et des coûts logistiques, qu'en termes de renforcement de la résilience du réseau face aux perturbations, ou encore d'harmonisation avec les standards internationaux en vigueur. Elle constitue ainsi un socle solide pour envisager la mise en œuvre progressive d'un nouveau schéma de distribution régionale, davantage orienté vers l'agilité opérationnelle, la durabilité environnementale et la cohérence stratégique avec les ambitions du groupe.

À plus long terme, la réflexion amorcée dans ce mémoire pourrait être élargie à d'autres zones géographiques jugées stratégiques pour SLB. À ce titre, certaines infrastructures émergentes, telles que le port de Djendjen actuellement en phase de modernisation en Algérie, pourraient jouer un rôle clé en renforçant l'efficacité et la connectivité du maillage logistique régional. Par ailleurs, l'intégration progressive de leviers structurants, comme la décarbonation des modes de transport (McKinnon, 2018) ou la digitalisation de bout en bout de la chaîne logistique (Christopher & Holweg, 2017), contribuerait à accroître la résilience et la pertinence du modèle proposé, tout en répondant aux exigences croissantes de durabilité et d'agilité.

Ainsi, la solution développée dans le cadre de ce mémoire ne constitue pas une finalité en soi, mais bien une base évolutive sur laquelle bâtir une logistique plus intelligente, réactive et responsable, en adéquation avec les priorités globales de SLB (Melacini et al., 2018).

Bibliographie

- [1] **ham, T. Y., Ma, H. M., & Yeo, G. T. (2017).** Application of Fuzzy Delphi TOPSIS to Locate Logistics Centers in Vietnam: The Logisticians' Perspective. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 33(4), 211–219. (Critere de selection ch03)
- [2] **Lee, K.-L., Huang, W.-C., & Teng, J.-Y. (2007).** Locating the competitive relation of global logistics hub using quantitative SWOT analytical method. *Quality & Quantity*, 41(6), 911–927. (Critere de selection ch03)
- [3] **Notteboom, T., & Rodrigue, J.-P. (2005).** Port regionalization: Towards a new phase in port development. *Maritime Policy & Management*, 32(3), 297–313.
- [4] **Kadoić Nikola, Begičević Redep Nina, Divjak Blaženka.** Decision-making with the analytic network process. Faculty of Organisation and Informatics, Pavlinska 2, Varaždin, Croatia.
- [5] **Büyüközkan Gülçin, Güleriyüz Sezin.** Integrated DEMATEL-ANP model for renewable energy resources selection in Turkey. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, 182: 435–448, 2016.
- [6] **Kuo Ming-Shin.** Solving the problem of determining the optimal location of the logistics center taking into account cost minimization by using a new hybrid method. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, 38: 7208–7221, 2011.
- [7] **Thakkar Jitesh J.** Multi-Criteria Decision Making. *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 336. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2021. ISBN 978-981-33-4744-1.
- [8] **Vieira Carolina Luisa dos Santos, Luna Mônica Maria Mendes.** Models and Methods for Logistics Hub Location: A Review Towards Transportation Networks Design. *Pesquisa Operacional, Brazilian Operations Research Society*, 36(2): 375–406, 2016.
- [9] **Melo M.T., Nickel S., Saldanha-da-Gama F.** Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, 196(2): 401–412, 2009.
- [10] **Lin Ru-Jen.** Using fuzzy DEMATEL to evaluate the green supply chain management practices. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, 40: 32–39, 2013.
- [11] **Clynch, J. R.** 2006. *Earth Coordinates*.
- [12] **Daskin, M. S., Snyder, L. V, Berger, R. T.** 2005. Facility Location in Supply Chain Design. In *Logistics Systems: Design and Optimization*. Springer US. 387 p.
- [13] **Murphy, P., Wood, D.** 2008. *Contemporary Logistics*. 9th edition. Pearson education. 415 p.
- [14] **Mwemezi, J. J., Huang, Y.** 2011. Optimal Facility Location on Spherical Surfaces: Algorithm and Application. *New York Science Journal*. Vol. 4, Iss. 7, pp. 21-28.

- [15] **Büyüközkan, G., & Güleriyüz, S.** (2016). An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey. *International Journal of Production Economics*, 182, 435-448.
- [16] **Gölcük, İ., & Baykasoğlu, A.** (2016). An analysis of DEMATEL approaches for criteria interaction handling within ANP. *Expert Systems with Applications*, 46, 346-366.
- [17] **Hsu, C. W., Kuo, T. C., Chen, S. H., & Hu, A. H.** (2013). Using DEMATEL to develop a carbon management model of supplier selection in green supply chain management. *Journal of cleaner production*, 56, 164-172.
- [18] **Hsieh, P. L., & Yeh, T. M.** (2015). Developing a cause-and-effect model of factors influencing fast food restaurants' service quality using DEMATEL. *International Journal of Services and Operations Management*, 20(1), 21-42.
- [19] **Huang, Z., Ahmed, C., & Mickael, G.** (2020). A model for supporting the ideas screening during front end of the innovation process based on combination of methods of EcaTRIZ, AHP, and SWOT. *Concurrent Engineering*, 28(2), 89-96.
- [20] **Hussey, L. K.** (2014). Analytic Network Process (ANP) for Housing Quality Evaluation: A Case Study in Ghana. (Mémoire de maîtrise, The University of Western Ontario). Repéré à <https://ir.lib.uwo.ca/etd/2407>
- [21] **Saaty, T. L.** (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- [22] **Yang, Y. P. O., Shieh, H. M., & Tzeng, G. H.** (2013). A VIKOR technique based on DEMATEL and ANP for information security risk control assessment. *Information sciences*, 232, 482-500.
- [23] **Yang, J. L., & Tzeng, G. H.** (2011). An integrated MCDM technique combined with DEMATEL for a novel cluster-weighted with ANP method. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1417-1424.
- [24] **Pessanha, D. S. D. S., & Prochnik, V.** (2006). Practitioners' opinions on academics' critics on the balanced scorecard. Available at SSRN 1094308.
- [25] **Meier, O., & Barabel, M.** (2006). *Manageor: les meilleures pratiques du management*.
- [26] **Hu, S.J.** 2005. *Integrated Transportation Engineering*: Tsinghua University Press Ltd.
- [27] **Falatoonitoosi, E., Ahmed, S., & Sorooshian, S.** (2014). Expanded DEMATEL for determining cause and effect group in bidirectional relations. *The Scientific World Journal*, 2014, 103846. <https://doi.org/10.1155/2014/103846>
- [28] **Onnela Nona.** Determining the Optimal Distribution Center Location. Tampere University of Technology, Master of Science Thesis, 2015.

