Conception de réseaux de distribution pour une personnalisation produit : une contextualisation à l'échelle du continent Africain

Imane Essaadi

▶ **To cite this version:**

Imane Essaadi. Conception de réseaux de distribution pour une personnalisation produit : une contextualisation à l'échelle du continent Africain. Gestion et management. Université de Nanterre - Paris X, 2018. Français. NNT : 2018PA100182 . tel-02272417

HAL Id: tel-02272417
https://theses.hal.science/tel-02272417

Submitted on 27 Aug 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paris Nanterre
200 av. de la République
92001 Nanterre Cedex
www.parisnanterre.fr

Membre de l'université Paris Lumières

École doctorale 396 : Économie, organisation, société
CEROS EA 4429

Imane ESSAADI

Conception de réseaux de distribution pour une personnalisation produit :

Une contextualisation à l'échelle du continent Africain

Thèse présentée et soutenue publiquement le 21/12/2018
en vue de l'obtention du doctorat de Sciences de gestion de l'Université Paris Nanterre
sous la direction de M. Pierre FENIES (Université Paris Nanterre)
et de M. Bernard GRABOT (INP-ENIT, codirecteur)

Jury * **:**

Rapporteur :	M. Gilles PACHE	Professeur des Universités, Université Aix-Marseille
Rapporteur :	M. Yannick FREIN	Professeur des Universités, Grenoble INP
Suffragant :	M. Alexandre DOLGUI	Professeur, IMT Atlantique
Suffragant :	M. Bruno DURAND	MC-HDR, Université Paris Nanterre
Suffragant :	M. Nikolay TCHERNEV	Professeur des Universités, Université d'Auvergne Clermont 1
Suffragant :	M. Frédéric FONTANE	Professeur, EMINES
Suffragant :	M. Nicolas CHEIMANOFF	Professeur, EMINES

Je dédie ce travail ...

A mes chers parents adorés

Source de ma sérénité et de ma force dans cette vie
Je remercie toujours grand DIEU majestueux de m'avoir offert deux belles âmes qui sont toujours à mes côtés et me soutiennent face aux péripéties de cette vie...
Vous m'avez initié au droit de dire, de proclamer pensées et ambitions...
Vous m'avez encouragé sans relâche dans ma quête vers l'apprentissage et vers l'épanouissement...
Je n'oublierai jamais le jour de mon admission en cette thèse, vos yeux ont brillé d'euphorie...
Nous avons mené ensemble cette aventure en dépit des difficultés qui s'interposent...
Votre affection et votre soutien m'ont été de grand secours au long de cette aventure...
Ce travail est le fruit des sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation...
Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ...
Ma reconnaissance et ma gratitude pour tous vos efforts, pour rendre ces trois années de thèse une très belle aventure qui restera gravée dans ma mémoire...
Je vous dédie ce travail en témoignage de mon plus profond amour, ma gratitude, ma reconnaissance et mon respect...

A mon cher frère Nabil et ma chère sœur Hafida

Mes fidèles amis et accompagnants dans les moments les plus délicats de cette vie...
Vous êtes dans mon cœur à jamais...
En souvenir d'une enfance dont nous avons partagé d'agréables moments...
Pour toute la complicité et l'entente qui nous unissent...
Je vous dédie ce travail et je suis très reconnaissante pour l'appui, le soutien et les précieux conseils que vous ne cessez de me prodiguer...

A mon cher Professeur Bernard Grabot et son épouse Véronique

Trois années sont déjà écoulées et c'est comme si nous nous sommes rencontrés à peine hier. J'ai été très honorée de vous avoir croisé dans ma vie...

Cher Véronique...

Je vous suis reconnaissante pour votre chaleureux accueil. Grâce à votre bonté et votre grand cœur, vous avez ajouté une belle étincelle à mon séjour à Tarbes.

Cher Bernard...

Je vous suis redevable pour tout ce que j'ai pu réaliser durant cette belle aventure...

Ce manuscrit de thèse retrace le chemin que nous avons parcouru ensemble jusqu'à ce grand jour...

Je suis très chanceuse de travailler sous votre direction...

Grâce à votre soutien inconditionnel et de votre bienveillance à mon égard, ce travail a pu enfin voir le jour...

Grâce à vos précieux conseils tant personnels que professionnels, j'ai pu développer et acquérir de nouvelles compétences...

Grâce à votre bonté, à votre gentillesse et à vos encouragements incessibles, j'ai pu persévérer tout au long de cette belle aventure...

Vous m'étiez un bon conseiller, un second père, je ne saurai trouver les mots qui pourront décrire ma reconnaissance, mon respect et mon amour envers votre personne...

Enfin de cette belle aventure, je souhaite vous dédier ce travail avec tous mes sincères voeux de bonheur, de santé et de réussite...

A tous mes ami(e)s

Je vous remercie pour vos encouragements, votre support et vos précieux conseils qui m'ont été d'un grand secours tout au long de cette thèse...

Enfin

À toutes les personnes m'ont aidé et encouragé tout au long de ce labeur mais que je ne peux citer tous, je vous dédie ce travail.

Remerciements

Il y a trois années que cette belle aventure avait commencé. A ce grand jour, malheureusement et heureusement, une nouvelle page se tourne et une nouvelle aventure m'attendent. Ce qui a vraiment embelli cette aventure est la qualité des leçons que j'ai apprises nonobstant les moments difficiles que j'ai endurés, la bonté des personnes qui m'ont encouragé et accompagné tout au long de cette thèse.

Je souhaite adresser mes premiers vifs remerciements à Professeur Bernard GRABOT, d'avoir accepté de diriger ma thèse et de me porter conseil durant ces trois années. J'étais impressionnée par sa disponibilité, par la qualité de son encadrement, par ses qualités humaines, par ses conseils judicieux et par sa confiance sans laquelle je n'aurais pas pu donner libre cours à mes réflexions et cultiver ma passion pour la recherche scientifique. Je souhaite le remercier vivement pour sa relecture méticuleuse de chacun des chapitres de ce manuscrit, ce qui m'a sans aucun doute permis de valoriser et préciser mes propos.

Mes remerciements s'adressent également à Professeur Pierre FENIES d'avoir accepté de co-diriger ma thèse. Je souhaite le remercier pour la qualité de ses réflexions et de ses encouragement. Je lui suis reconnaissante pour l'énergie positive qu'il a partagé avec moi à chaque venue à l'EMINES.

Un spécial remerciement à Madame Khaoula EL BEDOUI, Professeur à ENI Carthage en Tunisie, pour sa disponibilité et pour son implication dans le deuxième axe de recherche de ma thèse. Ses conseils et ses recommandations m'ont été d'un grand secours. J'ai été honorée de l'avoir croisé sur mon chemin.

Un grand remerciement à la direction de l'EMINES, Professeur Nicolas CHEIMANOFF et Professeur Frédéric FONTANE de m'avoir ouvert la porte de cette prestigieuse Ecole d'ingénieurs et d'avoir financé mon projet de thèse. Je souhaite remercier Professeur CHEIMANOFF pour son soutien, son support et ses encouragements tout au long de ma thèse. Un grand merci à Professeur FONTANE de m'avoir impliqué dans des projets académiques, dans l'enseignement et enfin de m'avoir invité à cette belle aventure (comme il me l'a dit à la

première entrevue « bienvenue à cette aventure »). J'ai beaucoup appris durant mes études doctorales à l'EMINES et je suis très fière de faire partie de la deuxième promotion des doctorants et de l'avoir représenté pendant les conférences internationales, ceci restera gravé dans ma mémoire.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à tous les autres membres du jury, rapporteurs et examinateurs, qui m'ont fait l'honneur d'examiner minutieusement et de juger la pertinence de ce travail de thèse : Professeur Alexandre DOLGUI, Professeur Bruno DURAND, Professeur Gilles PACHE, Professeur Nicolay TCHERNEV et Professeur Yannick FREIN.

Mes remerciements vont aussi à Madame Nada ELMAJDOUB, directrice exécutive du pôle *Performance* Supply Chain et ancienne vice-présidente du département Etudes à la direction développement industriel à l'OCP. SA, pour son accueil et son encouragement à mon projet de thèse et à Monsieur Omar EL MRABET, ancien collaborateur dans ce département, pour ses précieux conseils et d'avoir challengé mes modèles pour les mieux aligner à la problématique industrielle.

Enfin, je tiens à remercier tout le staff de l'EMINES pour leur aide, leur accueil convivial et leur support durant ces années passées, je cite tout le staff du service de la scolarité, la bibliothèque, les affaires estudiantines et logistique, la reprographie et l'infirmerie.

Ces remerciements ne peuvent s'achever sans réitérer mes remerciements à ma famille qui me supporte et m'encourage jusqu'au dernier mile de ce marathon. Leur présence dans ma vie et leur encouragement sont les piliers fondateurs de la personne que je suis aujourd'hui, merci, merci et merci…

Résumé de thèse

Face à la forte concurrence internationale, de nombreuses entreprises manufacturières orientent leurs investissements vers les marchés africains pour accroître leur part de marché et rester compétitives sur le marché mondial. Ces marchés sont effet en plein essor mais demandent des produits de grande diversité. En dépit de cette attractivité, les flux commerciaux en Afrique demeurent faibles en raison de la faible qualité des infrastructures et de l'absence d'écosystèmes logistiques régionaux connectant les pays africains de manière fiable et efficace.

C'est pourquoi cette thèse de doctorat s'intéresse à la modélisation et à la résolution du problème de conception de réseaux de distribution hybrides en Afrique, intégrant des plateformes de distribution et de personnalisation finale des produits. Ces réseaux incluent, en amont, des hubs régionaux servant de porte d'entrée vers les marchés d'une région continentale. Le report de la personnalisation finale en aval du réseau logistique permet de réduire les délais de livraison aux marchés et le coût de distribution tout en maintenant une économie d'échelle.

La méthodologie que nous proposons repose sur deux grands axes de recherche :

- Le premier axe vise à définir la localisation des hubs logistiques régionaux, sur la base d'une analyse multicritères floue, version améliorée de TOPSIS floue et d'AHP ;
- Le deuxième axe aborde conception de réseaux de distribution hybrides servant des marchés fortement diversifiés (exemple : marchés des engrais). Nous avons proposé deux nouveaux modèles d'optimisation multi-objectifs minimisant le coût total d'exploitation et d'investissement, maximisant la proximité des produits aux marchés et minimisant les dommages sur les produits finis durant leur distribution. Le premier modèle est déterministe tandis que le deuxième propose une conception flexible alignée sur la dynamique et l'incertitude de l'évolution des marchés africains.

Mots clés : Conception de réseaux de distribution hybrides, report de la personnalisation finale, conception flexible, dynamique et incertitude des marchés africains, optimisation multi-objectifs, analyse multicritères floue.

Abstract

In the context of intense international competition, many manufacturing firms are directing their investments toward African markets to increase their market share and maintain their competitiveness in the global market. These markets are rapidly growing but require customized products. Despite their attractivity, trade flows in Africa remain low due to the poor quality of infrastructure and the lack of regional logistic ecosystems, connecting African countries through reliable and efficient services.

This doctoral thesis therefore focuses on modelling and solving the problem of designing hybrid distribution networks in Africa, integrating distribution and final customization platforms. These networks incorporate, upstream, regional hubs that serve as gateways to regional markets. The postponement of final customization downstream of the logistics network reduces the delivery times and downstream distribution costs while maintaining upstream economies of scale.

The methodology we suggest is based on two main areas of research:

- The first axis aims to define the location of regional logistics hubs, based on a fuzzy multi-criteria analysis approach, which is an improved version of TOPSIS fuzzy and AHP;
- The second axis focuses on the design of hybrid distribution networks serving highly diversified markets in Africa (for example: fertilizer markets). To this aim, we propose two new multi-objective optimization models minimizing total operating and investment costs, maximizing product proximity to markets and minimizing damage to finished products during their distribution. The first model is deterministic while the second one proposes a flexible design in response to the dynamics and uncertainty of the evolution of African markets.

Keywords: Design of hybrid distribution networks, postponement of final customization, flexible design, dynamic and uncertainty of African markets, multi-objective optimization, fuzzy multi-criteria analysis.

Sommaire

Remerciements **……..vi**

Résumé de thèse **.....viii**

Abstract **…….. .....ix**

Liste des figures **.....xiv**

Liste des tableaux **.....xvi**

Introduction Générale **.....18**

1. Problématique..... 18
2. Objectifs et contributions du travail de recherche..... 20
3. Macro-planning du projet de thèse..... 22
4. Eléments de valorisation de notre travail de recherche..... 22
5. Plan du mémoire..... 23

Première partie : Contexte industriel et positionnement de la recherche..... 26

Chapitre 1 : Contexte industriel de la thèse..... 27

1. Introduction du chapitre 1 28
2. Localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique 29

2.1. L'Afrique : nouvel Eldorado des industriels 29

2.2. Les hubs logistiques régionaux : des producteurs de services logistiques en Afrique 30

2.3. Contraintes de localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique 31

2.4. Terrain d'étude : industrie de services logistiques (Third Party Logistic – 3PL)..... 33

3. Personnalisation retardée : une réponse à la dynamique et à la diversité des marchés africains 34

3.1. Dynamique et diversité des marchés africains 34

3.2. Personnalisation retardée dans une chaîne logistique..... 37

3.3. Terrain d'étude : *Blending* et distribution d'engrais en Afrique..... 42

4. Conclusion du chapitre 1 50

Chapitre 2 : Etat de l'art et positionnement du travail de la recherche 51

1. Introduction du chapitre 2 52
2. Généralités sur la conception d'un réseau de chaînes logistiques 52

2.1. Réseau de chaînes logistiques 52
2.2. Caractéristiques et taxonomie d'un réseau logistique 53
2.3. Cartographie décisionnelle de la conception d'un réseau logistique 54
3. Revue de littérature sur la sélection des hubs logistiques 56
3.1. Contexte géographique et type des hubs 57
3.2. Sources et précision des évaluations 57
3.3. Séquence de décision 58
3.4. Critères de localisation des hubs 59
3.5. Limite des travaux de recherche pour la localisation des hubs logistiques 59
4. Etat de l'art sur la conception d'un réseau logistique 62
4.1. Motivations et applications industrielles 63
4.2. Cadre décisionnel de la conception d'un réseau logistique 64
4.3. Caractéristiques du réseau logistique et des marchés 71
4.4. Système de valorisation des coûts 73
4.5. Critères d'optimisation 73
4.6. Limite des travaux de recherche pour la conception d'un réseau logistique 74
5. Revue de littérature sur la différenciation retardée dans les chaînes logistiques 75
6. Conclusion du chapitre 2 77
Chapitre 3 : Outils méthodologiques 78
1. Introduction du chapitre 3 79
2. Méthodologie ASCI 79
2.1. Analyse et Spécification 80
2.2. Conception et implémentation du modèle d'action 82
3. Méthodes d'analyse multicritères floues 83
3.1. Logique floue 83
3.2. Revue des méthodes d'analyse multicritères floues 89
3.3. Description des méthodes choisies 92
4. Méthodes d'optimisation multi-objectifs 98
4.1. Définitions et cadre théorique 98
4.2. Revue de littérature sur les méthodes d'optimisation multi-objectifs 101
5. Méthodes d'optimisation sous incertitude 104
5.1. Revue de littérature sur les méthodes d'optimisation sous-incertitude 104

5.2. Synthèse 107
6. Conclusion du chapitre 3 109
Deuxième partie : Proposition et mise en œuvre des modèles d'aide à la décision 110
Chapitre 4 : Localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique sur la base d'une approche d'aide à la décision multicritères floue 111
1. Introduction du chapitre 4 112
2. Une approche pour l'aide à la décision multicritères « floue » 113
2.1. Cadre de référence des critères de localisation des hubs 113
2.2. Définition des critères de localisation des hubs régionaux 114
2.3. Description de la démarche d'évaluation multicritères floue 122
3. Etude de cas 126
3.1. Objectif de l'étude 127
3.2. Résultats expérimentaux 128
3.3. Analyse et interprétation des résultats 134
4. Conclusion du chapitre 4 136
Chapitre 5 : Conception multi-objectifs de réseaux de distribution hybrides 138
1. Introduction du chapitre 5 139
2. Description du problème décisionnel 141
2.1. Localisation des plateformes de distribution et personnalisation 143
2.2. Dimensionnement des capacités de stockage et de personnalisation 145
3. Modélisation du problème 150
3.1. Modèle systémique du problème 150
3.2. Modélisation mathématique du problème 160
4. Approche de résolution du problème 175
4.1. Règles de génération des données de base du modèle 175
4.2. Description de l'approche d'optimisation : méthode *ε-constraint* 180
5. Etude de cas 182
5.1. Scénarios et hypothèses d'étude 183
5.2. Analyse des résultats 185
5.3. Impact de la diversité et la taille des marchés sur la localisation du blending 188
5.4. Impact de la diversité des composants sur la localisation du blending 191
6. Conclusion du chapitre 5 193

Chapitre 6 : Conception flexible et robuste de réseaux de distribution hybrides : Application à la distribution et au *blending* d'engrais 194

1. Introduction du chapitre 6 195
2. Description du problème décisionnel 196
   2.1. Localisation flexible des plateformes de distribution et de personnalisation 198
   2.2. Dimensionnement flexible des plateformes 200
3. Modélisation de la conception flexible de réseaux de distribution hybrides 201
   3.1. Modèle systémique du problème 202
   3.2. Modélisation mathématique du problème 209
4. Résolution du problème sous-incertitude : Approche de planification robuste à horizon glissant 222
   4.1. Etape 1 : Initialisation des données du problème durant le i^{ème} horizon de planification 223
   4.2. Etape 2 : Optimisation déterministe du problème sur le i^{ème} horizon de planification 229
   4.3. Etape 3 : Analyse de la robustesse 230
   4.4. Etape 4 : Réinitialisation du réseau 231
5. Etude de cas 231
   5.1. Illustration de l'approche de planification robuste 233
   5.2. Influence économique d'une conception flexible du réseau 237
6. Conclusion du chapitre 6 244

Conclusion Générale et perspectives de recherche 245

1. Conclusion générale 245
2. Implications managériales 248
3. Perspectives de recherche 249

***Bibliographie*……... 254**

Liste des figures

Figure 1.1 – Evolution des flux des importations et d'exportation 30
Figure 1.2 – Périmètre externe d'un hub logistique régional 31
Figure 1.3 – Disparités entre les pays d'Afrique subsaharienne (Gwilliam, 2011) 32
Figure 1.4 – Pourcentage de population africain dans la population mondiale (Deloitte, 2015) 36
Figure 1.5 – Stratégies de personnalisation retardée dans une chaîne logistique (Yang and Burns, 2003) 38
Figure 1.6 – Localisation de la personnalisation finale dans une chaîne logistique 40
Figure 1.7 – Distribution des domaines climatiques en Afrique 41
Figure 1.8 – Taux d'application d'engrais pour la culture de maïs (source : statistiques de la Banque Mondiale en 2014) 43
Figure 1.9 – Analyse comparative du prix d'engrais par tonnes (Wanzala et Groot, 2013) 44
Figure 1.10 – Chaînes de distribution d'engrais en Afrique 45
Figure 1.11 – Exemple de la structure d'un engrais complexe et blendé 47
Figure 2.1 – Structure d'un réseau de chaînes de production-distribution (Lambert et al., 1998) 53
Figure 3.1 – Description de la méthodologie ASCI (Chabrol et al., 2009) 81
Figure 3.2 – Interaction entre SSP, SSD et SSL (Lemoine, 2008) 82
Figure 3.3 – Représentation de la température par la logique classique 84
Figure 3.4 – Représentation de la température par la logique floue (Zadeh, 1965) 85
Figure 3.5 – Fonction d'appartenance d'un nombre flou trapézoïdal 86
Figure 3.6 – Fonction d'appartenance d'un nombre flou triangulaire 86
Figure 3.7 – α-coupe associée à un nombre flou triangulaire 89
Figure 3.8 – Illustration du concept des distances à l'idéal et à l'anti-idéal 92
Figure 3.9 – Représentation du front de Pareto, point idéal et point Nadir (Alaya, 2009) 100
Figure 3.10 – Principe de la planification à horizon glissant 108
Figure 4.1 – Diagramme de classes du contexte étudié 114
Figure 4.2 – Appréciation de la profondeur de l'eau 120
Figure 4.3 – Exemple de variables linguistiques pour l'évaluation des données qualitatives (Hatami-Marbini et Kangi, 2017) 121
Figure 4.4 – Démarche proposée d'analyse multicritères floue 121
Figure 4.5 – Evaluation finale optimiste (cas 2) 136
Figure 4.6 – Evaluation finale pessimiste (cas 2) 136
Figure 5.1 – Exemple de configuration type d'un futur réseau de distribution hybride 143
Figure 5.2 – Facteurs impactant les capacités de stockage amont et aval 146
Figure 5.3 – Interdépendance entres les décisions de localisation et dimensionnement 148
Figure 5.4 – Diagramme de classe du sous-système physique (SSP) 152
Figure 5.5 – Diagramme de classe du sous-système logique (SSL) 153
Figure 5.6 – Diagramme de classes des contraintes 155
Figure 5.7 – Diagramme de classes du modèle de coûts 156
Figure 5.8 – Diagramme de classes UML du sous-système décisionnel (SSD) 157

Figure 5.9 – Diagramme de classes global UML du problème de conception de réseaux de distribution hybrides 159
Figure 5.10 – Distribution saisonnière de la demande (scénario 1) 184
Figure 5.11 – Distribution saisonnière de la demande (scénario 2 et 3) 184
Figure 5.12 – Solutions de localisation des plateformes de blending et de distribution sous chaque scénario 186
Figure 5.13 – Légende de la figure 5.12 187
Figure 5.14 – Distribution du coût total sous chaque scénario 188
Figure 5.15 – Distribution du coût total en fonction de la diversité et la taille des marchés et de la localisation du blending 189
Figure 5.16 – Distribution des coûts d'investissement, de blending et de distribution en fonction de la localisation du blending (scénario 1) 190
Figure 5.17 - Distribution des coûts d'investissement, de blending et de distribution en fonction de la localisation du blending (scénario 2) 191
Figure 5.18 – Distribution du coût total en fonction de la diversité des composants et de la localisation du blending 192
Figure 5.19 – Distribution des coûts d'investissement, de blending et de distribution en fonction de la localisation du blending (scénario 3) 192
Figure 6.1 – Exemple de configuration type d'un futur réseau de distribution hybride 197
Figure 6.2 – Illustration de la localisation flexible des plateformes 199
Figure 6.3 – Illustration de la relocalisation des capacités modulaires 201
Figure 6.4 – Diagramme de classe UML du sous-système physique (SSP) 202
Figure 6.5 – Diagramme de classe UML du sous-système logique (SSL) 203
Figure 6.6 – Diagramme de classe UML des contraintes du réseau de distribution hybride 204
Figure 6.7 – Diagramme de classe UML du modèle de coûts 205
Figure 6.8 – Diagramme de classe UML du sous-système décisionnel (SSD) 206
Figure 6.9 – Diagramme de classe UML du problème de conception flexible de réseaux de distribution des flux hybrides 208
Figure 6.10 – Exemple de relocalisation des capacités directe vs indirecte 216
Figure 6.11 – Approche de planification robuste à une itération 222
Figure 6.12 – Algorithme de planification robuste à horizon glissant 230
Figure 6.13 – Distribution géographique des cultures de rente 232
Figure 6.14 – Distribution géographique des cultures vivrières 232
Figure 6.15 – Localisation des plateformes et des marchés 233
Figure 6.16 – Scénarios d'évolution de la demande 235
Figure 6.17 – Les coûts d'exploitation (bleu) et de conception (orange) du réseau 236
Figure 6.18 – Coûts d'exploitation et d'ajustement du réseau 237
Figure 6.19 – Comparaison des économies de coûts 240
Figure 6.20 – Dimensionnement des capacités de stockage modulaires 241
Figure 6.21 – Solutions de la localisation des plateformes de distribution et de blending 243

Liste des tableaux

Tableau 0.1 – Macro-Planning du projet de thèse 22
Tableau 2.1 – Grille d'analyse des papiers sur la localisation des hubs logistiques 60
Tableau 2.2 – Critères de localisation dans la littérature 61
Tableau 2.3 – Grille d'analyse des articles de conception d'un réseau logistique (partie 1) 66
Tableau 2.4 – Grille d'analyse des articles de conception d'un réseau logistique (partie 2) 67
Tableau 3.1 – L'échelle de comparaison basée de l'échelle de (Saaty, 2008) 97
Tableau 3.2 – L'échelle de comparaison basée de l'échelle de (Saaty, 2008) 97
Tableau 3.3 – Exemple de table de gain basée sur l'optimisation lexicographique 101
Tableau 4.1 – Mesures des critères d'attractivité du pays (1ère catégorie) 116
Tableau 4.2 – Mesure des critères d'attractivité de l'écosystème logistique (2ème catégorie) 118
Tableau 4.3 – Illustration de la comparaison des mesures d'une distance floue 124
Tableau 4.4 – Exemple de suggestions pour l'évaluation des localisations des hubs 126
Tableau 4.5 – Hubs candidats 126
Tableau 4.6 – Matrice de comparaison par paires des critères d'attractivité des pays 127
Tableau 4.7 – Pondération finale des critères au niveau des pays 128
Tableau 4.8 – Poids final des critères au niveau des écosystèmes logistiques 128
Tableau 4.9 – Matrice de décision concernant les critères d'attractivité des pays 129
Tableau 4.10 – Matrice de décision par rapport aux critères d'attractivité de l'écosystème logistique 130
Tableau 4.11 – Matrice de décision floue normalisée et pondérée par rapport aux critères d'attractivité de l'écosystème logistique 131
Tableau 4.12 – Solution idéales floues FPIS+, FNIS- 132
Tableau 4.13 – Distance entre chaque alternative et FPIS+/ FNIS- (Critères sur les écosystèmes logistiques) 133
Tableau 4.14 – Classement final des alternatives en ce qui concerne l'attractivité de l'écosystème logistique 135
Tableau 4.15 – Classement final des alternatives en termes d'attractivité des pays 135
Tableau 5.1 – Notations relatives au système de production 161
Tableau 5.2 – Notations relatives système de distribution 162
Tableau 5.3 – Notations relatives à la demande 163
Tableau 5.4 – Les variables de décision stratégiques 163
Tableau 5.5 – Les variables de décision tactiques 164
Tableau 5.6 – Coûts stratégiques unitaires 173
Tableau 5.7 – Coûts opérationnels unitaires 174
Tableau 5.8 – Exemple de génération des capacités de transport (routier, ferroviaire et maritime) ... 179
Tableau 5.9 – Table des gains obtenue par l'optimisation lexicographique de f_1, f_2 et f_3 181
Tableau 5.10 – Données de base 181
Tableau 5.11 – Description des scénarios étudiés 182
Tableau 5.12 – Table de gain obtenue par l'optimisation lexicographique de f1 et f3 185
Tableau 5.13 Solutions de dimensionnement des capacités de stockage et de blending 189

Tableau 6.1 – Les variables de décision stratégiques 210
Tableau 6.2 – Les variables de décision tactiques 211
Tableau 6.3 – Les nouvelles variables de relocalisation des capacités 220
Tableau 6.4 – Les coûts stratégiques unitaires 220
Tableau 6.5 – Les coûts opérationnels unitaires 221
Tableau 6.6 – Paramètres logistiques et de coûts à la première année 234
Tableau 6.7 – Taux d'évolution incertain 235
Tableau 6.8 – Calcul des regrets relatifs 236
Tableau 6.9 – Hypothèses 238

Introduction Générale

1. Problématique

À l'ère actuelle de la mondialisation, de nombreuses entreprises manufacturières sont constamment à la recherche de nouveaux marchés et de nouvelles ressources de production et orientent leurs investissements vers les pays émergents. Cet intérêt récent pour ces pays est dû principalement à l'abondance des matières premières, permettant le développement d'une économie diversifiée à des prix compétitifs, à la qualification d'une main d'œuvre jeune et dynamique, accessible à moindre coût, et à l'attractivité de la croissance de la consommation de ces marchés.

L'Afrique, le nouvel Eldorado, a un intérêt particulier pour ces investisseurs. Ces derniers tentent en effet d'étendre leurs réseaux logistiques pour mieux approcher les marchés africains et profiter des ressources. Selon une étude récente de Deloitte[1], l'Afrique est classée 2ème marché de consommation au monde en 2017, dominé par les jeunes consommateurs.

L'économie africaine est en voie de devenir l'un des principaux moteurs de la croissance économique mondiale surpassant ainsi celles des pays développés. Cependant, en dépit de son attractivité, l'Afrique souffre de limitations tant au niveau de ses pays que de ses écosystèmes logistiques, marqués par la faiblesse des infrastructures de transport, la cherté du transport, la lourdeur des réglementations douanières et la faiblesse de la stabilité interne de certains pays, etc. Ces limitations augmentent la pression sur les coûts d'investissement et d'exploitation des réseaux logistiques.

C'est pourquoi le choix des hubs logistiques régionaux en Afrique, portes d'entrée vers les marchés régionaux, doit être effectué avant la conception ou la restructuration des réseaux logistiques en Afrique. Ces hubs régionaux (par exemple implantés dans les zones franches des ports ou aéroports) permettent aux industriels d'atteindre efficacement et de manière efficiente

[1] http://www.afrik.com/l-afrique-sera-le-deuxieme-marche-mondial-de-consommation-en-2017

leurs marchés cibles. De plus, le choix de la localisation de ces hubs a un impact significatif sur les performances du réseau et devra donc prendre en compte les forces et les faiblesses de l'Afrique, en incorporant l'impact positif ou négatif des grandes disparités entre ses pays. Cette décision stratégique doit être donc basée sur des critères qualitatifs et quantitatifs discriminants impliquant le jugement subjectif des décideurs. Or, dans le contexte africain, ce jugement peut être entaché d'imprécision mais aussi d'incertitude, ce qui influe sur les approches d'aide à la décision choisies et sur la modélisation des connaissances utilisées.

Ces hubs peuvent desservir plusieurs industriels et sont donc communs à plusieurs réseaux de distribution. La conception de ces réseaux en Afrique doit être alignée sur les conditions de distribution et sur les variations des demandes actuelles et futures. De plus, les futurs réseaux de distribution doivent permettre de rapprocher l'offre et la demande en termes de diversité, qualité et proximité aux zones de consommation, à des prix compétitifs tenant compte du pouvoir d'achat des consommateurs africains.

La diversité des cultures et des habitudes de consommation accentue davantage le besoin de produits plus personnalisés. Pour offrir un portefeuille de produits très diversifiés, garantir une forte réactivité et une proximité des produits à des marchés géographiquement éloignés tout en maintenant des économies d'échelle, une solution est de personnaliser ces produits pendant la distribution. Plus précisément, cette personnalisation se traduit par la mise en place d'installations de personnalisation (assemblage, conditionnement…) au niveau des plateformes de distribution. La localisation et le dimensionnement optimaux des plateformes de distribution et de personnalisation dans un réseau de distribution résulteront d'un compromis entre l'efficience, la réactivité et le maintien de la qualité des produits personnalisés pendant leur distribution finale.

Par ailleurs, la conception de ces réseaux en Afrique doit être flexible et robuste par rapport à l'évolution des conditions de la distribution[2] et de la demande.

[2] Depuis presque une décennie, de nombreux projets d'investissement, pilotés par des fonds internationaux, visent à améliorer l'état des infrastructures de transports, d'énergie et d'eau et des offres logistiques. Selon un rapport récent sur les tendances de la construction en Afrique (Deloitte, 2017), le nombre de projets évalués à plus de 50 millions de dollars a progressé de 5,9% par rapport à 2016, témoignant de l'essor des investissements d'infrastructure en Afrique.

2. Objectifs et contributions du travail de recherche

Cette thèse de doctorat s'inscrit à l'interface des Sciences de Gestion et du Génie Industriel. Par un mécanisme de recherche-action et de démarche ingéniérique, cette thèse de doctorat a pour objectif de proposer et de tester des modèles d'aide à la décision pour la conception de réseaux de distribution hybrides, intégrant des plateformes de distribution et de personnalisation finale des produits, en fonction des flux à acheminer et des conditions des infrastructures existantes et/ou à développer. Ces modèles permettront de réaliser une analyse comparative des schémas directeurs logistiques candidats et des réseaux logistiques à mobiliser en fonction des objectifs fixés en termes de niveau de service (coût, qualité, diversité), de la nature des flux et des conditions commerciales et logistiques retenues.

Par ailleurs, ces modèles offriront la possibilité d'analyser la robustesse des schémas logistiques en fonction des évolutions des marchés africains, dans un contexte incertain. Notamment, ils permettront d'intégrer des facteurs tels que l'évolution incertaine de la demande, tant temporelle que spatiale (émergence de nouveaux marchés et/ou disparition des marchés existants).

Pour répondre à ces objectifs, notre méthodologie de recherche repose sur deux grands axes :

- Le premier vise à définir la localisation des hubs logistiques régionaux, à partir desquels les flux de distribution devront transiter, sur la base d'une analyse multicritères floue. Pour tenir compte de l'imprécision et de l'incertitude des informations et connaissances, la théorie des ensembles flous a en effet été adoptée comme cadre de modélisation globale de l'information. La méthode AHP est utilisée pour pondérer les critères de décision tandis qu'une version modifiée de TOPSIS floue est proposée pour évaluer les localisations candidates. Nous suggérons en effet dans notre approche de modifier la distance entre deux solutions couramment utilisées dans TOPSIS floue, avec deux objectifs principaux : 1) éviter une défuzzification précoce des connaissances, qui peut remettre en question l'intérêt d'une modélisation floue de l'information, et 2) prendre en compte la confiance des experts dans l'appréciation finale.