- [29] **Huang Zhe.** Support à la sélection précoce des concepts de produits via la proposition d'un processus décisionnel complexe à critères multiples. Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, 2023.
- [30] **N'dogotar Nélío.** Localisation Optimale de Hubs et Taille Optimale d'une Flotte en Vue d'une Mise en Place d'une Compagnie Aérienne en Zone UEMOA. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, École Doctorale de Mathématiques et Informatique, 2016.
- [40] **Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2008).** Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- [41] **Chopra, S., & Meindl, P. (2008).** Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation.
- [42] **Ballou, R. H. (2004).** Business Logistics: Supply Chain Management (5th ed.). Pearson Education.
- [43] **Van der Vorst, J. G. A. J. (2006).** Supply Chain Management: Theory and Practice.
- [44] **Christopher, M. (2016).** Logistics & Supply Chain Management (5th ed.). Pearson.
- [45] **Slack, N. (1999).** Operations Management (2nd ed.). Pitman Publishing.
- [46] **Hammachi Kamelia.** "COURS D'AIDE MULTICRITÈRE À LA DÉCISION". In: 2021
- [47] **Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP).** (2013). Glossary of Terms. Available at: <https://cscmp.org>
- [48] **Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001).** Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>
- [49] http://www.sage.unsw.edu.au/snap/gps/clynch_pdfs/coorddef.pdf.
- [50] **Iannone, F. (2012).** "A model for the estimation of the transport energy demand of a logistics terminal." *Energy Policy*, 43, 47–58.
- [51] **Roso, V., Woxenius, J., & Lumsden, K. (2009).** "The dry port concept: Connecting container seaports with the hinterland." *Journal of Transport Geography*, 17(5), 338–345.
- [52] **Yap, W. Y., Lam, J. S. L., & Notteboom, T. (2016).** "Developments in port competition in transshipment hubs: the case of PSA and PTP in Malaysia." *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 8(1), 1–28.
- [53] **Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2011).** *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. CRC Press.

- [54] Awasthi, A., Chauhan, S. S., & Goyal, S. K. (2011). "A fuzzy multicriteria approach for evaluating environmental performance of suppliers." *International Journal of Production Economics*, 126(2), 370–378.
- [55] Kannan, D., Khodaverdi, R., & Olfat, L. (2015). "A green supplier selection model based on fuzzy TOPSIS approach." *Computers & Industrial Engineering*, 66(1), 233–242.
- [56] Waters, D. (2019). *Global Logistics and Supply Chain Management* (3rd ed.). Wiley.
- [57] Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2017). *The Handbook of Logistics and Distribution Management* (6th ed.). Kogan Page.
- [58] Bowersox, D. J., Closs, D. J., Cooper, M. B., & Bowersox, J. C. (2012). *Supply Chain Logistics Management* (4th ed.). McGraw-Hill.
- [59] Frazelle, E. H. (2002). *Supply Chain Strategy: The Logistics of Supply Chain Management*. McGraw-Hill.
- [60] Gattorna, J. (2015). *Dynamic Supply Chains: How to Design, Build and Manage People-centric Value Networks* (3rd ed.). FT Press.
- [61] Langley, C. J., Coyle, J. J., Novack, R. A., Gibson, B., & Bardi, E. J. (2008). *Managing Supply Chains: A Logistics Approach* (8th ed.). Cengage Learning.
- [62] Sheffi, Y. (2005). *The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage*. MIT Press.
- [63] Gereffi, G. (2018). *Global Value Chains and Development: Redefining the Contours of 21st Century Capitalism*. Cambridge University Press.
- [64] Long, D. (2003). *International Logistics: Global Supply Chain Management*. Springer.
- [65] Betti, Q., Khoury, R., Hallé, S., & Montreuil, B. (2019). *Improving Hyperconnected Logistics with Blockchains and Smart Contracts*. arXiv.
- [66] **Reliable, Secure and Resilient Logistics Networks (2020)**. Springer.
- [67] Mohamed-Chérif, F. Z. & Ducruet, C. (2012). *From the Global to the Local: New Port Terminal Managers in Algeria*. *Revue Espace Politique*, (16). Cet article analyse notamment l'intervention de grands opérateurs internationaux (Portek et DP World) dans les ports algériens, dont Djendjen, dans le cadre du passage à un modèle de gestion portuaire en PPP
- [68] Christopher, M., & Holweg, M. (2017). Supply Chain 2.0 revisited: a framework for managing volatility-induced risk in the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 47(1), 2–17.
- [69] McKinnon, A. (2018). *Decarbonizing Logistics: Distributing Goods in a Low Carbon World*. Kogan Page.

[70] Melacini, M., Perotti, S., Rasini, M., & Tappia, E. (2018). E-fulfilment and distribution in omni-channel retailing: a systematic literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(4), 391–414.

Annexe

Annexe A : DEMATEL

Annexe A.1. Méthode CFCS – Critères

C2										
xls	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00
xrs	0,23	0,00	0,23	0,23	0,77	0,23	0,23	0,23	0,42	0,23

C3										
xls	0,23	0,77	0,00	0,77	0,58	0,23	0,58	0,23	0,23	0,77
xrs	0,42	1,00	0,00	1,00	0,77	0,42	0,77	0,42	0,42	1,00

C4										
xls	0,00	0,23	0,23	0,00	0,77	0,00	0,58	0,23	0,23	0,58
xrs	0,23	0,42	0,42	0,00	1,00	0,23	0,77	0,42	0,42	0,77

C5										
xls	0,23	0,58	0,58	0,58	0,00	0,00	0,58	0,23	0,23	0,58
xrs	0,42	0,77	0,77	0,77	0,00	0,23	0,77	0,42	0,42	0,77

C6										
xls	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,58	0,58	0,23	0,23
xrs	0,23	0,23	0,23	0,23	0,42	0,00	0,77	0,77	0,42	0,42

C7										
xls	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,58	0,58	0,23	0,23
xrs	0,23	0,23	0,23	0,23	0,42	0,00	0,77	0,77	0,42	0,42