- Le deuxième axe de recherche se focalise sur un exemple type de flux logistiques pour concevoir des réseaux de distribution intégrant la personnalisation finale de produits fortement diversifiés dont la demande est saisonnière. Pour ce faire, nous proposons deux nouveaux modèles d'optimisation multi-objectifs et génériques aux problèmes de conception et/ou de restructuration de réseaux de distribution hybrides. Trois critères d'optimisation sont pris en compte : la minimisation du coût total (d'investissement et d'exploitation du réseau), la maximisation de la proximité des stocks de produits personnalisés aux marchés et la minimisation des dommages impactant les produits pendant la distribution finale, en rapprochant les plateformes de personnalisation des marchés.
    - Le premier modèle vise, dans un contexte moyen terme et déterministe, à définir la localisation et dimensionnement des plateformes, en faisant l'hypothèse que ces décisions restent inchangées sur tout l'horizon. Nous avons adapté et déployé la méthode ε -*constraint* pour la résolution de ce problème.
    - Le deuxième modèle étend le premier en intégrant, dans un contexte incertain, une certaine flexibilité dans la prise de décision pour s'aligner sur la dynamique des marchés. Les degrés de liberté ajoutés se matérialisent par l'ouverture et la fermeture des plateformes durant l'horizon de planification, l'extension ou la relocalisation des capacités (personnalisation ou stockage) et la location temporaire des plateformes de stockage. Pour résoudre ce problème sous incertitude, nous avons proposé une approche de planification robuste à horizon glissant, cette dernière étant déployée en cas de forte volatilité des demandes des marchés.

3. Macro-planning du projet de thèse

Notre projet de thèse a été réalisé sur trois ans. Le tableau 0.1 récapitule de façon macroscopique les principales étapes et jalons du projet selon une maille trimestrielle.

Tableau 0.1 – Macro-Planning du projet de thèse

		2015	2016				2017				2018		
		Trimestre 4	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3
Imprégnation													
Recherche Bibliographique													
Analyse de l'existant													
Modélisation													
Mise en œuvre et validation													
Premier axe de recherche	Conférence 1				*RIRL 2016*								
	Conférence 2				*IMS 2016*								
	Article 1										*Soumission*		
Deuxième axe de recherche	Conférence 3								*APMS 2017*				
	Conférence 4											*ILS 2018*	
	Article 2											*Soumission*	
	Article 3												*Soumission*
	Rédaction de thèse												*Soutenance*

4. Eléments de valorisation de notre travail de recherche

Cette thèse a fait l'objet de plusieurs publications et présentations, récapitulées ci-dessous :

- Publications soumises à des revues internationales à comité de lecture :

  a. Essaadi I., B. Grabot et P. Féniès 2018. Location of regional logistic hubs within Africa based on a fuzzy multi-criteria approach. Soumis à *Computers & Industrial Engineering (CAIE).*

  b. Essaadi I., B. Grabot, K. Elbedoui et P. Féniès 2018. Dynamic design of distribution networks for mass customization in continuous process industries under uncertainty: Case of fertilizer industry in Africa. Soumis à *International Journal of Production Economics (IJPE).*

- Communications avec actes édités dans des congrès internationaux :

  a. Essaadi I., B. Grabot, K. Elbedoui et P. Féniès 2018.Tailored dynamic design/re-design of a hybrid distribution network with postponement customization serving

emerging markets in Africa. 7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, 08-11 Juillet 2018, Lyon, France (https://ils2018.sciencesconf.org/).

b. Essaadi I., B. Grabot et P. Féniès 2017. Design of hierarchical multimodal logistic hub network with postponement strategy-Application to fertilizers distribution chain. International Conference on Advances in Production Management Systems, 03-07 Septembre 2017.

c. Essaadi I., B. Grabot et P. Féniès 2016. Location of logistic hubs at national and subnational level with consideration of the structure of the location choice. *IFAC-Papers OnLine*, 12th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS 05-07 Décembre 2016, 49, 155–160 (https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.178).

d. Essaadi I., V. Giard et B. Grabot 2016. Analytical Mapping of Academic Research on Hubs. 11ème Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique et Supply Chain Management Conférence internationale RIRL, 07- 09 Septembre 2016, EPFL- Lausanne, Suisse.

5. Plan du mémoire

Le présent manuscrit est le fruit de notre travail de recherche réalisé dans le cadre de la thèse intitulée : « Conception de réseaux de distribution pour une personnalisation produit : une contextualisation à l'échelle du continent Africain ». Il est organisé en six chapitres regroupés en deux parties.

La première partie est constituée de chapitres 1, 2 et 3. Elle a pour objet de fixer le cadre pratique et théorique de la recherche.

- Le chapitre 1 est consacré à l'introduction du contexte industriel de notre travail de recherche. Il pose les cadres de référence essentiels à la compréhension des problèmes traités dans cette thèse, notamment la localisation des hubs logistiques régionaux et la conception de réseaux de distribution et de personnalisation en Afrique (réseaux de distribution hybrides). Ce chapitre sera aussi l'occasion de

décrire les besoins et les enjeux de nos deux partenaires industriels ((1) prestataire de services logistiques tierces et (2) producteur d'engrais) par rapport à chaque axe de recherche.

- Le chapitre 2 est dédié à la présentation d'une revue de littérature relative à notre problématique de recherche. Plus précisément, nous rappelons des concepts liés à la conception de réseaux ou chaînes logistiques, puis nous présentons un état de l'art sur la sélection des hubs logistiques, sur la conception d'un réseau logistique et sur le positionnement de la différenciation (ou personnalisation) retardée dans une chaîne logistique.

- Le chapitre 3 vise à présenter et à justifier le choix de méthodes sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour modéliser et résoudre chacun des problèmes soulevés dans notre problématique. Tout abord, nous passons en revue les méthodes d'analyse multicritères et rappelons les principes de la logique floue que nous appliquerons à la modélisation de choix subjectifs et imprécis pour la localisation des hubs logistiques régionaux. Ensuite, nous explorons les méthodes d'optimisation multi-objectifs pour modéliser et résoudre le problème de conception de réseaux de distribution et de personnalisation en univers certain. Enfin, nous examinons la littérature des méthodes d'optimisation sous incertitude pour modéliser et résoudre le problème de conception de réseaux de distribution et de personnalisation en univers incertain.

La deuxième partie comprend trois chapitres, 4, 5 et 6. Elle est consacrée à la présentation des modèles d'aide à la décision génériques que nous proposons dans le cadre de cette recherche. Cette partie illustre également la mise en œuvre de ces modèles pour la résolution de problèmes réalistes pour le compte de chacun de nos partenaires industriels.

- Le chapitre 4 décrit la structure générique de notre première approche hybride d'analyse multicritères floue pour la sélection des hubs logistiques régionaux, en tenant compte de l'imprécision des informations et des jugements subjectifs d'experts. Cette approche combine une version améliorée de la méthode TOPSIS floue, utilisée pour l'évaluation des hubs sur la base de l'attractivité des pays et de la compétitivité des écosystèmes logistiques des hubs, et la méthode AHP (utilisée

pour la pondération des critères de sélection). La mise en œuvre de cette approche a été illustrée sur un cas réaliste, en la comparant avec une approche d'analyse multicritères classique (TOPSIS floue).

- Le chapitre 5 présente la modélisation et la résolution générique du problème de conception de réseaux de distribution et de personnalisation dans un contexte déterministe. Tout d'abord, nous analysons les arbitrages décisionnels et la complexité décisionnelle du problème. Ensuite, nous présentons la modélisation systémique et mathématique ainsi que l'approche de résolution de ce problème en se basant sur la méthode *ε-constraint*. Enfin, ce chapitre illustre l'applicabilité et la validité du modèle à travers des scénarios réalistes (mais non réels) sur la base du problème de distribution et de *blending* d'engrais en Côte d'Ivoire.
- Le chapitre 6 vise à corriger les limites du modèle présenté dans le chapitre 5 en intégrant la flexibilité dans la prise de décision. Cette flexibilité concerne l'ouverture et la fermeture multi-périodes des plateformes de distribution et de personnalisation, l'extension ou la relocalisation des capacités de stockage et de personnalisation et l'externalisation du stockage temporairement pendant les pics de la demande. Nous décrivons la modélisation mathématique du problème en univers déterministe. Ensuite, nous explicitons l'approche de résolution du problème sous incertitude en nous basant sur une mesure de robustesse. Cette approche sera illustrée et validée par une étude de conception d'un réseau de distribution et de *blending* d'engrais en Côte d'Ivoire. Cette étude sert également à justifier la contribution industrielle du modèle en analysant les gains économiques générés par la gestion optimale des degrés de flexibilité.

En conclusion générale de ce manuscrit de thèse, nous résumons les principales contributions de ce travail de recherche puis nous évoquons des perspectives de recherche qui peuvent l'enrichir et donner suite à d'autres travaux, notamment par rapport :

- au modèle de coût du problème ;
- à une approche d'optimisation à grand échelle ;
- à l'analyse de la robustesse des schémas logistiques par un couplage entre optimisation et simulation.

Première partie : Contexte industriel et positionnement de la recherche

Chapitre 1

Contexte industriel de la thèse

1. Introduction du chapitre 1

Ce premier chapitre est consacré à l'introduction du contexte industriel de notre travail de recherche. L'objectif de ce chapitre sera donc de poser le cadre de référence essentiel à la compréhension des problèmes traités dans cette thèse, notamment la localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique et la conception de réseaux de distribution et de personnalisation en Afrique (i.e. les réseaux de distribution hybrides).

Dans la 2ème section, liée au premier problème, nous présenterons le potentiel d'investissement en Afrique en tant que marché de consommation et mine de ressources. Ensuite, nous décrirons les contraintes et les enjeux de la localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique, ces derniers facilitant l'accès des industriels aux marchés régionaux, en particulier les prestataires de services logistiques. Enfin, nous expliciterons les exigences de notre premier partenaire industriel, pionnier dans la prestation de services logistiques, par rapport à la localisation de ses hubs logistiques régionaux en Afrique.

Dans la 3ème section, associée au deuxième problème, nous aborderons la personnalisation finale retardée comme une réponse à la dynamique des marchés africains, fortement diversifiés. En premier lieu, nous présenterons un aperçu sur les différentes stratégies de personnalisation retardée dans une chaîne logistique, ainsi que sur la dynamique et la diversité des marchés africains. Ensuite, nous expliciterons les enjeux et les contraintes de la distribution et du *blending* d'engrais, ces deux points étant caractéristiques des problèmes résultant du report de la personnalisation finale et de demandes très spécifiques et saisonnières. Enfin, nous présenterons les besoins de notre deuxième partenaire industriel, leader dans l'industrie de production d'engrais, par rapport à la conception de réseaux de distribution et de *blending* d'engrais en Afrique.

2. Localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique

2.1. L'Afrique : nouvel Eldorado des industriels

L'Afrique est en forte émergence et est riche de par les spécificités de ses pays, ce qui fait d'elle un nouveau pôle de croissance mondiale. Ce continent se dote d'un marché de consommation en plein essor, plébiscité par de nombreux industriels. Avec plus de 1,1 milliard d'habitants, consommateurs potentiels dont la moitié a moins de 25 ans, avec des besoins de plus en plus spécifiques, le continent s'est classé deuxième marché de consommation au monde[3]. Ceci est favorisé par la croissance démographique et la montée en puissance des classes moyennes. Ce potentiel de consommation se matérialise par la croissance des importations des pays africains, dominées par les flux de produits manufacturés ou transformés (alimentaires, vestimentaires, nouvelles technologies, etc.), durant cette dernière décennie (figure 1.1).

Par ailleurs, l'Afrique a un potentiel incontestable en ressources naturelles et humaines jeunes ; elle possède 40% des réserves mondiales de ressources naturelles (minières et pétrolières, faune, flore) et 65 % des terres agricoles non exploitées restantes de la planète[4]. Ainsi, de nombreux investisseurs ont jeté leur dévolu sur ce continent aux mille facettes, dans différents secteurs d'activités (textile, automobile, médical, grande distribution, mines, etc.). Le continent devrait drainer jusqu'à 144 milliards de dollars d'investissements à l'horizon de 2020[5].

L'émergence de ces flux d'investissement industriels sera accompagnée d'une augmentation des flux d'exportations à partir de ces pays. A titre d'illustration, au Maroc, classé parmi les cinq plus importants destinataires des Investissements Directs Etrangers (IDE), l'émergence de nouveaux flux d'investissements dans le secteur automobile a engendré en 2017 une croissance de flux d'exportation de 7,3 % par rapport à 2016.

[3] http://www.afrik.com/l-afrique-sera-le-deuxieme-marche-mondial-de-consommation-en-2017
[4] http://www.africa-onweb.com/economie/transports-afrique.htm
[5] http://www.africaresearchinstitute.org

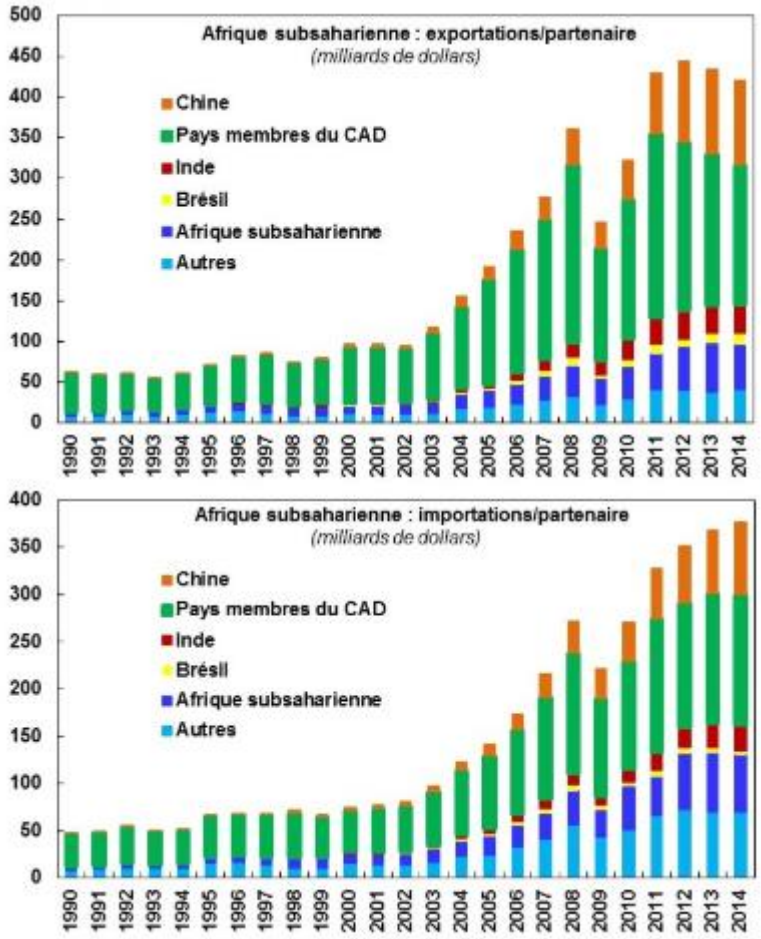

Figure 1.1 – Evolution des flux des importations et d'exportation[6]

2.2. Les hubs logistiques régionaux : des producteurs de services logistiques en Afrique

Avec la croissance des flux de marchandises à l'export et à l'import en Afrique, il est d'une grande importance d'instaurer de nouveaux hubs logistiques régionaux. Ces derniers permettent de consolider les flux importants de différents types de marchandises (matières premières, produits semi-finis, produits finis...) au niveau international en vue de les disséminer vers le marché régional et/ou local (figure 1.2). De plus, ils peuvent également être utilisés comme des plateformes de transbordement, reliant les fournisseurs et/ou producteurs internationaux aux zones de consommation internationales (figure 1.2).

[6] https://www.imf.org/external/french/np/blog/2015/122115f.htm

Le passage par un hub logistique offre de nombreux avantages pour les industriels et pour les prestataires de services logistiques. Citons entre autres : la réduction des coûts de stockage et/ou de distribution en raison des économies d'échelle (dues à la consolidation des flux), l'utilisation d'une combinaison optimale de modes de transport, la fluidité du transit et/ou d'import et/ou d'export avec une meilleure traçabilité des flux, et éventuellement la suspension des droits de douane et la réduction des impôts locaux.

Par ailleurs, la mise en place de ces hubs en Afrique permettra également de favoriser les flux de marchandises exportées et importées, d'attirer de nouveaux industriels et prestataires de services logistiques et de les aider à gagner des parts de marché dans un contexte contrasté où opportunités et risques sont présents sur le même terrain. La qualité des services offerts par ces hubs et leur efficience dépendront fortement de leur emplacement. C'est pourquoi nous nous intéresserons dans ce qui suit aux différentes contraintes qui peuvent entraver leur bon fonctionnement.

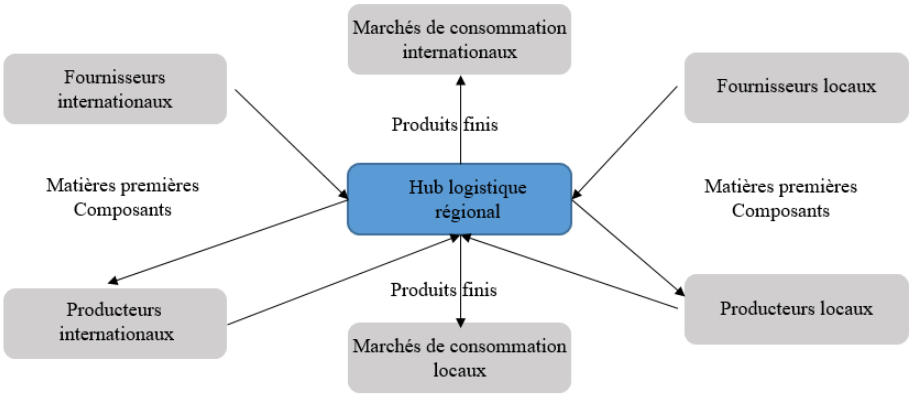

Figure 1.2 – Périmètre externe d'un hub logistique régional

2.3. Contraintes de localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique

La mise en place des hubs logistiques régionaux en Afrique requiert un important investissement capitalistique. Par conséquent, le choix de la localisation d'un hub est d'extrême criticité et nécessitera une stratégie bien pensée, tenant compte des contraintes qui peuvent nuire au bon fonctionnement de ces hubs. En effet, en dépit de l'attractivité de l'Afrique, celle-ci souffre de limitations tant au niveau de ses écosystèmes logistiques que de ses pays (figure 1.3) :

- ***faiblesse de l'infrastructure de transport***. L'Afrique se caractérise par une faible densité d'infrastructures régionales. Les infrastructures routières - qui assurent 80 à 90 % du trafic intra régional - ne représentent que 6,84 km pour chaque 100 km. Le réseau ferroviaire reste limité, avec seulement 2,96 km pour chaque 1000 km. Il existe également une grande disparité entre les pays africains en ce qui concerne les infrastructures portuaires[5].

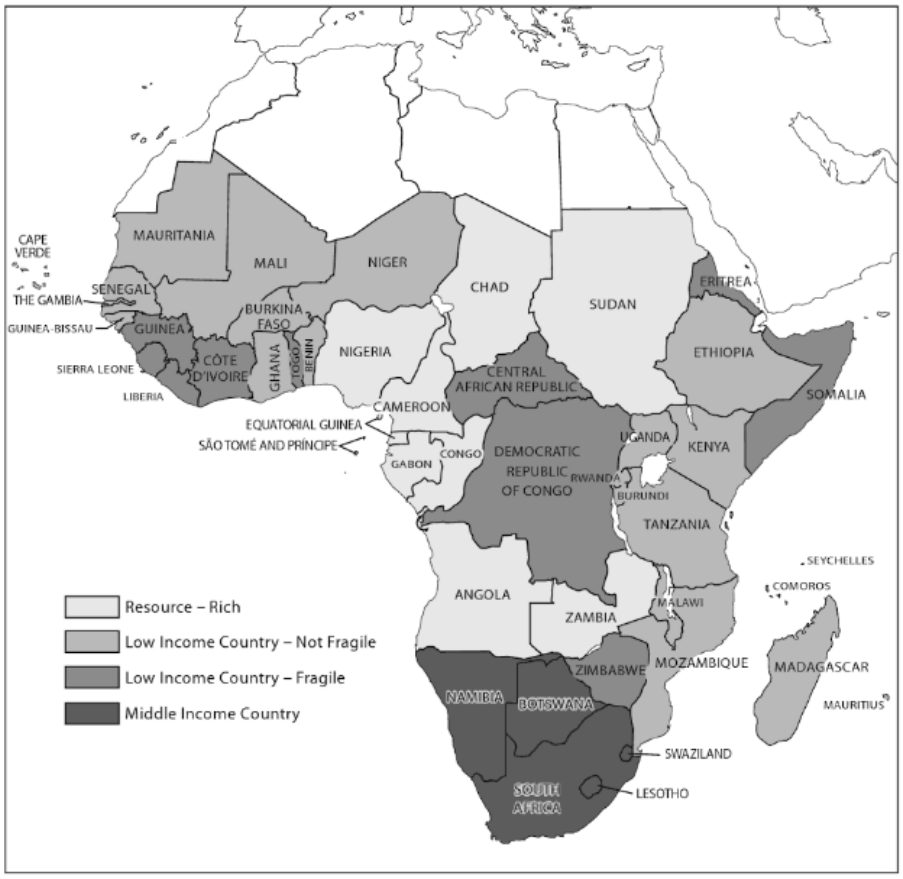

Figure 1.3 – Disparités entre les pays d'Afrique subsaharienne (Gwilliam, 2011)

- ***coûts de transport élevés***. En raison des mauvaises conditions des infrastructures de transport, les coûts de transport sont plus élevés en Afrique que dans d'autres régions[7].
- ***lourdeur de la réglementation douanière***. Malgré la suppression des barrières douanières au sein de certaines communautés régionales, dans d'autres régions, les obstacles réglementaires augmentent la pression sur les coûts de transaction et limitent les transactions transfrontalières de marchandises. Par ailleurs, certains pays souffrent

[7] http://unctad.org/en/Pages/statistics.aspx

d'une multiplication des barrières douanières physiques, avec une fréquence qui peut dépasser 1 tous les 14 kilomètres (par exemple, il y a 69 points de contrôle sur l'axe Lagos-Abidjan qui fait 987 km de long)[3].

- ***institutions et réglementation***. Les coûts administratifs sont plus élevés en Afrique que partout ailleurs (Banque mondiale, 2012).
- ***absence de stabilité interne***. Certains pays africains souffrent encore de la violence, créant des turbulences économiques, comme le Niger, le Soudan, la Somalie, le Mali et la Libye (Abodohoui et al., 2014).
- ***faiblesse de l'intégration intra régionale.*** La tension entre les pays africains a un impact profond sur les relations économiques entre les régions africaines. En effet, les échanges commerciaux à l'intérieur du continent ont représenté moins de 20% du commerce total de l'Afrique, loin derrière les 60 et 50% détenus par les commerces intra-européens et intra-asiatiques (Banque Africaine de Développement, 2010).

La localisation des hubs régionaux en Afrique devrait tenir compte des forces et des faiblesses de l'Afrique, en intégrant l'impact positif ou négatif des grandes disparités entre ses pays (figure 1.3). Dans ce contexte, les besoins du prestataire logistique à l'origine de cette étude sont détaillés dans la sous-section suivante.

2.4. Terrain d'étude : industrie de services logistiques (*Third Party Logistic* – 3PL)

Pour élaborer une approche de modélisation et de résolution du problème de localisation des hubs logistiques, nous avons mené une étude de terrain avec notre premier partenaire industriel, prestataire de services logistiques (3PL). Ce partenaire, basé à l'origine au Maroc, distribue tout type de biens, des téléphones portables aux voitures, principalement en Afrique de l'Ouest.

L'entreprise veut étendre son activité sur tout le continent avec une première vague d'investissements dans plusieurs hubs logistiques régionaux pour accompagner le développement de ses clients en Afrique. Le processus de prise de décision pour le choix de localisation des hubs logistiques étant jusqu'à présent plutôt empirique, l'entreprise souhaite définir un processus standard d'aide à la décision fournissant des évaluations numériques de critères de localisation clairement définis.

Néanmoins, les premières discussions ont montré qu'il peut être difficile de trouver des informations pertinentes et fiables. Par conséquent, les objectifs de l'étude sont définis comme suit :

1. sur la base d'une revue de la littérature, définir un cadre d'évaluation permettant de vérifier la cohérence et l'exhaustivité des critères de localisation. Ces derniers doivent traduire les contraintes de la localisation des hubs en Afrique ;
2. réutiliser, lorsque cela est possible, des critères d'évaluation provenant d'entités renommées comme la banque mondiale ou le forum économique mondial ;
3. compléter ces évaluations "externes" par des évaluations provenant des experts internes. Ce point pose plusieurs problèmes sensibles, le premier étant qu'une évaluation numérique précise des critères se révèle être une tâche difficile dans un continent contrasté comme l'Afrique. Une alternative consiste à permettre aux experts d'utiliser diverses méthodes d'évaluation : des nombres mais aussi des intervalles ou des appréciations linguistiques. Néanmoins, les premiers contacts avec les experts ont montré que leur expertise peut être entachée d'imprécision mais aussi d'incertitude, comprise ici comme la possibilité de se tromper, indépendamment de la précision de l'évaluation. En conséquence, la prise en compte de la confiance des experts est considérée comme obligatoire.

3. Personnalisation retardée : une réponse à la dynamique et à la diversité des marchés africains

3.1. Dynamique et diversité des marchés africains

Avec plus d'un milliard d'habitants, l'Afrique occupe la deuxième place dans le marché de la consommation mondiale. Au cours des dernières années, le potentiel de consommation en Afrique a en effet largement progressé, stimulé principalement par l'essor démographique des pays, l'émergence galopante d'une classe moyenne et la rapidité de l'urbanisation.

- ***Essor démographique.*** La population du continent devrait croître de 20 % au cours des huit prochaines années, dont 40 % sont des jeunes. La population urbaine devrait ainsi

passer de 43 % en 2020 à 47 % en 2030 (figure 1.4), ce qui représente un levier pour le développement des secteurs de première nécessité notamment l'agriculture, l'agro-alimentaire, l'énergétique, etc.

- ***Emergence d'une classe moyenne.*** L'explosion démographique africaine prévisionnelle favorisera, en outre, la croissance des classes moyennes et, par conséquent, une ascension de la consommation des ménages africains. Selon le *think tank* américain *Brookings Institution*, le potentiel de consommation devrait atteindre 2500 milliards de dollars en 2030 contre 1100 milliards en 2015.

- ***Rapidité de l'urbanisation***. La population africaine est de plus en plus groupée dans des zones urbaines, ce qui représentera un levier fondamental de l'activité économique. Selon McKinsey[6], 190 millions de personnes supplémentaires devraient vivre dans des zones urbaines d'ici 2025 en Afrique. Ceci signifie qu'environ 45 % de la population sera urbanisée d'ici là. Ainsi, cette urbanisation permettra non seulement de favoriser les régions enclavées, en les reliant avec les grandes villes, mais également de créer des marchés et des opportunités commerciales non négligeables. Par ailleurs, selon McKinsey[6], les dépenses de consommation par habitant dans les grandes villes d'Afrique sont en moyenne 79 % plus élevées au niveau des villes qu'au niveau national. A titre d'exemple, les taux de consommation par habitant dans les zones urbaines de Kenya sont plus du double des taux nationaux.

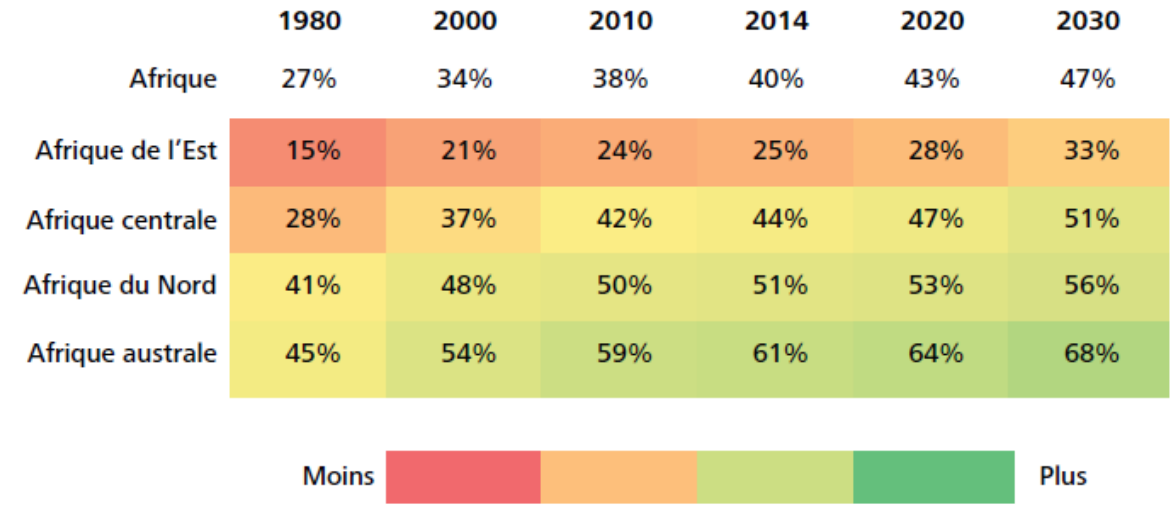

Figure 1.4 – Pourcentage de population africain dans la population mondiale (Deloitte, 2015)

Par ailleurs, en dépit du potentiel immense que constitue l'Afrique pour les investisseurs, ces derniers doivent prendre en compte la disparité des marchés africains. L'Afrique est un marché fortement diversifié et nuancé de 53 pays et de plus de 2000 dialectes, présentant des climats, styles de vie et habitudes de consommation différents. La granularité de cette diversité dépend de la catégorie des produits et/ou services ; elle peut être au niveau régional (les consommateurs du Nord ont des préférences et des besoins très différents de ceux des pays subsahariens), national (de pays en pays) ou au niveau d'un même pays. A titre d'exemple, on note qu'au Kenya, on ne consomme que du thé comme boisson chaude alors qu'en Ethiopie, on consomme plus de café.

Cette disparité des habitudes de consommation, des cultures et des langues engendre une forte segmentation du marché africain en de petits marchés niches avec des besoins très spécifiques. Par exemple, les produits de grande consommation (les aliments, les boissons et les articles ménagers) importés par les pays africains sont adaptés à la réglementation, à la norme alimentaire et aux langues de chaque pays. De même, la diversité des sols et des cultures agricoles mène à une grande diversification d'engrais destinés aux zones agricoles africaines, étant donné que les engrais doivent être adaptés à chaque couple (sol, culture agricole).

Par ailleurs, en industrie du textile, les préférences vestimentaires des africains commencent à suivre les tendances occidentales qui changent d'une année à une autre.

Ainsi, la personnalisation de l'offre des produits destinés aux marchés africains doit être adaptée à la diversité et à la dynamique de ces marchés.

3.2. Personnalisation retardée dans une chaîne logistique

Pour satisfaire les besoins spécifiques des clients en matière de produits personnalisés, les industriels se sont tournés vers la transformation de leur chaînes logistiques pour implémenter la personnalisation de masse à travers la différenciation (ou personnalisation) retardée. Il s'agit d'une stratégie ancienne, apparue au début des années 1990, permettant de se focaliser sur la demande-client et de bâtir une chaîne logistique agile par rapport aux variations des demandes (Walczak, 2014). Selon ce principe, l'entreprise doit retarder le plus possible l'exécution de certaines opérations de personnalisation du produit, par assemblage ou par conditionnement, en ne les déclenchant qu'à la réception des commandes fermes pour répondre aux besoins spécifiques des clients.

La mise en œuvre de cette stratégie dépendra, entre autres, du délai de livraison admissible des commandes. Si ce délai est court, les composants et les produits semi-finis doivent être élaborés, en anticipation, et stockés avant la réception des commandes.

En général, cette stratégie offre des avantages compétitifs aux industriels, notamment :

- réduction des délais de satisfaction des demandes ;
- réduction des coûts de production grâce à une production de masse en amont offrant des économies d'échelle ;
- réduction des coûts de stockage des produits finis grâce à la réduction des stocks de produits finis obsolètes ;
- augmentation de la flexibilité de l'entreprise en ayant la possibilité de s'adapter à de nouvelles tendances de consommation.

3.2.1. Stratégies de la personnalisation retardée : point de découplage

La personnalisation retardée peut être effectuée selon différentes stratégies. Celles-ci se distinguent par le positionnement du point de prise en compte de la commande du client, ou point de découplage, dans la chaîne de production, comme le montre la figure 1.5. En amont, la production s'effectue pour stock, suivant les prévisions de ventes, alors qu'en aval, la

production s'effectue à la commande selon les spécificités et préférences des clients, en combinant des composants à variantes.