C8										
xls	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,58	0,00	0,23	0,23
xrs	0,23	0,23	0,23	0,23	0,42	0,23	0,77	0,00	0,42	0,42

C9										
xls	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,77	0,23	0,00	0,77
xrs	0,23	0,23	0,23	0,23	0,42	0,23	1,00	0,42	0,00	1,00

C10										
xls	0,23	0,00	0,00	0,00	0,58	0,00	0,77	0,58	0,77	0,00
xrs	0,42	0,23	0,23	0,23	0,77	0,23	1,00	0,77	1,00	0,00

Annexe A.2. Méthode CFCS – Cluster

	CL1	CL2	CL3
CL1	(0,0,0)	(0,0,6,1)	(0,25,0,63,1)
CL2	(0,5,0,7,1)	(0,0,0)	(0,25,0,63,1)
CL3	(0,5,0,7,1)	(0,0,6,1)	(0,0,0)

CL1		CL2		CL3	
xls	xrs	xls	xrs	xls	xrs
0.00	0.00	0.38	0.71	0.45	0.73
0.58	0.77	0.00	0.00	0.45	0.73
0.58	0.77	0.38	0.71	0	0

CL1	CL2	CL3
0	0,55595238	0,61038961
0,70391545	0	0,61038961
0,70391545	0,55595238	0

CL1	CL2	CL3
0	0,27797619	0,48831169
0,70391545	0	0,48831169
0,70391545	0,27797619	0

Annexe B : Analytical Network Process – ANP

Annexe B.1. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison des clusters

Objectif	Performance logistique	Macro-environnement	Port & capacités
Performance logistique	1,00	5,00	3,00
Macro-environnement	0,20	1,00	0,33
Port & capacités	0,33	3,00	1,00
Somme colonne	1,53	9,00	4,33

Objectif	Performance logistique	Macro-environnement	Port & capacités	weighted sum value	Poids	Lambda
Performance logistique	0,63	0,53	0,78	1,95	0,63	3,0719734
Macro-environnement	0,13	0,11	0,09	0,32	0,11	3,01120187
Port & capacités	0,21	0,32	0,26	0,79	0,26	3,03296877

CI	0,04
CR	0,06

Annexe B.2. Calculs des vecteurs de priorité des clusters

Objectif	Performance logistique	Macro-environnement	Port & capacités
Performance logistique	(1,1,1)	(4,5,6)	(2,3,4)
Macro-environnement	(0.17,0.2,0.25)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)
Port & capacités	(0.25,0.33,0.5)	(2,3,4)	(1,1,1)

	Geometric Mean		
Performance logistique	2	2,466212074	2,884499141
Macro-environnement	0,346680637	0,405480133	0,5
Port & capacités	0,793700526	1	1,25992105
Total	3,140381163	3,871692207	4,644420191
Inverse	0,318432683	0,258284994	0,215312129
Increasing order	0,215312129	0,258284994	0,318432683

Fuzzy weight				Mi	Normalized
Performance logistique	0,43	0,64	0,92	0,66	0,63
Macro-environnement	0,07	0,10	0,16	0,11	0,11
Port & capacités	0,17	0,26	0,40	0,28	0,26
Total				1,05	1,00

Annexe B.3. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison des critères Macro-environnement

Macro-environnement	C7	C9	C10
C7	1,00	3,00	0,25
C9	0,33	1,00	0,20
C10	4,00	5,00	1,00

Macro-environnement	C7	C9	C10	Weighted sum value	Poids	Lambda
C7	0,26	0,32	0,21	0,79	0,26	3,03
C9	0,09	0,11	0,13	0,32	0,11	3,01
C10	0,78	0,53	0,63	1,95	0,63	3,07

CI	0,04
CR	0,06

Annexe B.4. Calculs des vecteurs de priorité des critères Macro-environnement

Macro-environnement	C7	C9	C10
C7	(1,1,1)	(2,3,4)	(0,2,0,25,0,33)
C9	(0,25,0,33,0,5)	(1,1,1)	(0,17,0,2,0,25)
C10	(3,4,5)	(4,5,6)	(1,1,1)

Geometric Mean			
C7	0,7368063	0,9085603	1,10064242
C9	0,34668064	0,40548013	0,5
C10	2,28942849	2,71441762	3,10723251
Total	3,37291542	4,02845805	4,70787492
Inverse	0,29647942	0,24823394	0,21241006
Increasing order	0,21241006	0,24823394	0,29647942

Fuzzy weight				Mi	Normalized
C7	0,16	0,23	0,23	0,21	0,23
C9	0,07	0,10	0,11	0,09	0,10
C10	0,49	0,67	0,66	0,61	0,67
Total				0,91	1,00

Annexe B.5. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison des critères Port & capacités

Port & capacités	C5	C6	C8
C5	1,00	5,00	3,00
C6	0,20	1,00	0,33
C8	0,33	3,00	1,00

Port & capacités	C5	C6	C8	Weighted sum value	Poids	Lambda
C5	0,63	0,53	0,78	1,95	0,63	3,0719734
C6	0,13	0,11	0,09	0,32	0,11	3,01120187
C8	0,21	0,32	0,26	0,79	0,26	3,03296877

CI	0,04
CR	0,06

Annexe B.6. Calculs des vecteurs de priorité des critères Port & capacités

Port & capacités	C5	C6	C8
C5	(1,1,1)	(4,5,6)	(2,3,4)
C6	(0.17,0.2,0.25)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)
C8	(0.25,0.33,0.5)	(2,3,4)	(1,1,1)

	Geometric Mean		
C5	2	2,46621207	2,88449914
C6	0,34668064	0,40548013	0,5
C8	0,79370053	1	1,25992105
Total	3,14038116	3,87169221	4,64442019
Inverse	0,31843268	0,25828499	0,21531213
Increasing order	0,21531213	0,25828499	0,31843268

Fuzzy weight				Mi	Normalized
C5	0,43	0,64	0,92	0,66	0,63
C6	0,07	0,10	0,16	0,11	0,11
C8	0,17	0,26	0,40	0,28	0,26
Total				1,05	1,00

Annexe B.7. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison des critères Performance logistique

Performance logistique	C1	C2	C3	C4	Weighted sum	Poids	Lambda
C1	0,17	0,19	0,21	0,10	0,67	0,17	4,04
C2	0,08	0,09	0,11	0,10	0,39	0,09	4,11
C3	0,33	0,38	0,42	0,63	1,77	0,42	4,16
C4	0,50	0,28	0,21	0,31	1,31	0,31	4,17

CI	0,06
CR	0,06

Annexe B.6. Calculs des vecteurs de priorité des critères Performance logistique

Port & capacités	C5	C6	C8
C5	(1,1,1)	(4,5,6)	(2,3,4)
C6	(0.17,0.2,0.25)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)
C8	(0.25,0.33,0.5)	(2,3,4)	(1,1,1)

	Geometric Mean		
C5	2	2,46621207	2,88449914
C6	0,34668064	0,40548013	0,5
C8	0,79370053	1	1,25992105
Total	3,14038116	3,87169221	4,64442019
Inverse	0,31843268	0,25828499	0,21531213
Increasing order	0,21531213	0,25828499	0,31843268

Fuzzy weight				Mi	Normalized
C5	0,43	0,64	0,92	0,66	0,63
C6	0,07	0,10	0,16	0,11	0,11
C8	0,17	0,26	0,40	0,28	0,26
Total				1,05	1,00

Annexe B.7. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison par rapport au critère de contrôle C7

C7	C1	C3	C4	C5	C6	C8	C9	C10
C1	1,00	4,00	4,00	2,00	0,50	0,50	0,33	0,20
C3	0,25	1,00	2,00	0,50	0,25	0,33	0,17	0,14
C4	0,25	0,50	1,00	0,33	0,33	0,50	0,17	0,17
C5	0,50	2,00	3,00	1,00	0,50	0,50	0,33	0,25
C6	2,00	4,00	3,00	2,00	1,00	0,50	1,00	0,50
C8	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00	0,50
C9	3,00	6,00	6,00	3,00	1,00	1,00	1,00	0,50
C10	5,00	7,00	6,00	4,00	2,00	2,00	2,00	1,00

C7	C1	C3	C4	C5	C6	C8	C9	C10	Weighted Sum Value	Poids	Lambda
C1	0,10	0,16	0,15	0,14	0,07	0,08	0,06	0,06	0,81	0,10	8,46
C3	0,02	0,04	0,07	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,33	0,04	8,24
C4	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04	0,08	0,03	0,05	0,30	0,04	8,15
C5	0,05	0,08	0,11	0,07	0,07	0,08	0,06	0,07	0,58	0,07	8,29
C6	0,19	0,16	0,11	0,14	0,13	0,08	0,18	0,15	1,14	0,13	8,56
C8	0,19	0,12	0,07	0,14	0,27	0,15	0,18	0,15	1,27	0,15	8,45
C9	0,29	0,24	0,22	0,21	0,13	0,15	0,18	0,15	1,57	0,18	8,57
C10	0,48	0,28	0,22	0,28	0,27	0,30	0,37	0,29	2,48	0,29	8,56

CI	0,08
CR	0,06

Annexe B.8. Calculs des vecteurs de priorité des critères selon le critère de contrôle C7

C7	C1	C3	C4	C5	C6	C8	C9	C10
C1	(1,1,1)	(3,4,5)	(3,4,5)	(1,2,3)	(0,33,0,5,1)	(0,33,0,5,1)	(0,25,0,33,0,5)	(0,17,0,2,0,25)
C3	(0,2,0,25,0,33)	(1,1,1)	(1,2,3)	(0,33,0,5,1)	(0,2,0,25,0,33)	(0,25,0,33,0,5)	(0,14,0,17,0,2)	(0,13,0,14,0,17)
C4	(0,2,0,25,0,33)	(0,33,0,5,1)	(1,1,1)	(0,25,0,33,0,5)	(0,25,0,33,0,5)	(0,33,0,5,1)	(0,14,0,17,0,2)	(0,14,0,17,0,2)
C5	(0,33,0,5,1)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,1,1)	(0,33,0,5,1)	(0,33,0,5,1)	(0,25,0,33,0,5)	(0,2,0,25,0,33)
C6	(1,2,3)	(3,4,5)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,1,1)	(0,33,0,5,1)	(1,1,1)	(0,33,0,5,1)
C8	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(0,33,0,5,1)
C9	(2,3,4)	(5,6,7)	(5,6,7)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(0,33,0,5,1)
C10	(4,5,6)	(6,7,8)	(5,6,7)	(3,4,5)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,1,1)

	Geometric Mean		
C1	0,672	0,924	1,323
C3	0,296	0,386	0,439
C4	0,270	0,343	0,490
C5	0,542	0,744	1,130
C6	0,951	1,364	1,914
C8	0,951	1,488	2,060
C9	1,550	1,889	2,300
C10	2,087	3,009	3,820
Total	7,319	10,148	13,477
Inverse	0,137	0,099	0,074
Increasing order	0,074	0,099	0,137

Fuzzy weight				Mi	Normalized
C1	0,05	0,09	0,18	0,11	0,10
C3	0,02	0,04	0,06	0,04	0,04
C4	0,02	0,03	0,07	0,04	0,04
C5	0,04	0,07	0,15	0,09	0,08
C6	0,07	0,13	0,26	0,16	0,14
C8	0,07	0,15	0,28	0,17	0,15
C9	0,12	0,19	0,31	0,21	0,18
C10	0,15	0,30	0,52	0,32	0,29
Total				1,13	1,00

Annexe B.9. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison par rapport au critère de contrôle C10

C10	C1	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	1,00	0,33	0,20	0,17	0,25	0,14	0,17	0,20	0,14
C3	3,00	1,00	1,00	0,33	0,50	0,20	0,50	0,33	0,20
C4	5,00	1,00	1,00	0,33	0,50	0,20	0,33	0,33	0,17
C5	6,00	3,00	3,00	1,00	3,00	0,25	0,50	0,33	0,25
C6	4,00	2,00	2,00	0,33	1,00	0,25	0,50	0,50	0,20
C7	7,00	5,00	5,00	4,00	4,00	1,00	2,00	3,00	0,33
C8	6,00	2,00	3,00	2,00	2,00	0,33	1,00	3,00	0,50
C9	5,00	3,00	3,00	3,00	2,00	0,33	0,33	1,00	0,50
C10	7,00	5,00	6,00	4,00	5,00	3,00	2,00	2,00	1,00