- **Phase de conception du produit**. Durant cette phase le produit est conçu selon les spécificités du client. Cette stratégie est souvent déployée dans l'industrie de luxe où le client sera prêt à payer plus pour avoir un produit personnalisé et unique en fonction de ses préférences.

- **Phase d'approvisionnement**. A ce stade, l'approvisionnement de certains composants peut être retardé jusqu'à la réception des commandes des clients. L'approvisionnement sera effectué sur la base des préférences précises du client mais les processus de production restent génériques.

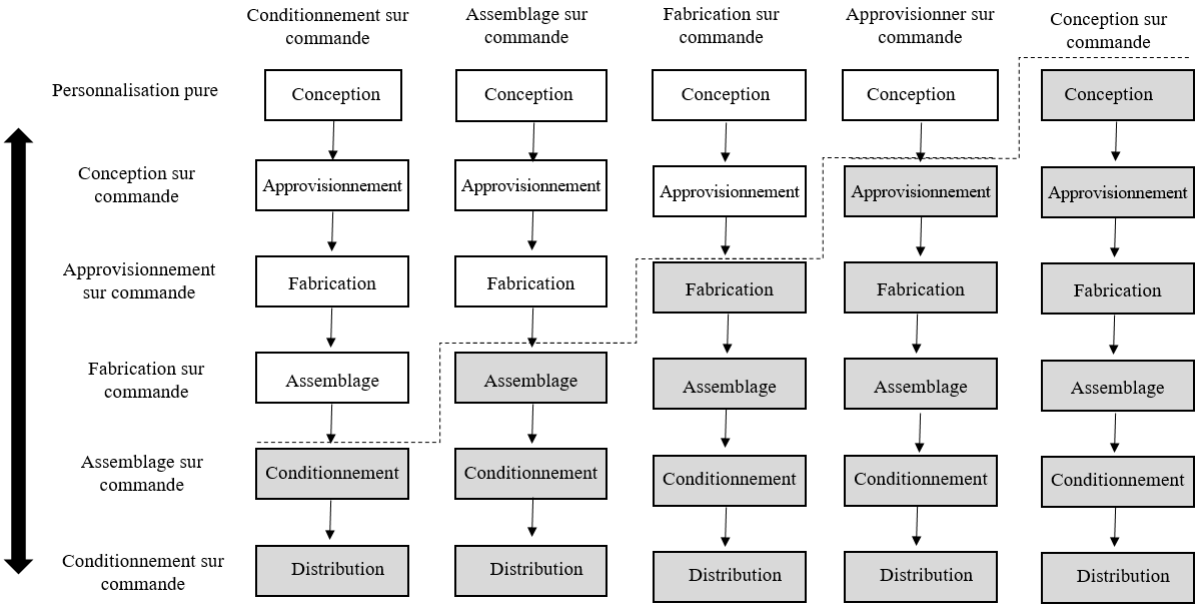

Figure 1.5 – Stratégies de personnalisation retardée dans une chaîne logistique (Yang and Burns, 2003)

- **Phase de fabrication.** Le produit final est élaboré à partir des stocks de produits semi-finis standards. La différenciation du produit porte sur un ou quelques processus de production finaux en particulier. A titre d'exemple, en industrie de la mode, le tissu est traditionnellement teint dans les usines de tissus qui se concentrent uniquement sur la filature, le tissage, la teinture, la sérigraphie et d'autres techniques de manipulation des tissus. De nombreux détaillants de mode reportent ces activités jusqu'à ce que les vêtements soient entièrement ou semi-construits dans leurs propres installations.

Cette stratégie est utilisée lorsque les options de couleurs sont importantes pour les clients dont la demande change fréquemment à mesure que les couleurs changent selon leur popularité et la saison. Zara et Benetton sont toutes deux des entreprises qui ont utilisé la stratégie de report de la teinture des tissus. Zara achète plus de la moitié de son tissu à l'état brut, non teint, afin de pouvoir l'utiliser plus tard pour de multiples produits. De son côté, Benetton a fait de même en ajoutant des machines de teinture dans ses installations de production.

- **Phase d'assemblage final du produit**. A cette étape, le produit final est assemblé à partir d'autres produits finis ou semi-finis selon les préférences du client, ce qui offre plus de flexibilité pour satisfaire une grande variété de demandes en un temps opportun. La société *Dell Computer Corporation* est un bon exemple de firmes qui ont instauré le report de l'assemblage final. Sur le marché des ordinateurs personnels (PC), les produits étaient historiquement fabriqués sur stock. Au lieu d'assembler un PC complet, un ordinateur Dell est assemblé exactement selon les besoins du client à partir de pièces détachées initialement fabriquées pour stock. Cette stratégie a permis à Dell de devenir plus flexible dans sa chaîne de valeur et d'être plus efficient et efficace (réduction des délais d'exécution, un PC pourrait être entièrement assemblé en un à deux jours).
- **Phase de conditionnement du produit**. A cette phase, l'emballage et l'étiquetage du produit final est personnalisé en fonction de la demande des clients pour des commandes personnalisées, des activités promotionnelles et des emballages saisonniers. A titre d'exemple, les produits de grande consommation peuvent être vendus en promotion pendant quelques périodes de l'année. Pour cela, la majorité des industriels sous-traitent la personnalisation des emballages et les étiquetages des nouveaux paquets de produits à des prestataires qui se chargent de leur stockage et de leur distribution. L'avantage économique de cette stratégie devient plus important quand il s'agit d'approvisionner des marchés lointains par voie maritime où les produits sont expédiés en vrac et/ou dans de gros emballages groupés, puis réemballés en petits lots adaptés et personnalisés aux commandes clients. C'est ce que fait l'entreprise Bic avec ses produits (stylos, rasoirs, etc.). Ainsi, la compagnie a bénéficié d'économies sur les coûts de transport et de transit au port, y compris les frais de douane.

3.2.2. Localisation de la personnalisation finale retardée dans une chaîne logistique

Le choix d'une stratégie de personnalisation dépend tout d'abord du type d'industrie, du degré de certitude des demandes et d'un arbitrage entre les coûts de production, de distribution et les coûts de stockages de produits finis. Par ailleurs, plus la diversité des produits et l'incertitude sur les demandes sont importantes, plus le point de découplage sera déplacé vers l'aval dans la chaîne de valeurs. Dans notre contexte, nous nous sommes intéressés à l'assemblage final des produits comme stratégie de personnalisation retardée.

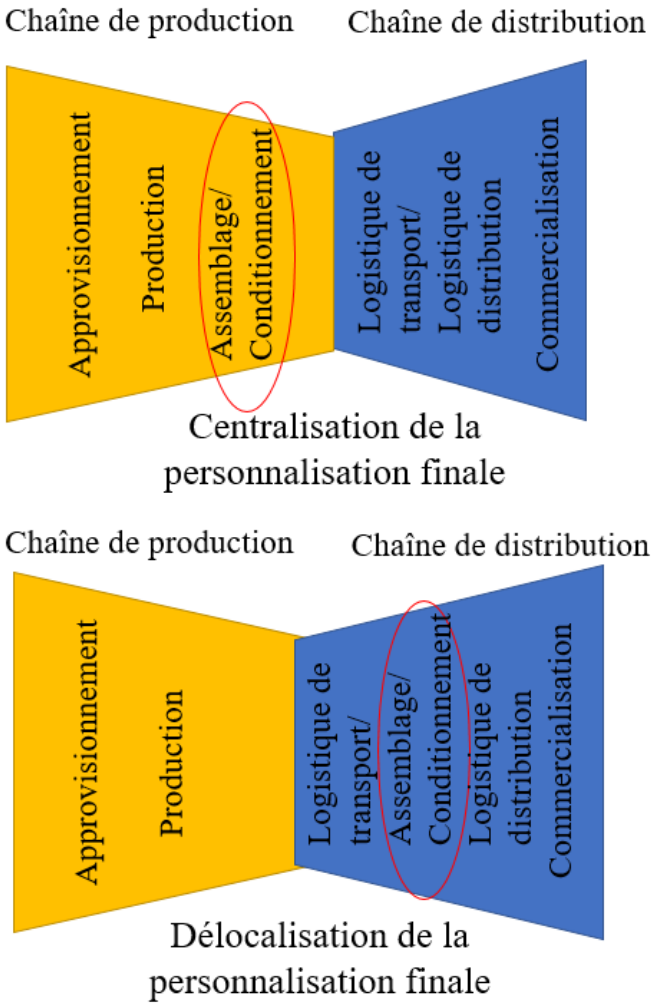

Figure 1.6 – Localisation de la personnalisation finale dans une chaîne logistique

Classiquement, l'assemblage final des produits prend place dans la chaîne de production (Lambert et al., 1998, Pin, 1993). Cependant, avec l'éloignement géographique des marchés

émergents, la volatilité de leurs préférences et de leurs tendances de consommation et l'incertitude sur les délais de transport international et la limite des capacités de transit aux ports africains, il devient difficile de maintenir un bon compromis réactivité-efficience. Ainsi, pour assurer une meilleure réactivité aux commandes de ces marchés tout en bénéficiant d'économies d'échelle, une idée émergente est de délocaliser la personnalisation finale au niveau de la chaîne de distribution, c'est-à-dire de personnaliser les produits le plus près possible des consommateurs (figure 1.6).

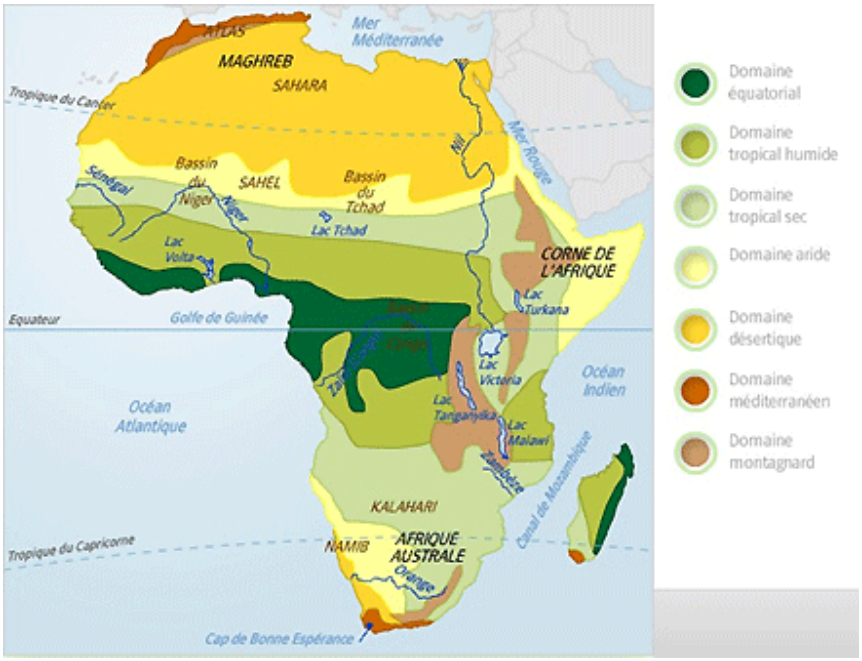

Figure 1.7 – Distribution des domaines climatiques en Afrique[8]

Cette stratégie a été adoptée avec succès par quelques industries ; citons entre autres l'industrie de l'électronique, l'industrie de la restauration rapide et l'industrie des engrais. L'entreprise HP a par exemple décidé de reporter les opérations de personnalisation finale (alimentation électrique, emballage et manuels) jusqu'aux centres de distribution locaux, en lieu de place de la personnalisation complète des imprimantes *DeskJet* à l'usine. Ainsi, l'entreprise ne fabrique, ne distribue et ne stocke (dans les centres de distribution locaux) qu'un seul type d'imprimante DeskJet. Les coûts totaux de fabrication, d'expédition et de stockage ont ainsi été réduits de 25% (Feitzinger and Lee, 1997).

[8] http://laboussole.over-blog.net/article-domaines-climatiques-et-vegetation-en-afrique-42237251.html

Par ailleurs, les menus de McDonald sont personnalisés pour le consommateur au niveau des restaurants locaux. Les composants de ces menus (frittes, viandes, poissons, légumes) sont approvisionnés auprès des fournisseurs internationaux puis distribués vers les centres de distribution nationaux. De là, les composants frais et congelés sont regroupés et livrés aux restaurants en moyenne 2,5 fois par semaine. Le report de l'assemblage final des produits a permis d'offrir la diversité voulue aux clients, d'augmenter les ventes et de diminuer le taux de rebut.

Le report de la personnalisation finale dans la chaîne de distribution peut être appliqué avec succès lorsqu'il est vital d'avoir des stocks de produits personnalisés proches des clients, dans la mesure où aucune capacité de fabrication spécialisée n'exige que les opérations soient effectuées de manière centralisée. La délocalisation du *blending* d'engrais représente un très bon cas d'application de cette stratégie, comme discuté dans la partie suivante. Dans ce cas particulier, le report de la personnalisation (blending) d'engrais se justifie par la nécessité d'offrir aux fermiers des engrais adaptés à leur sols et à leur cultures agricoles, en bonne qualité et à moindre coût pendant les compagnes agricoles.

3.3. Terrain d'étude : *Blending* et distribution d'engrais en Afrique

3.3.1. Caractéristiques du marché d'engrais en Afrique

Le continent africain dispose d'un énorme potentiel agricole. Il contient, à lui seul, 60 % du potentiel de terres arables dans le monde. La fertilité des terres arables africaines et les conditions climatiques en Afrique pourraient suffire à subvenir aux besoins alimentaires de ses populations et même en faire l'une des grandes puissances agricoles mondiales. De plus, l'Afrique possède une grande variété de zones agro écologiques (figure 1.7), de denrées et de produits agricoles qui sont susceptibles d'être produits et commercialisés sur les marchés[9]. Cette disparité des conditions et du potentiel agricoles est remarquée également à l'échelle locale (un pays). Prenons l'exemple de la Côte d'Ivoire où la production agricole est très diversifiée[10]. Les cultures effectuées dans les régions Nord diffèrent de celles des régions du

[9] https://www.afdb.org/fr/topics-and-sectors/sectors/agriculture-agro-industries/african-agriculture/

[10] Ainsi pour l'année 2017, l'agriculture en Côte d'Ivoire participera pour 20 % au PIB, en employant environ la moitié de la population. Ce secteur est tourné vers les cultures de rente qui ont été un des moteurs du

Sud (par exemple, le riz est cultivé uniquement dans le sud du pays tandis que le coton est cultivé uniquement dans le nord). De plus, le climat ivoirien est marqué par la transition nord-sud, allant d'une zone semi-aride à la côte équatoriale humide.

Ainsi, pour assoir une agriculture durable, il sera nécessaire d'appliquer une référence d'engrais adaptée à chaque culture agricole dans chaque zone agro écologique, en quantité suffisante. Le taux d'application effectif d'engrais est actuellement très faible par rapport à ce qui est recommandé, comme le montre la figure 1.8, et, selon notre partenaire industriel, la plupart des fermiers n'appliquent pas les références d'engrais adaptées à leur sol.

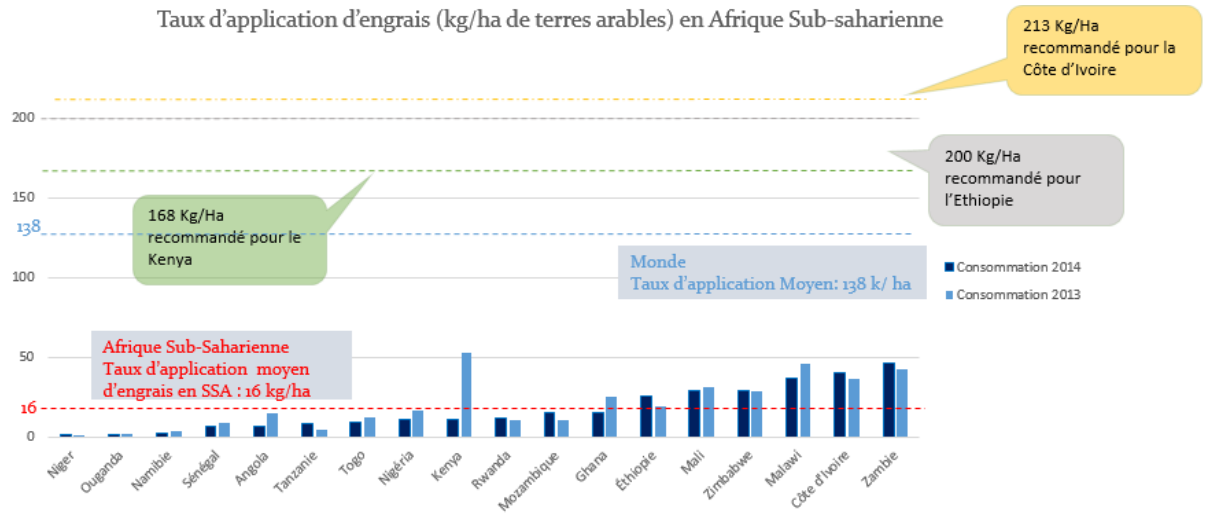

Figure 1.8 – Taux d'application d'engrais pour la culture de maïs (source : statistiques de la Banque Mondiale en 2014[11])

De nombreux pays africains sont en proie à une instabilité alimentaire chronique, n'exportent pratiquement que des produits non transformés et importent tous leurs besoins alimentaires. Une étude menée en 2009 par des scientifiques de l'Université de Stanford[12] montrait déjà que

développement économique du pays. Les cultures agricoles destinées à l'exportation représentent 40 % de la production. Ainsi, la Côte d'Ivoire est le premier producteur mondial de cacao avec 35 % des parts de marché. Elle tire aussi des bénéfices du palmier à huile, de la culture du coton ou de la production de noix de cajou dont elle est le premier producteur mondial. La Côte d'Ivoire s'est aussi lancée dans la production intensive de maïs et de soja dont les productions sont destinées à l'alimentation animale. Le pays doit en effet importer une grande partie des produits animaux, car sa production ne couvre pas la demande intérieure.