C10	C1	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Weighted Sum Value	Poids	Lambda
C1	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,19	0,02	9,464284
C3	0,06	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,07	0,04	0,05	0,42	0,04	9,369730
C4	0,10	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05	0,42	0,05	9,26712
C5	0,12	0,13	0,14	0,09	0,19	0,05	0,07	0,04	0,07	0,90	0,09	9,569322
C6	0,08	0,09	0,09	0,03	0,06	0,05	0,07	0,06	0,05	0,59	0,06	9,427550
C7	0,14	0,22	0,23	0,38	0,25	0,21	0,27	0,34	0,09	2,13	0,21	10,07900
C8	0,12	0,09	0,14	0,19	0,12	0,07	0,14	0,34	0,14	1,34	0,14	9,921341
C9	0,10	0,13	0,14	0,28	0,12	0,07	0,05	0,11	0,14	1,14	0,11	9,995929
C10	0,14	0,22	0,27	0,38	0,31	0,63	0,27	0,23	0,27	2,73	0,27	9,992104

Annexe B.10. Calculs des vecteurs de priorité des critères selon le critère de contrôle C1

C10	C1	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)	(0.17,0.2,0.25)	(0.14,0.17,0.2)	(0.2,0.25,0.33)	(0.13,0.14,0.17)	(0.14,0.17,0.2)	(0.17,0.2,0.25)	(0.13,0.14,0.17)
C3	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)	(0.33,0.5,1)	(0.17,0.2,0.25)	(0.33,0.5,1)	(0.25,0.33,0.5)	(0.17,0.2,0.25)
C4	(4,5,6)	(1,1,1)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)	(0.33,0.5,1)	(0.17,0.2,0.25)	(0.25,0.33,0.5)	(0.25,0.33,0.5)	(0.14,0.17,0.2)
C5	(5,6,7)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,1,1)	(2,3,4)	(0.2,0.25,0.33)	(0.33,0.5,1)	(0.25,0.33,0.5)	(0.2,0.25,0.33)
C6	(3,4,5)	(1,2,3)	(1,2,3)	(0.25,0.33,0.5)	(1,1,1)	(0.2,0.25,0.33)	(0.33,0.5,1)	(0.33,0.5,1)	(0.17,0.2,0.25)
C7	(6,7,8)	(4,5,6)	(4,5,6)	(3,4,5)	(3,4,5)	(1,1,1)	(1,2,3)	(2,3,4)	(0.25,0.33,0.5)
C8	(5,6,7)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(0.25,0.33,0.5)	(1,1,1)	(2,3,4)	(0.33,0.5,1)
C9	(4,5,6)	(2,3,4)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)	(0.25,0.33,0.5)	(0.25,0.33,0.5)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)
C10	(6,7,8)	(4,5,6)	(5,6,7)	(3,4,5)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,1,1)

	Geometric Mean		
C1	0,197	0,231	0,283
C3	0,404	0,531	0,735
C4	0,429	0,526	0,694
C5	0,799	1,060	1,429
C6	0,520	0,740	1,107
C7	1,963	2,609	3,274
C8	1,093	1,682	2,436
C9	0,956	1,351	1,876
C10	2,423	3,330	4,147
Total	8,784	12,061	15,982
Inverse	0,114	0,083	0,063
Increasing order	0,063	0,083	0,114

	Fuzzy weight			Mi	Normalized
C1	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03
C3	0,03	0,04	0,08	0,05	0,06
C4	0,03	0,04	0,08	0,05	0,06
C5	0,05	0,09	0,16	0,10	0,12
C6	0,03	0,06	0,13	0,07	0,09
C7	0,12	0,22	0,37	0,24	0,29
C8	0,07	0,14	0,28	0,16	0,20
C9	0,06	0,11	0,21	0,13	0,16
C10	0,15	0,28	0,47	0,30	0,36
Total				0,82	1,00

Annexe B.11. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison par rapport au critère de contrôle C8

C8	C3	C4	C5	C7	C8	C9	C10
C3	1,00	0,50	0,33	3,00	2,00	0,33	0,50
C4	2,00	1,00	0,33	3,00	2,00	0,33	0,50
C5	3,00	3,00	1,00	5,00	3,00	2,00	2,00
C7	0,33	0,33	0,20	1,00	0,50	0,20	0,33
C8	0,50	0,50	0,33	2,00	1,00	0,50	0,50
C9	3,00	0,50	0,50	5,00	2,00	1,00	1,00
C10	2,00	2,00	0,50	2,00	2,00	1,00	1,00

C8	C3	C4	C5	C7	C8	C9	C10	Weighted sum value	Poids	Lambda
C3	0,10	0,06	0,10	0,14	0,16	0,06	0,09	0,70	0,10	7,00278089
C4	0,20	0,12	0,10	0,14	0,16	0,06	0,09	0,86	0,12	7,10868306
C5	0,30	0,36	0,31	0,23	0,24	0,35	0,34	2,13	0,31	6,96445927
C7	0,03	0,04	0,06	0,05	0,04	0,04	0,06	0,31	0,05	6,94034295
C8	0,05	0,06	0,10	0,09	0,08	0,09	0,09	0,56	0,08	6,90674128
C9	0,30	0,06	0,15	0,23	0,16	0,18	0,17	1,25	0,18	7,10448008
C10	0,20	0,24	0,15	0,09	0,16	0,18	0,17	1,19	0,17	7,00663789

CI	0,01811384
CR	0,01372261

Annexe B.12. Calculs des vecteurs de priorité des critères selon le critère de contrôle C8

C8	C1	C3	C4	C5	C6	C9	C10
C1	(1,1,1)	(1,2,3)	(0,33,0,5,1)	(0,2,0,25,0,33)	(0,17,0,2,0,25)	(0,25,0,33,0,5)	(0,2,0,25,0,33)
C3	(0,33,0,5,1)	(1,1,1)	(0,25,0,33,0,5)	(0,2,0,25,0,33)	(0,17,0,2,0,25)	(0,25,0,33,0,5)	(0,17,0,2,0,25)
C4	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,1,1)	(0,33,0,5,1)	(0,25,0,33,0,5)	(0,33,0,5,1)	(0,33,0,5,1)
C5	(3,4,5)	(3,4,5)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,1,1)
C6	(4,5,6)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,1,1)
C9	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)	(0,33,0,5,1)	(0,33,0,5,1)	(1,1,1)	(0,33,0,5,1)
C10	(3,4,5)	(4,5,6)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,1,1)

Geometric Mean			
C1	0,343	0,457	0,521
C3	0,274	0,343	0,472
C4	0,553	0,743	1,069
C5	1,369	1,811	2,168
C6	1,641	2,046	2,380
C8	0,761	1,123	1,739
C9	1,795	2,188	2,511
Total	6,735	8,711	10,860
Inverse	0,148	0,115	0,092
Increasing order	0,092	0,115	0,148

Fuzzy weight				Mi	Normalized
C1	0,03	0,05	0,08	0,05	0,05
C3	0,03	0,04	0,07	0,04	0,04
C4	0,05	0,09	0,16	0,10	0,09
C5	0,13	0,21	0,32	0,22	0,20
C6	0,15	0,23	0,35	0,25	0,23
C9	0,07	0,13	0,26	0,15	0,14
C10	0,17	0,25	0,37	0,26	0,24
Total				1,08	1,00

Annexe B.13. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison par rapport au critère de contrôle C3

C3	C1	C2	C4
C1	1,00	0,50	0,20
C2	2,00	1,00	0,33
C4	5,00	3,00	1,00

C3	C1	C2	C4	Weighted sum value	Poids	Lambda
C1	0,12	0,11	0,13	0,37	0,12	3,00131796
C3	0,24	0,23	0,22	0,69	0,23	3,00262697
C4	0,61	0,69	0,65	1,95	0,65	3,00714508

Annexe B.14. Calculs des vecteurs de priorité des critères selon le critère de contrôle C3

C3	C1	C2	C4
C1	(1,1,1)	(0,33,0,5,1)	(0,17,0,2,0,25)
C2	(1,2,3)	(1,1,1)	(0,25,0,33,0,5)
C4	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)

	Geometric Mean		
C1	0,382	0,464	0,630
C2	0,630	0,874	1,145
C4	2,000	2,466	2,884
Total	3,012	3,804	4,659
Inverse	0,332	0,263	0,215
Increasing order	0,215	0,263	0,332

Fuzzy weight				Mi	Normalized
C1	0,08	0,12	0,21	0,14	0,13
C2	0,14	0,23	0,38	0,25	0,23
C4	0,43	0,65	0,96	0,68	0,64
Total				1,06	1,00

Annexe B.15. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison par rapport au critère de contrôle C3

C4	C1	C5
C1	1,00	0,20
C5	5,00	1,00

C4	C1	C5	Weighted sum value	Poids	Lambda
C1	0,17	0,17	0,33	0,17	2
C5	0,83	0,83	1,67	0,83	2

CI	4,44089E-16
CR	4,44089E-15

Annexe B.16. Calculs des vecteurs de priorité des critères selon le critère de contrôle C4

C4	C1	C5
C1	(1,1,1)	(0,17,0,2,0,25)
C5	(4,5,6)	(1,1,1)

	Geometric Mean		
C1	0,408	0,447	0,500
C5	2,000	2,236	2,449
Total	2,408	2,683	2,949
Inverse	0,415	0,373	0,339
Increasing order	0,339	0,373	0,415

Fuzzy weight				Mi	Normalized
C1	0,14	0,17	0,21	0,17	0,17
C5	0,68	0,83	1,02	0,84	0,83
Total				1,01	1,00

Annexe B.17. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison par rapport au critère de contrôle C5

C5	C1	C2	C3	C4	C9	C10
C1	1,00	0,33	5,00	5,00	0,50	2,00
C2	3,00	1,00	4,00	6,00	2,00	4,00
C3	0,20	0,25	1,00	0,50	0,25	0,33
C4	0,20	0,17	2,00	1,00	0,25	0,33
C9	2,00	0,50	4,00	4,00	1,00	3,00
C10	0,50	0,25	3,00	3,00	0,33	1,00

C5	C1	C2	C3	C4	C9	C10	weighted sum value	Poids	Lambda
C1	0,18	0,12	0,25	0,28	0,12	0,22	1,17	0,18	6,39201733
C2	0,55	0,36	0,20	0,34	0,47	0,44	2,36	0,36	6,47528294
C3	0,04	0,09	0,05	0,03	0,06	0,04	0,30	0,05	6,10050689
C4	0,04	0,06	0,10	0,06	0,06	0,04	0,35	0,06	6,13027854
C9	0,37	0,18	0,20	0,23	0,24	0,33	1,54	0,24	6,50972272
C10	0,09	0,09	0,15	0,17	0,08	0,11	0,69	0,11	6,31743788

CI	0,10194454
CR	0,08221334

Annexe B.18. Calculs des vecteurs de priorité des critères selon le critère de contrôle C5

C5	C1	C2	C3	C4	C9	C10
C1	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)	(4,5,6)	(4,5,6)	(0.33,0.5,1)	(1,2,3)
C2	(2,3,4)	(1,1,1)	(3,4,5)	(5,6,7)	(1,2,3)	(3,4,5)
C3	(0.17,0.2,0.25)	(0.2,0.25,0.33)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)	(0.2,0.25,0.33)	(0.25,0.33,0.5)
C4	(0.17,0.2,0.25)	(0.14,0.17,0.2)	(1,2,3)	(1,1,1)	(0.2,0.25,0.33)	(0.25,0.33,0.5)
C9	(1,2,3)	(0.33,0.5,1)	(3,4,5)	(3,4,5)	(1,1,1)	(2,3,4)
C10	(0.33,0.5,1)	(0.2,0.25,0.33)	(2,3,4)	(2,3,4)	(0.25,0.33,0.5)	(1,1,1)

	Geometric Mean		
C1	1,049	1,424	1,944
C2	2,117	2,884	3,448
C3	0,287	0,357	0,490
C4	0,326	0,421	0,541
C9	1,348	1,906	2,587
C10	0,661	0,849	1,178
Total	5,787	7,842	10,188
Inverse	0,173	0,128	0,098
Increasing order	0,098	0,128	0,173