[11] https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/AG.CON.FERT.ZS?view=chart

[12] Study highlights massive imbalances in global fertilizer use. Retrieved from http://news.stanford.edu/news/2009/june24/massive-imbalances-in-global-fertilizer-use-062209.html.

la sous-utilisation des engrais par les agriculteurs d'Afrique subsaharienne était un obstacle majeur à l'amélioration de la qualité des sols et à l'augmentation de la production alimentaire.

Le principal frein qui entrave la consommation effective des engrais est leur prix, qui est deux fois plus élevée qu'ailleurs. De plus, comme le montre la figure 1.9, le coût logistique de distribution représente une part importante dans le prix final d'engrais, après le coût de production d'engrais. Une étude[13] de 2015 confirme que le potentiel de développement du secteur agricole ivoirien pourrait être accru si des démarches d'amélioration étaient notamment menées au niveau de la distribution des engrais.

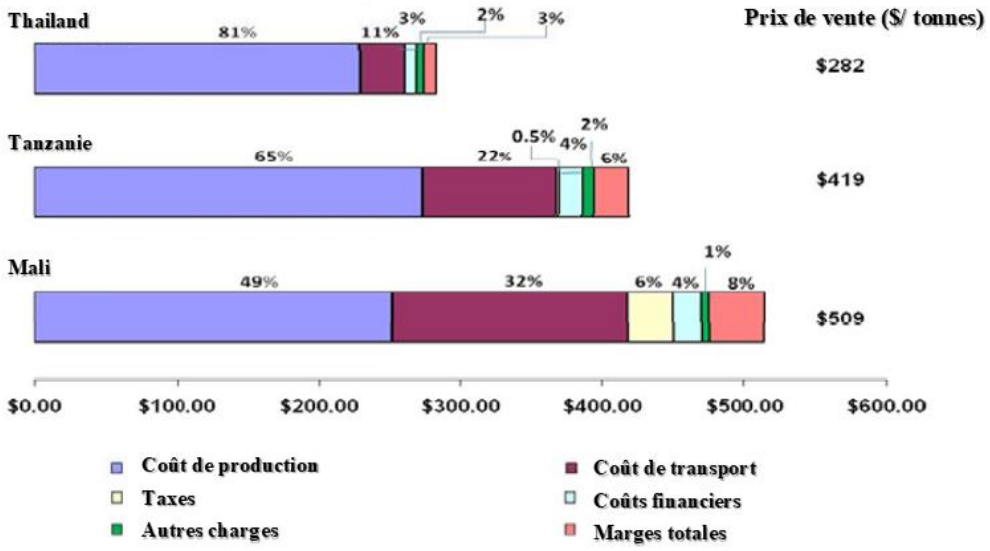

Figure 1.9 – Analyse comparative du prix d'engrais par tonnes (Wanzala et Groot, 2013)

Ainsi, le marché des engrais n'a pas encore atteint sa maturité et il présente un réel potentiel de développement. Ceci est confirmé par les programmes mis en place pour le développement du secteur agricole comme l'initiative pour l'Adaptation de l'Agriculture Africaine (AAA)[14], lancée en marge de la COP22, qui a pour objectif de réduire la vulnérabilité de l'Afrique et de son agriculture aux changements climatiques. Elle promeut et favorise la mise en place de projets concrets pour améliorer la gestion des sols, la maîtrise de l'eau agricole, la gestion des risques climatiques et les capacités et solutions de financement.

[13] Etude sur la consommation d'engrais par culture en Côte d'Ivoire », Rapport de Africa Fertlizer (08/2015).
[14] http://www.agriculture.gov.ma/pages/focus/initiative-pour-l%E2%80%99adaptation-de-l%E2%80%99agriculture-africaine-aaa-aux-changements-climatiques

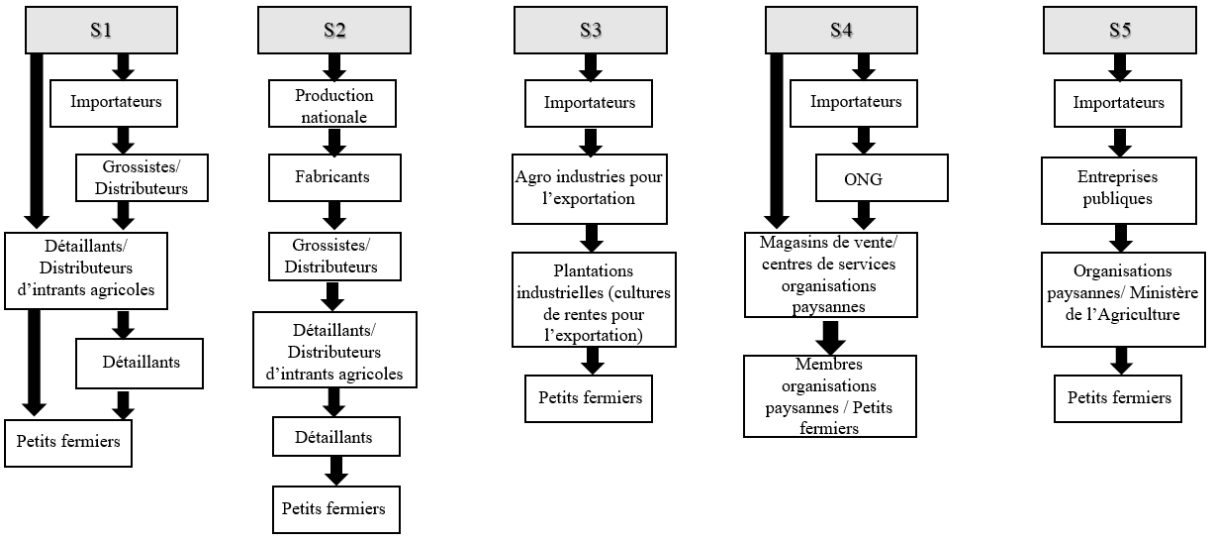

Figure 1.10 – Chaînes de distribution d'engrais en Afrique

3.3.2. Contraintes de distribution d'engrais en Afrique

En général, la distribution d'engrais en Afrique est assurée un canal de distribution privé « S1, S2, S3 » ou public (S4, S5) (figure 1.10). Ce dernier est géré par les entreprises publiques et les Organisations Non Gouvernementales (ONG). Dans « S5 », les sociétés publiques achètent les engrais soit directement auprès des fournisseurs étrangers, soit auprès d'importateurs locaux par appels d'offre. Ensuite, les engrais sont distribués par l'intermédiaire de leurs distributeurs à des prix subventionnés ou à crédit. Le secteur privé n'intervient pas dans la distribution des engrais achetés par le Gouvernement. De même, dans « S4 », les ONG s'approvisionnent les engrais auprès des importateurs locaux pour les distribuer aux agriculteurs qui sont ciblés par leur programme d'amélioration de la sécurité alimentaire, à des prix subventionnés.

Le canal de distribution privé est géré par le secteur privé et regroupe trois types de chaînes logistiques : 1) les chaînes de type « S3 » sont gérées par les industriels opérant dans l'exportation des cultures de rentes (thé, café, sucre, coton, etc.). Ces entreprises achètent des engrais soit directement auprès des fournisseurs étrangers soit auprès d'importateurs locaux pour leurs petits planteurs sous contrat. Ils fournissent les engrais à crédit et déduisent leurs prix et d'autres services lors de la récolte. 2) Les chaînes de type « S2 » sont très intégrées, avec une production locale et une distribution via des réseaux de grossistes et/ou de distributeurs et de détaillants bien développés.

Toutefois, ces chaînes n'existent qu'en Afrique du nord et en Afrique du sud. 3) Les chaînes de type « S1 » sont les plus prépondérantes dans les pays qui ont libéralisé leur marché d'engrais. Elles font intervenir plusieurs acteurs : les importateurs achètent des engrais auprès de fournisseurs étrangers et les vendent principalement à des grossistes et/ou à des distributeurs mais parfois aussi directement aux détaillants et/ou aux négociants agricoles. Des détaillants et/ou des négociants agricoles vendent également des engrais directement aux petits fermiers ou les vendent à des revendeurs qui les revendent alors aux petits agriculteurs. Toutefois, ces chaînes d'approvisionnement sont généralement fragiles en raison de contraintes de distribution d'engrais au niveau de chaque maille de la chaîne.

La première contrainte est rencontrée au niveau du transit au port. La majorité des ports africains disposent d'une faible capacité d'accueil et d'un faible débit de déchargement (de l'ordre de 2000 MT/jour au Nigéria) ce qui conduit à une congestion. Par conséquent, les navires peuvent rester en zone d'attente plusieurs jours. Ensuite, les engrais sont transportés depuis le port vers les distributeurs par camions, car la majorité des pays africains ne dispose pas de réseau de transport ferroviaire efficace. Il est même inexistant dans certains pays. De plus, les routes sont mal entretenues, ce qui fait augmenter le coût de transport routier et augmente le temps de transport.

Par ailleurs, chaque acteur de la chaîne cherche à réduire localement (au niveau individuel) ses charges. Par conséquent, il investit faiblement en capacité de stockage, qui nécessite un coût investissement et d'exploitation considérable. De plus, le manque d'espaces de stockage suffisants engendre une congestion de flux d'approvisionnement pendant les campagnes agricoles. Ceci génère donc un pic important de demande de transport, augmente le risque de retard de livraison aux fermiers et accroît les stocks d'engrais non vendus en aval de la chaîne de distribution (au niveau des détaillants). In fine, ces contraintes de distribution génèrent un surcoût de transport qui se rajoute au coût des engrais à la sortie du port : plus on descend dans la chaîne plus le coût livré aux fermiers augmente et plus l'efficacité de distribution s'affaiblit.

3.3.3. Contraintes du Blending d'engrais en Afrique

Le *blending* d'engrais est un processus de personnalisation physique des engrais. Des engrais complexes, produits chimiquement, sont mélangés avec d'autres nutriments selon une

nomenclature spécifique pour former un nouvel engrais spécifique, adapté à une composition du sol et à une culture agricole données. Chaque engrais complexe forme une graine homogène de nutriments liée à une référence d'engrais, par exemple une graine d'engrais NPK 15-15-15 comprend 15% du nitrate, 15% du potassium et 15% de calcium. Après le *blending*, les graines d'engrais sont dissociées en graines de nutriments et chaque sac d'engrais constitue une référence d'engrais spécifique (figure 1.11). Par exemple NPK-S 20-10-40-18 est formé de 20% de nitrate, 10 % de potassium, 40% de calcium et 18% du soufre. Donc chaque graine d'un sac d'engrais complexe forme une référence d'engrais alors qu'une graine d'un sac d'engrais *blendé* ne contient qu'un nutriment.

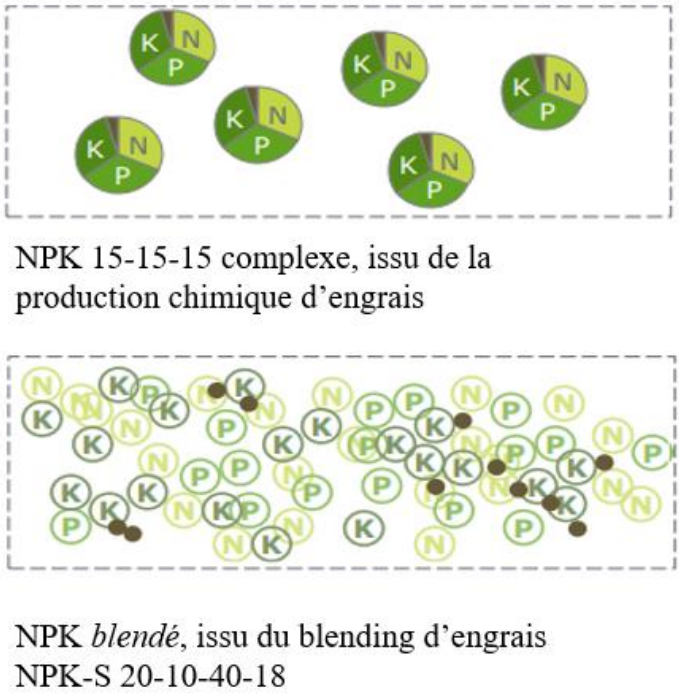

Figure 1.11 – Exemple de la structure d'un engrais complexe et blendé

Cette pratique est adoptée par les principaux distributeurs présents sur le continent. Elle leur a permis de satisfaire efficacement et de manière efficiente les besoins des fermiers. Cependant, si le *blending* d'engrais s'effectue loin des marchés, les engrais peuvent subir une ségrégation (séparation des graines de nutriments, les plus denses tombant en bas du sac et les moins denses en haut du sac), pendant la distribution d'engrais personnalisés. Cette ségrégation peut être provoquée par le transport en camion sur de mauvaises routes, et doit être prise en considération dans le choix de localisation du *blending*.

3.3.4. Besoins de notre deuxième partenaire industriel

Pour modéliser le problème de conception de réseaux de distribution et de personnalisation en Afrique, nous nous sommes basés sur le cas de la distribution et du *blending* d'engrais en Afrique. Cette étude de terrain a été réalisée avec notre deuxième partenaire industriel. Il ambitionne d'augmenter la compétitivité de l'agriculture africaine tout en la dirigeant vers une agriculture plus durable. Cette ambition se traduit en particulier par la volonté de décupler le marché d'engrais en Afrique à moyen-long terme.

Etant donnée la diversité de l'agriculture africaine, le maintien de bon rendements agricoles et de la fertilité des sols nécessite des engrais plus personnalisés et adaptés à des besoins spécifiques. Actuellement, notre partenaire n'opère qu'en amont des réseaux de distribution d'engrais, en tant que fournisseur d'engrais de base (intrants du *blending*). Conscient que cette position ne lui permettra pas, à terme, d'approcher efficacement les exigences des marchés et d'obtenir des avancées concurrentielles, il a investi dans le développement stratégique de nouvelles plateformes de distribution et de *blending* d'engrais, près des marchés de consommation. Son objectif est donc de compléter, à terme, son portefeuille d'engrais standards par des engrais spécifiques. Parallèlement, un défi majeur est de baisser le prix de vente aux fermiers afin d'améliorer la situation des agriculteurs africains en termes d'utilisation d'engrais.

Penser la stratégie de localisation et de dimensionnement de ces plateformes revient à analyser les différents facteurs qui peuvent entraver ou au contraire favoriser le bon fonctionnement opérationnel de réseaux de distribution. Une plateforme de *blending* nécessitera d'approvisionner des flux de composants en vrac depuis des fournisseurs locaux et/ou internationaux. Ainsi, la localisation du *blending* influencera l'organisation logistique (transport et stockage) qui deviendra plus compliquée et onéreuse si le *blending* est réalisé près des zones agricoles.

Tenant compte de ces spécificités et des contraintes de distribution et de *blending* d'engrais en Afrique (§3.3.2 et §3.3.3), la stratégie de localisation des plateformes de *blending* se confronte avec la nécessité de garantir la disponibilité des engrais près des fermiers, pendant les campagnes agricoles saisonnières, avec la qualité adéquate, en quantité suffisante et à un prix raisonnable. De plus, cette stratégie doit être efficiente, permettant de profiter le mieux possible des économies d'échelle dues à la consolidation des flux lors du stockage et du transport.