Fuzzy weight				Mi	Normalized
C1	0,10	0,18	0,34	0,21	0,19
C2	0,21	0,37	0,60	0,39	0,35
C3	0,03	0,05	0,08	0,05	0,05
C4	0,03	0,05	0,09	0,06	0,05
C9	0,13	0,24	0,45	0,27	0,25
C10	0,06	0,11	0,20	0,13	0,11
Total				1,11	1,00

Annexe B.19. Vérification de la cohérence de la matrice de comparaison par rapport au critère de contrôle C9

C9	C1	C3	C4	C5	C10
C1	1,00	3,00	2,00	0,50	0,50
C3	0,33	1,00	0,33	0,25	0,20
C4	0,50	3,00	1,00	0,33	0,33
C5	2,00	4,00	3,00	1,00	1,00
C10	2,00	5,00	3,00	1,00	1,00

C9	C1	C3	C4	C5	C10	Weighted sum value	Poids	Lambda
C1	0,18	0,18	0,24	0,16	0,16	0,92	0,18	5,1138749
C3	0,06	0,06	0,04	0,08	0,07	0,30	0,06	5,0273151
C4	0,09	0,18	0,12	0,10	0,11	0,60	0,12	5,05039616
C5	0,36	0,24	0,36	0,31	0,33	1,60	0,31	5,10370426
C10	0,36	0,30	0,36	0,31	0,33	1,66	0,33	5,09351943

Annexe B.20. Calculs des vecteurs de priorité des critères selon le critère de contrôle C9

C9	C1	C3	C4	C5	C10
C1	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,2,3)	(0,33,0,5,1)	(0,33,0,5,1)
C3	(0,25,0,33,0,5)	(1,1,1)	(0,25,0,33,0,5)	(0,2,0,25,0,33)	(0,17,0,2,0,25)
C4	(0,33,0,5,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(0,25,0,33,0,5)	(0,25,0,33,0,5)
C5	(1,2,3)	(3,4,5)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)
C10	(1,2,3)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)

Geometric Mean			
C1	0,740	1,084	1,644
C3	0,302	0,354	0,461
C5	0,530	0,699	1,000
C9	1,431	1,888	2,268
C10	1,516	1,974	2,268
Total	4,518	6,000	7,641
Inverse	0,221	0,167	0,131
Increasing order	0,131	0,167	0,221

Fuzzy weight				Mi	Normalized
C1	0,10	0,18	0,36	0,21	0,28
C3	0,04	0,06	0,10	0,07	0,09
C4	0,07	0,12	0,22	0,14	0,18
C5	0,19	0,31	0,50	0,33	0,45
C10	0,20	0,33	0,50	0,34	0,46
Total				0,75	1,00

Annexe C : Analytical Hierarchy Process – AHP

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Wighted sum value	Criteria weights	Lambda
C1	0,17	0,10	0,11	0,07	0,29	0,16	0,23	0,34	0,17	0,27	1,91	0,17	11,24
C2	0,06	0,03	0,05	0,03	0,05	0,07	0,03	0,02	0,02	0,03	0,38	0,03	11,12
C3	0,34	0,14	0,21	0,28	0,44	0,16	0,23	0,15	0,17	0,27	2,39	0,21	11,23
C4	0,34	0,17	0,11	0,14	0,07	0,16	0,16	0,10	0,11	0,18	1,53	0,14	10,82
C5	0,09	0,10	0,07	0,28	0,15	0,11	0,23	0,25	0,17	0,18	1,63	0,15	11,18
C6	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,23	0,02	10,44
C7	0,06	0,10	0,07	0,07	0,05	0,09	0,08	0,15	0,17	0,03	0,86	0,08	11,05
C8	0,02	0,10	0,07	0,07	0,03	0,07	0,03	0,05	0,06	0,05	0,54	0,05	10,99
C9	0,06	0,10	0,07	0,07	0,05	0,04	0,03	0,05	0,06	0,05	0,57	0,06	10,30
C10	0,06	0,10	0,07	0,07	0,07	0,07	0,23	0,10	0,11	0,09	0,97	0,09	10,62

CI	0,14
CR	0,09

Annexe D : TOPSIS

Annexe D.1. Matrice des distances

	Marseille (FR)	Barcelone (ES)	Valence (ES)	Genes (IT)	Naples (IT)	Malte	Piraeus (GR)
Rotterdam	1 190	1 184	1 435	1 267	1 600	1 800	2 000
Houston	8 595	8 464	8 369	8 782	8 900	9 000	9 200
Dubai	4 918	5 164	5 374	4 671	4 800	4 900	5 100
Singapour	10 594	10 880	11 134	10 500	10 700	10 800	11 000

	Algérie		Tunisie		Libye	
	Alger	Annaba	Tunis	Sfax	Tripoli	BenGhazi
Marseille	841	959	1204	1500	1800	2100
Barcelone	585	733	1000	1300	1600	1900
Valence	584	961	1100	1400	1700	2000
Gênes	986	975	1300	1600	1900	2200
Naples	1090	739	1200	1500	1800	2100
Malte	1485	602	700	1000	1300	1600
Piraeus	1886	1476	1100	1400	700	2000

Port candidat	Distance totale
Marseille (FR)	22 208
Barcelone (ES)	19 036
Valence (ES)	20 590
Genes (IT)	23 622
Naples (IT)	22 258
Malte	17 274
Piraeus (GR)	21 224

Annexe D.2. Matrice des fréquences

Frequence	Algérie		Tunisie		Libye		
	Alger	Annaba	Tunis	Sfax	Tripoli	BenGhazi	
Marseille (FR)	4	6	12	8	4	4	6
Barcelone (ES)	6	7	8	8	4	4	6
Valence (ES)	4	4	8	8	5	5	6
Genes (IT)	4	5	5	10	5	5	6
Naples (IT)	4	4	5	8	4	4	5
Malte	4	4	13	12	4	4	7
Piraeus (GR)	6	3	6	6	3	3	5