Deux contraintes antagonistes sont ainsi mises en jeu. D'une part, les économies d'échelle liées à la consolidation des flux amont et à la forte diversité des composants (intrants pour la personnalisation) poussent à localiser le *blending* en amont de la chaîne. D'autre part, la mauvaise qualité de l'infrastructure (allongement du temps de transport occasionnant une baisse de la qualité du produit, dû à la ségrégation des engrais) et la nécessité d'être très réactif par rapport aux demandes des fermiers (réduction des délais de réponses) tendent à repousser le *blending* vers l'aval. Par conséquent, les questions phares auxquelles nous souhaitons apporter un éclairage décisionnel sont les suivantes :

- A quel endroit doit-on localiser les installations permettant de mettre en place un mécanisme de différenciation retardée ?
- Comment définir la chaine amont et aval, en dimensionnant les capacités de stockage et de transport à chaque échelon ?
- Comment adapter le développement de plateformes de distribution et de *blending* d'engrais avec la dynamique et à la diversité des marchés ?
- Faut-il investir dans des plateformes de *blending* et stockage et/ou les louer (temporairement) ?
- Comment assurer la disponibilité et la proximité des produits aux fermiers en évitant toute ségrégation d'engrais tout en maintenant les économies d'échelle ?

4. Conclusion du chapitre 1

Ce chapitre a présenté une contextualisation industrielle des problèmes traités dans notre thèse. Ainsi, nous avons clairement expliqué les enjeux et les contraintes relatifs à chacun des deux axes de recherche :

Le premier axe de recherche concerne l'élaboration d'une approche de localisation des hubs logistiques régionaux. Celle-ci devra prendre en compte les contraintes entravant leur bon fonctionnement en Afrique. Cette approche sera donc basée sur la satisfaction de plusieurs critères dénotant l'attractivité d'un pays et d'un écosystème logistique, dans lesquels le futur hub sera implanté. Enfin, l'approche doit permettre de prendre en compte l'imprécision qui entache le jugement des experts partenaires. Le deuxième axe de recherche se focalise sur la modélisation du problème de conception de réseau de distribution et de personnalisation en tenant compte de la dynamique et de la diversité des marchés africains. La modélisation doit incorporer les contraintes de distribution et de personnalisation des produits en Afrique. Ainsi, les besoins de chacun de nos partenaires industriels ont été explicités, ce qui aidera à positionner les problèmes à résoudre dans la littérature scientifique. Dans le chapitre suivant, nous proposerons une analyse de la littérature scientifique relative à notre problématique de recherche.

Chapitre 2

Etat de l’art et positionnement du travail de la recherche

1. Introduction du chapitre 2

Après avoir contextualisé notre problématique de recherche, dans ce deuxième chapitre nous allons analyser la littérature récente traitant des deux problèmes associés à notre problématique. Tout d'abord, nous allons présenter quelques concepts associés à la conception d'un réseau logistique (§2) avant de passer en revue le problème de choix de localisation des hubs logistiques régionaux (§3) et celui de la conception de réseaux logistiques (§4) dans un contexte de différenciation retardée (§4).

2. Généralités sur la conception d'un réseau de chaînes logistiques

Depuis plus de 25 ans, la problématique de la conception d'un réseau de chaînes logistiques (« *Supply Chain Network Design* ») a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques traitant de différentes extensions du problème de base (Govindan et al., 2017 ; O'Kelly et Miller, 1994). Pour bien mener notre revue de littérature, nous allons, dans un premier temps, analyser les spécificités et les composants d'un réseau de chaînes logistiques avant de décrire le problème de conception dans sa version générale (§2) et d'en faire un rapprochement détaillé par rapport à notre problématique (§3 ; §4 et §5).

2.1. Réseau de chaînes logistiques

Avec la multiplicité des échanges entre des acteurs de différentes chaînes logistiques, les frontières logiques entre ces chaînes deviennent floues et difficiles à reconnaître puisqu'un même producteur peut servir plusieurs distributeurs et un même distributeur peut s'approvisionner auprès de plusieurs producteurs. Partant de là, un nouveau concept est né, celui du réseau de chaînes logistiques. Il représente un maillage de plusieurs chaînes logistiques (Burgess et al., 2006) dans lequel les matières premières sont converties en produits finis puis distribuées vers les clients finaux ou vers d'autres acteurs (industriels, distributeurs, fournisseurs) (Ghiani et al., 2004 ; Simchi-Levi et al., 2004).

Pour des raisons de simplification, dans la suite de cette thèse, nous sous-entendons par réseau logistique un réseau de chaînes logistiques.

2.2. Caractéristiques et taxonomie d'un réseau logistique

Après avoir analysé la littérature sur les dimensions physiques et organisationnelles d'un réseau logistique (Govindan et al., 2017 ; Sarraj, 2013), nous concluons qu'un réseau peut être caractérisé par sa vocation, sa topologie, le type des plateformes qui le composent, la modalité de transport, le type et le mode de conditionnement des flux.

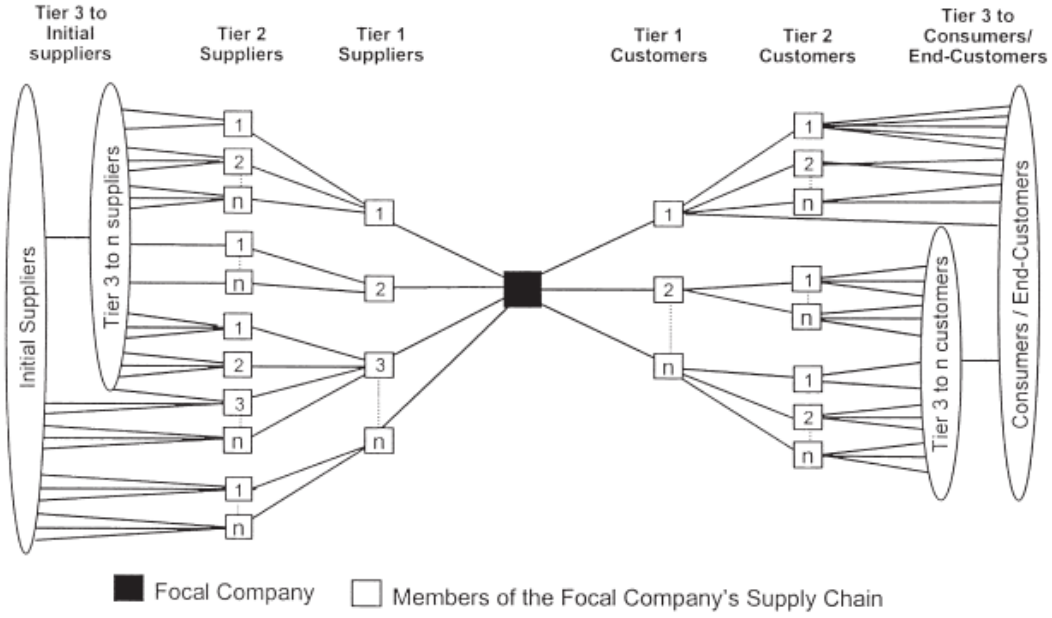

Figure 2.1 – Structure d'un réseau de chaînes de production-distribution (Lambert et al., 1998)

Vocation du réseau. Classiquement, les chaînes (d'un réseau) sont organisées autour des activités de production et de distribution (Lambert et al., 1998), comme le montre la figure 2.1, ou seulement autour des activités de distribution comme dans le cas de la distribution des colis, par exemple. Cependant, les consommateurs distants sont devenus exigeants en termes de diversité des produits, de délais et de niveau de service. La personnalisation des produits ou la maintenance des produits (flux de retour) peuvent être, dans certaines industries, effectuées près des marchés locaux. Le réseau aura alors pour vocation de réaliser la distribution et la post-production (i.e. des activités à forte valeur ajoutée effectuées après la phase de production, qui peuvent être des opérations de personnalisation).

Topologie du réseau logistique. Chaque réseau logistique se caractérise par une topologie hiérarchique dont le nombre de niveaux, entre un premier émetteur et un dernier récepteur, peut varier en fonction de chaque chaîne du réseau (un ou plusieurs niveaux). La topologie d'un réseau se caractérise également par le type des échanges entre les plateformes du réseau, qui

peuvent être réversibles ou bilatéraux (comme dans le cas de la logistique inverse) ou irréversibles, si l'échange s'effectue selon un unique sens.

Type de plateformes. Un réseau, selon sa vocation, comportera des usines de production, des plateformes de distribution logistiques ou des plateformes de distribution au niveau desquelles s'effectuent des prestations industrielles (réparation, maintenance, recyclage, assemblage etc..).

Type et mode de conditionnement des flux. Ces plateformes peuvent échanger, selon la vocation du réseau, des composants ou des matières premières, des produits finis ou semi-finis. Ces flux peuvent être conditionnés en vrac solide, comme les engrais, ou liquide, comme le pétrole, ou dans des unités discrètes, comme les sacs d'engrais, les voitures, les bouteilles d'eau.

Modalité de transport. A l'hétérogénéité des modes de conditionnement s'ajoute celle de leur transport. Nous distinguons le transport routier, ferroviaire et maritime. Les ressources de transport peuvent être équipées pour transporter les flux en vrac ou en conteneurs. Il est évident que l'organisation du transport en vrac sera en général difficile et coûteuse en raison de la difficulté à gérer une diversité croissante de flux de marchandises conditionnés en vrac (comme par exemple les engrais).

2.3. Cartographie décisionnelle de la conception d'un réseau logistique

Selon les orientations du développement commercial des entreprises et les conditions des marchés, les décideurs peuvent avoir besoin soit de concevoir un nouveau réseau afin d'explorer de nouveaux marchés géographiques soit de restructurer un réseau existant pour l'aligner avec les nouvelles stratégies de développement industriel et avec l'évolution des conditions de distribution et des marchés, en vue d'exploiter tous les avantages et les synergies possibles au niveau du réseau (Cortinhal et al., 2015). La reconfiguration d'un réseau logistique peut impliquer la conception d'une nouvelle partie du réseau et l'intégration de nouvelles activités.

En général, la conception d'un réseau logistique est un problème de planification stratégique-tactique qui a un impact significatif sur les performances opérationnelles du réseau à terme. Selon (Ballou, 2001) et (Harrison, 2005), la reconfiguration d'un réseau logistique permet de générer de 10 % à 15% d'économie sur le coût logistique global.

Les décisions stratégiques concernent la détermination du nombre et la localisation optimale des plateformes logistiques et/ou industrielles (par exemple : usines de production, ateliers d'assemblage) à ouvrir ou à fermer, le dimensionnement optimal de leur capacités (production

et/ou stockage), le choix technologique des installations, ainsi que le choix des opportunités d'approvisionnement et de sous-traitance (production et/ou stockage). Les décisions tactiques concernent pour leur part l'allocation des flux (matières premières et produits finis) tout au long du réseau, de sorte que les demandes des clients soient satisfaites dans les conditions de diversité, de délais, de qualité et de coûts objectifs contractés. Il s'agit donc de déterminer l'allocation des demandes et des commandes d'autres plateformes aux plateformes logistiques et/ou de production, de choisir les modes de transport et les politiques de contrôle de stocks.

La planification d'un réseau logistique peut être sujette à de nombreuses influences externes qui peuvent altérer son bon fonctionnement à terme. Elle dépend de la région ou pays concerné. Citons entres autres :

- Les politiques gouvernementales du pays dans lesquels les plateformes doivent être situées ;
- Le climat des affaires ;
- La disponibilité de ressources humaines qualifiées ;
- Les politiques fiscales, incitations et subventions ;
- La situation des infrastructures.

Il est évident que, dans le contexte africain, sujet de notre thèse, ces facteurs pèsent lourdement sur les politiques de développement dans une région donnée. C'est pourquoi le choix de la localisation des écosystèmes ou des hubs logistiques régionaux est d'une extrême importance et doit être effectué avant la conception du réseau logistique.

Comme explicité dans le chapitre 1, ces hubs régionaux (par exemple implantés dans les zones franches des ports ou aéroports) sont considérés comme la porte d'entrée vers les marchés d'une région continentale desservant différents pays. Ils permettent de consolider les flux de matières provenant de différentes origines et de les acheminer vers leur destinations respectives en utilisant des transports uni modaux (c'est-à-dire avec un seul type de ressources de transport) ou multimodaux (c'est-à-dire avec plusieurs types de transport) (Campbell et O'Kelly, 2012 ; Farahani et al., 2013). Le choix approprié de l'emplacement de ces hubs devra améliorer le niveau de service aux marchés et la satisfaction des clients, augmentant ainsi l'avantage concurrentiel des acteurs du réseau. Une décision de localisation a donc un impact significatif sur les performances du réseau et devra prendre en compte les divers facteurs qui peuvent nuire

à son bon fonctionnement ou au contraire le favoriser. Par conséquent, la prise de décision se basera sur une approche d'analyse multicritères (*Multi Criteria Decision Method* « *MCDM* ») qui est une approche permettant de classer et de sélectionner la meilleure solution parmi un ensemble de solutions de réalisables (Dey et al., 2015). La revue de littérature de ce problème sera abordée en détail dans la section suivante (§2).

3. Revue de littérature sur la sélection des hubs logistiques

La localisation des hubs logistiques est un cas particulier de celui plus général de la localisation des plateformes (« *Facility location problem* »), appliqué dans le domaine du transport et de la distribution. Ce problème a fait l'objet de nombreuses études dans différents domaines ; citons à titre d'exemple la localisation des plateformes logistiques, la localisation des gares ferroviaires afin de minimiser l'imprévisibilité des horaires de livraison la localisation des guichets automatiques pour mieux servir les clients des banques etc. (Farahani et Hekmatfar, 2009 ; Owen et Daskin, 1998). Il consiste à déterminer la localisation appropriée d'une plateforme dans une zone considérée, en tenant compte des préférences du décideur et des contraintes existantes (Farahani et al., 2010 ; Farahani and Hekmatfar, 2009 ; Żak and Węgliński, 2014).

De nombreuses études antérieures ne prennent en compte qu'une fonction objectif quantitative et résolvent le modèle à l'aide de la programmation mathématique (Klose et Drexl, 2005). Des revues approfondies sur ce domaine sont par exemple présentées dans (Alumur et Kara, 2008 ; Farahani et al., 2013). Elles montrent que les modèles de localisation basés sur des critères quantitatifs comme la minimisation des coûts, la maximisation des profits ou la qualité de service, ignorent souvent des critères qui ne peuvent être évalués que qualitativement, tels que la stabilité du pays, le climat des affaires, la qualité des infrastructures, etc. (Long et Grasman, 2012). Afin d'obtenir une vision holistique de l'évaluation des localisations candidates, (Murthy et Mohle (2001) affirment que le jugement doit être basé sur les critères de performance quantitatifs et qualitatifs et suggèrent de recourir à des méthodes analytiques de décision multicritères (Long et Grasman, 2012 ; Zavadskas et Turskis, 2011). Une revue de littérature de ces méthodes sera présentée dans le chapitre 3.

Dans cette section, nous nous intéresserons à l'analyse des caractéristiques du problème de localisation des hubs logistiques dans le cadre d'une analyse multicritères. Pour ce faire, nous avons collecté les articles fréquemment cités dans cette littérature.

En ce qui concerne les articles sur la localisation des hubs régionaux, l'accent est surtout mis sur la sélection des écosystèmes portuaires plutôt qu'aéroportuaires. Cette liste d'articles a été complétée par d'autres suggérant uniquement des critères de sélection des localisations d'investissement en général et des hubs logistiques en particulier. Ces articles ont été choisis au moyen de mots-clés tels que : *hub location selection criteria, hub location decision, locational determinant, location criteria evaluation*.

Le tableau 2.1 présente une grille d'analyse des articles par rapport au type de hub, à la précision des évaluations et à la séquence de décision, tandis que le tableau 2.2 s'intéresse à la revue des critères souvent utilisées (au moins deux fois).

3.1. Contexte géographique et type des hubs

Comme explicité auparavant, nous nous intéressons à la sélection des hubs logistiques régionaux en Afrique. Or, il existe peu de travaux qui présentent une application numérique réelle ou réaliste, surtout ciblant l'Afrique (El-Nakib, 2010 ; Ugboma et al., 2006 ; van Dyck and Ismael, 2015). Les hubs à localiser se distinguent en fonction de l'étendue géographique de leur zone de chalandise. Nous avons identifié une littérature abondante sur la localisation des hubs logistiques régionaux (Chen et al., 2017 ; Dey et al., 2015 ; El-Nakib, 2010 ; Eskilsson and Hansson, 2010 ; Lee et al., 2009 ; Lirn et al., 2003 ; Peker et al., 2016 ; Roso et al., 2015 ; Shiau et al., 2011 ; Ugboma et al., 2006 ; van Dyck and Ismael, 2015 ; Yang and Chen, 2016). D'autres articles s'intéressent à la localisation des hubs sous régionaux (Kayikci, 2010 ; Portugal et al., 2011 ; Uysal et Yavuz, 2014 ; Wang et Liu, 2007). Ces derniers sont des plateformes logistiques bimodales/uni-modales qui se chargent de consolider les flux provenant d'un hub logistique régional et les distribuent au niveau national en utilisant des moyens de transport sur longue distance. On trouve également des travaux sur la localisation des centres de distribution urbains (Awasthi et al., 2011 ; Elevli, 2014 ; Yu et al., 2011 ; Żak et Węgliński, 2014). Ces centres sont généralement situés à proximité des zones de consommation. Ils assurent la consolidation des flux provenant d'autres hubs ou zones industrielles, puis la distribution et le transport du dernier kilomètre.