Annexe E : Analyse financière

Annexe E.1. Synthèse des poids expédiés depuis Houston-Dubaï

Houston	Libye			Tunisie			Algerie		
	Nombre d'expédition	Médiane	Poids total	Nombre d'expéditions	Médiane	Poids total	Nombre d'expéditions	Médiane	Poids total
0-45kg									
Chemical	31	22,5	697,50	1	22,50	022,50	8	22,50	180
M&S	1364	22,5	30690	191	22,50	4297,50	331	22,50	7447,5
45kg-70kg									
Chemical	6	57,5	345	0	57,50	0	2	57,50	115
M&S	132	57,5	7590	11	57,50	632,50	46	57,50	2645
70kg-100kg									
Chemical	8	85	680	1	85,00	85	0	85,00	0
M&S	100	85	8500	5	85,00	425	43	85,00	3655
100kg-200kg									
Chemical	9	150	1350	1	150,00	150	4	150,00	600
M&S	131	150	19650	15	150,00	2250	68	150,00	10200
200kg-300kg									
Chemical	9	250	2250	0	250,00	0	2	250,00	500
M&S	45	250	11250	1	250,00	250	32	250,00	8000
>300kg									
Chemical	126	908,84	114513,65	7	908,84	6361,87	34	908,84	30900,51
M&S	115	908,84	104516,43	6	908,84	5453,03	90	908,84	81795,46

Dubai	Libye			Tunisie			Algerie		
	Nombre d'expéditions	Médiane	Poids total	Nombre d'expéditions	Médiane	Poids total	Nombre d'expéditions	Médiane	Poids total
0-45kg									
Chemical	6	22,5	135	1	22,50	22,5	2	22,50	45
M&S	856	22,5	19260	255	22,50	5737,5	170	22,50	3825
45kg-70kg									
Chemical	1	57,5	57,5	0	57,50	0	1	57,50	57,5
M&S	87	57,5	5002,5	15	57,50	862,5	30	57,50	1725
70kg-100kg									
Chemical	1	85	85	0	85,00	0	1	85,00	85
M&S	35	85	2975	14	85,00	1190	19	85,00	1615
100kg-200kg									
Chemical	3	150	450	0	150,00	0	3	150,00	450
M&S	80	150	12000	16	150,00	2400	40	150,00	6000
200kg-300kg									
Chemical	3	250	750	0	250,00	0	1	250,00	250
M&S	36	250	9000	4	250,00	1000	25	250,00	6250
>300kg									
Chemical	108	908,84	98154,56	16	908,84	14541,42	55	908,84	49986,12
M&S	99	908,84	89975,01	6	908,84	5453,03	59	908,84	53621,47

Annexe E.2. Details des coûts Leg 1 – Scenario 01 Full Marseille

Marseille					
Dubai	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palettes	Cout de transport
Chimique	165,07		Maritime	8C	22376
M&S	227,89	45,58	Maritime	2C et 2P	6730
		182,31	Aérien	/	60480
				Cout total	89586

Marseille					
Houston	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palettes	Cout de transport
Chimique	158,75		Maritime	8C	17224
M&S	309,25	61,85	Maritime	3C	6459
		247,40	Aérien	/	742193,81
				Cout total	765876,81

Marseille				
Rotterdam	Poids total	Mode de transport	Nombre de conteneurs / palettes	Cout de transport
Chimique	187,39	Terrestre	9C	23994
M&S	165,48		8C	23994
			Cout total	47988

Annexe E.3. Details des coûts Leg 2 – Scénario 01 Full Marseille

Marseille				
Algerie	Poids total	Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	152,46	Maritime	7C et 3P	8316
M&S	236,22	Maritime	11C et 3P	12732
Cout total				21048
Tunisie	Poids total	Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	62,99	Maritime	3C	2952
M&S	44,26	Maritime	2C et 1P	2144
Cout total				5096
Libye	Poids total	Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	295,76	Maritime	14C et 1P	22022
M&S	422,14	Maritime	20C et 1P	31346
Cout total				53368

Annexe E.4 Details des coûts (Libye + Tunisie) – Scénario Etat Actuel

Annexe E.4.1 Cas de la Libye

Dubai					
Dubai	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	99.63		Maritime	5C	13500
M&S	138.21	27.64	Maritime	1C+3P	4467
		110.57	Aérien	/	32065.30
Cout total					50032.30

Houston					
Houston	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	119.84		Maritime	6C	13800
M&S	182.20	30.97	Maritime	2C	4600
		151.22	Aérien	/	438546.81
Cout total					456946.81

Rotterdam					
Rotterdam	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	76.29		Maritime	2C	4800
M&S	101.74	50.87	Maritime	3C	1302
		50.87	Aérien	/	14751.71
Cout total					20853.7113

Annexe E.4.2 Cas de la Tunisie

Dubai					
Tunisie	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	14.56		Maritime	1C	2737
M&S	16.64	3.33	Maritime	2P	1320
		13.31	Aérien	/	3994.33
Cout total					8051.3272

Houston					
Tunisie	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	6.62		Maritime	3P	1860
M&S	13.31	2.26	Maritime	1P	620
		11.05	Aérien	/	33578.82
Cout total					36058.8213

Rotterdam					
Tunisie	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	41.81		Maritime	2C	4876
M&S	14.31	6.87	Maritime	3P	1815
		7.44	Aérien	/	2231.72
Cout total					8922.71728

Annexe E.5 Details des coûts Leg 1 (Algérie) – Scénario Etat Actuel

Marseille					
Houston	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	32.3		Maritime	2C	4286
M&S	113.74	22.75	Maritime	1C et 1P	2633
		90.99	Aérien	/	272970
Cout total					279889

Marseille				
Rotterdam	Poids total	Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	69.29	Terrestre	3C et 3P	8640
M&S	49.44		2C+4P	6320
Cout total				8640

Marseille					
Dubai	Poids total		Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	50.87361653		Maritime	3C	8040
M&S	73.0365	14.61	Maritime	1C	2680
		58.43	Aérien	/	16360.4
Cout total					27080.4

Annexe E.6 Détails des coûts Leg 2 (Algérie) – Scénario Etat Actuel

Algérie				
Marseille	Poids total	Mode de transport	Nombre de conteneurs / palette	Cout de transport
Chimique	152.4636165	Maritime	7C et 3P	8316
M&S	86.8	Maritime	4C et 2P	4808
Cout total				21048

Annexe E.7 Détails des coûts de manutention et documentation – Scénario Etat Actuel

	Couts documentation	Couts charge conteneurs	Couts décharge conteneurs	Couts charge palettes	Couts décharge palettes	Cout total manutention
Libye	2045.75	6835	1520	276.75	45	10722.5
Tunisie	907.25	992.5	225	586.5	54	2765.25
Algérie	2563	4788	368.5	524	424	10276