3.2. Sources et précision des évaluations

Une des particularités de notre démarche réside dans l'utilisation de différentes sources et mesures (nettes ou floues) d'évaluation. Peu d'auteurs utilisent les indices des organismes

internationaux (Eskilsson et Hansson, 2010), les rapports d'activités en ligne (Eskilsson et Hansson, 2010 ; Portugal et al., 2011 ; Żak et Węgliński, 2014) ou le jugement des experts (Elevli, 2014 ; Eskilsson et Hansson, 2010 ; Kayikci, 2010 ; Lee et al., 2009 ; Portugal et al., 2011 ; Uysal et Yavuz, 2014 ; Yang et Chen, 2016 ; Żak et Węgliński, 2014). Dans ce dernier cas, l'évaluation qualitative de l'expert est souvent traduite sur une échelle numérique, telle que faible = 1, moyenne = 2, bon = 3, etc. La logique floue peut être une alternative intéressante à la modélisation de ces informations imprécises, en permettant de diminuer l'influence des seuils arbitraires. Dans de nombreux cas, une fonction d'utilité est utilisée pour traduire une valeur quantitative en degré de satisfaction. Cela est par exemple utile lorsque des seuils doivent être atteints pour donner pleine satisfaction au décideur. Or, en littérature, on retrouve très peu d'articles récents abordant la localisation des hubs régionaux tenant compte de l'imprécision du jugement des experts (Dey et al., 2015 ; El-Nakib, 2010 ; Lee et al., 2009 ; van Dyck et Ismael, 2015).

3.3. Séquence de décision

Le choix de la localisation d'un hub peut se faire à différents niveaux, ce qui conduit à de différents critères de choix (Essaadi et al., 2016) :

a. Choix d'un pays : il s'agit de sélectionner le pays où un hub sera installé (Eskilsson et Hansson, 2010 ; Shiau et al., 2011 ; Wang et Liu, 2007 ; Yang et Chen, 2016). Les critères de choix doivent traduire l'attractivité d'un pays par rapport aux autres ;

b. Choix d'une zone à l'intérieur d'un pays : dans ce cas, on compare les sites candidats situés dans le même pays (Chen et Qu, 2006 ; Elevli, 2014 ; Portugal et al., 2011 ; Uysal et Yavuz, 2014 ; Yu et al., 2011) ;

c. Choix séquentiel (ou hiérarchique) : les pays sont d'abord comparés sur la base de critères spécifiques, puis les emplacements possibles à l'intérieur du pays sélectionné sont comparés (Żak et Węgliński, 2014) ;

d. Choix simultané : les emplacements situés dans différents pays sont comparés, sur la base de critères prenant en compte à la fois les aspects globaux et locaux (Dey et al., 2015 ; Kayikci, 2010 ; Lee et al., 2009 ; van Dyck et Ismael, 2015).

Les articles analysés utilisent principalement les stratégies (a), (b) ou (c), ce qui conduit à des limitations différentes : (a) ne tient pas compte de la disparité entre les zones à l'intérieur d'un

pays donné. Cela peut être acceptable dans le cas de petits pays homogènes comme en Europe, mais n'est guère compatible avec le contexte africain. Dans le cas (c), une zone favorable située dans un pays peu attractif ne sera probablement pas prise en considération. En ce qui nous concerne, nous avons choisi la stratégie (d) pour permettre une comparaison globale et/ou locale des alternatives, chose que peu d'articles font.

3.4. Critères de localisation des hubs

Le tableau 2.2 montre que certaines études portent principalement sur l'attractivité du pays pour les investissements étrangers (El-Nakib, 2010 ; Muñoz et al., 2010 ; Oum et Park, 2004 ; Tongzon, 2004 ; Yang et Chen, 2016) ; d'autres tentent d'évaluer uniquement l'attractivité logistique d'écosystèmes portuaires, y compris la performance du terminal portuaire et l'efficacité des procédures douanières (Lirn et al., 2003; Shiau et al., 2011; Ugboma et al., 2006; Yu et al., 2011). Très peu d'articles prennent en compte à la fois l'attractivité du pays et la performance de l'écosystème logistique, comme dans (Kayikci, 2010 ; Lee et al., 2009 ; van Dyck et Ismail, 2015). Cette disparité suggère qu'un cadre global incluant une taxonomie structurée serait utile pour vérifier l'exhaustivité d'un ensemble donné de critère.

3.5. Limite des travaux de recherche pour la localisation des hubs logistiques

En synthèse, nous concluons que le problème de localisation des hubs logistiques régionaux, en évaluant simultanément l'attractivité des pays et celle des écosystèmes logistiques portuaires et tenant compte de l'imprécision sur le jugement d'experts, est peu abordé. Nous n'avons pu identifier qu'un seul article proche de cette problématique (Lee et al., 2009). Ses auteurs étudient la localisation des hubs logistiques régionaux en Asie sur la base des critères traduisant l'attractivité des ports ainsi que sur la base de la stabilité économique, politique et sociétale des pays. Cet article présente donc très peu de critères d'attractivité des pays, ce qui limite son apport par rapport à notre problématique.

Tableau 2.1 – Grille d'analyse des papiers sur la localisation des hubs logistiques

Papier	Contexte géographique	Type de hub			Sources des évaluations				Précision des évaluations		Sequence de la décision			
		Hub régional	Hub sous-régional	Centre de distribution urbain	Jugement d'expert	Rapport en ligne	Indice des organismes internationaux	Autre	Exacte	Floue	Choix d'une région (continent, pays)	Choix d'une zone dans une sous région	Séquentielle	Simultanée
Lirn et al., 2004	Taiwan	X			X				X			X		
Ugboma et al., 2006	Nigeria	X						X		X		X		
Wang et Liu., 2007	-		X							X	X			
Lee et al., 2009	Asie	X			X					X				X
El-Nakib, 2010	Afrique du Sud-Est	X			X				X					X
Kayikci, 2010	-		X		X				X					X
Eskilsson et Hansson, 2010	Suède	X			X	X	X		X		X			
Awasthi et al., 2011	-			X				X		X		X		
Portugal et al., 2011	Brasil		X		X	X		X	X			X		
Yu et al., 2011	Chine			X				X		X		X		
Shiau et al., 2011	-	X								X	X			
Long et Grasman, 2012	Etats Unis		X		X				X			X		
Elevli, 2014	-			X	X					X		X		
Żak et Węgliński, 2014	-			X	X	X			X				X	
Uysal et Yavuz., 2014	Turquie		X		X				X			X		
van Dyck et Ismail, 2015	Afrique de l'Ouest	X			X	X		X	X			X		X
Roso et al., 2015	Croatie	X			X				X			X		
Dey et al., 2015	Asie de l'Est	X			X					X				X
Peker et al., 2016	Turquie, Trabzon			X	X				X			X		
Yang et Chen, 2016	Asie	X			X				X		X			
Chen et al., 2017	Asie	X			X				X			X		
Nous	Afrique	X			X	X	X		X	X				X

Tableau 2.2 – Critères de localisation dans la littérature

	Lim et al., 2004	Oum et Park, 2004	Tongzon, 2004	Chen et Qu, 2006	Lu et Yang, 2006	Ugboma et al., 2006	Wang et Liu., 2007	Lee et al;, 2009	Kayikci, 2010	Eskilsson et Hansson, 2010	El-Nakib, 2010	Munoz et al., 2010	Awasthi, 2011	Shiau et al., 2011	Yu et al., 2011	Long et Grasman, 2012	Elevli, 2014	Żak et Węgliński, 2014	Uysal et Yavuz., 2014	van Dyck et Ismail, 2015	Roso et al., 2015	Dey et al., 2015	Peker et al., 2016	Yang et Chen, 2016	Chen et al., 2017
Disponibilité et qualité des infrastructures de transport	X			X			X	X		X		X	X	X			X	X	X	X		X	X		
Efficacité des procédures douanières	X	X	X			X			X	X	X	X			X	X				X				X	X
Ouverture du commerce					X	X				X		X		X		X								X	
Disponibilité du foncier		X		X			X	X			X					X	X		X			X			X
Taille de marché domestique		X			X						X											X			
Disponibilité d'une main d'œuvre qualifiée		X			X		X				X	X	X	X		X		X	X						
Coût de la main d'œuvre											X													X	
Coût des matières premières		X									X														
Coût du foncier		X									X		X					X				X	X		
Stabilité macro-économique					X			X	X			X													
Stabilité politique					X			X	X											X		X			
Efficacité des institutions publiques			X		X					X		X			X									X	
Qualité d'infrastructure portuaire	X					X								X	X					X					
Performance du terminal portuaire	X					X		X						X	X					X	X				
Qualité du service portuaire	X					X		X	X						X										X
Disponibilité du transport intermodal	X					X									X						X				
Charges de transit au port	X					X			X						X										X
Proximité aux marchés	X												X		X				X			X			X
Connectivité du port	X									X			X		X					X	X				X
Autres			X	X	X		X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X		X	X	

Ayant parcouru les travaux de recherche portant sur la localisation des hubs logistiques, nous analyserons dans ce qui suit les travaux sur la conception d'un réseau logistique. A notre connaissance, il n'existe pas d'article de recherche ou de thèse qui aborde ces deux problématiques simultanément.

4. Etat de l'art sur la conception d'un réseau logistique

La littérature sur la conception d'un réseau logistique a connu de nombreuses contributions scientifiques en termes de modélisation de nouvelles extensions du problème(Correia et Melo, 2017 ; Cortinhal et al., 2015 ; Jena et al., 2015) ou de développement de nouveaux algorithmes de résolution plus efficients (Jena et al., 2015 ; Melo et al., 2006 ; Razmi et al., 2013 ; Wilhelm et al., 2013) ou les deux (Badri et al., 2013 ; Hiremath et al., 2013 ; Zhalechian et al., 2016).

L'intérêt croissant à l'égard de cet axe de recherche a été reconnu par diverses revues de littérature (Farahani et al., 2013 ; Farahani et Hekmatfar, 2009 ; Govindan et al., 2017 ; Klose et Drexl, 2005 ; Melo et al., 2006 ; O'Kelly et Miller, 1994).

Chacune de ces revues présente une classification des articles existants pour analyser et comparer leur contribution scientifique et pour proposer de nouvelles directions de recherche. Farahani et al. (2013) ont proposé une taxonomie d'analyse des problèmes de localisation des hubs, alors que Govindan et al. (2017) se sont intéressés aux travaux sur la conception d'un réseau logistique sous incertitude en se basant sur des critères comme la structure du réseau, l'horizon de planification et décisions, la gestion des risques dans la conception des réseaux etc...

En ce qui nous concerne, nous allons nous inspirer de ces états de l'art et des spécificités de notre problématique pour élaborer une taxonomie plus personnalisée (tableau 2.3 et tableau 2.4) qui nous permettra d'analyser notre positionnement par rapport à la littérature.

Cette taxonomie est constituée de cinq axes : motivations et application industrielles, cadre décisionnel, caractéristiques du réseau logistique et des marchés, système de valorisation des coûts et critères d'optimisation. Chaque axe est subdivisé en sous axes (niveau 1, niveau 2, niveau 3). Les tableaux 2.3 et 2.4 résument notre analyse de la littérature récente (de 2006 à 2017) portant sur des applications industrielles réelles ou réalistes, ou sur de nouvelles extensions du problème classique. A noter que nous ne nous sommes pas intéressés aux articles orientés algorithmes de résolution.

4.1. Motivations et applications industrielles

Comme explicité auparavant, la conception d'un réseau logistique impacte significativement le fonctionnement opérationnel de ce réseau. Dans ce sens, elle requiert une stratégie bien pensée et alignée sur les orientations stratégiques des entreprises, sur les conditions d'affaires et sur les réglementations (Thanh et al., 2008). La plupart des travaux de conception sont motivés par l'extension des chaînes logistiques vers de nouveaux marchés géographiques dans lesquels les firmes délocalisent une partie de leur activités pour élargir leur part de marché, réduire leur coût de distribution et/ou de production et améliorer leur réactivité aux demandes des marchés (Albareda-Sambola et al., 2009 ; Bashiri and Badri, 2010 ; Delmelle et al., 2014 ; Hiremath et al., 2013 ; Manzini and Bindi, 2009 ; Min and Ko, 2008 ; Ramezani et al., 2013 ; Wang et al., 2011 ; Zadeh et al., 2014).

Par ailleurs, la conception d'un réseau logistique est motivée par la volonté des partenaires industriels (fournisseurs, producteurs, distributeurs) de s'intégrer verticalement dans un nouveau réseau de chaînes logistiques, au lieu d'agir en tant que de firmes individuelles, le tout pour mieux satisfaire les exigences des marchés et réduire leurs coûts (Baghalian et al., 2013 ; You et Grossmann, 2008). Par conséquent, les sociétés sont amenées à concevoir de nouveaux schémas de production-distribution plus durables pour assurer leur responsabilité sociétale et environnementale (Afshari et al., 2014 ; Chaabane et al., 2011 ; Chen et al., 2017 ; Dal-Mas et al., 2011 ; Pishvaee and Razmi, 2012 ; Ramezani et al., 2013 ; Zahiri et al., 2017 ; Zhalechian et al., 2016).

En revanche, la reconfiguration d'un réseau logistique est généralement motivée par les fluctuations des marchés (croissance ou déclin), des conditions commerciales et de distribution, souvent en conjonction avec une augmentation de la pression sur les coûts et sur les niveaux de service. Par conséquent, les entreprises sont obligées d'étendre ou de restructurer leur chaînes logistiques (Badri et al., 2013 ; Behmardi et Lee, 2008 ; Correia et al., 2013 ; Cortinhal et al., 2015 ; Delmelle et al., 2014 ; Jena et al., 2015 ; Melachrinoudis et Min, 2007 ; Naraharisetti et Karimi, 2010 ; Razmi et al., 2013 ; Thanh et al., 2008 ; Vila et al., 2006).

Par ailleurs, cette reconfiguration des chaînes de valeurs peut être induite par l'acquisition d'entreprises concurrentes, comme dans le cas de l'industrie des matières premières, pour atténuer la pression sur les coûts d'approvisionnement de ces produits (Thanh et al., 2008 ; Vila et al., 2006), ou par la fusion des plateformes existantes (par exemple, de plateformes de

distribution) pour mieux profiter d'économies d'échelles et baisser les coûts d'une ou de plusieurs entreprises (Melachrinoudis et Min, 2007 ; Thanh et al., 2008).

4.2. Cadre décisionnel de la conception d'un réseau logistique

La localisation des plateformes et le dimensionnement de leur capacité sont les décisions les plus discutées en littérature de conception d'un réseau logistique (Farahani et al., 2013 ; Melo et al., 2006). D'autres décisions d'ordre tactique concernent la sélection des fournisseurs, la sélection des opportunités de sous-traitance, la sélection des modes de transport, la gestion des stocks et l'allocation des flux. De l'analyse du tableau 2.3, il découle qu'il n'existe aucun article ayant traité ces problèmes simultanément.

L'allocation des flux est l'une des décisions tactiques fortement interdépendante avec la décision de la localisation des plateformes. Il s'agit d'affecter les flux de produits finis ou de matières premières aux différents nœuds du réseau. En littérature, on distingue l'*allocation unique*, où un nœud ne sera servi que par un seul autre nœud, et l'*allocation multiple*, dans laquelle un nœud peut être servi par plusieurs autres nœuds simultanément. L'allocation multiple a été beaucoup abordée en littérature du fait qu'elle offre une flexibilité permettant d'avoir un meilleur rapport qualité, prix, délais et une sécurité d'approvisionnement des produits. Cependant, elle complexifie le problème décisionnel. C'est pourquoi certains auteurs ont choisi de ne pas combiner l'allocation unique et multiple, comme (Zhalechian et al., 2016) qui supposent que chaque distributeur ne peut être approvisionné que par un seul fournisseur, alors qu'un détaillant peut être approvisionné par plusieurs distributeurs. D'autres ont adopté uniquement l'allocation unique, comme Ramezani (2013) qui suppose que chaque client retournera ses produits défectueux, pour réparation, à un seul centre de maintenance.

4.2.1. Localisation multi-périodes des plateformes

La localisation des plateformes est faite par un choix discret parmi un sous ensemble de plateformes appartenant à un ensemble de plateformes candidates, de façon à satisfaire les exigences des décideurs et des marchés. Le plus souvent, cette localisation concerne des sites de production et/ou des plateformes de distribution (tableau 2.3) alors que très peu de travaux étudient également la localisation des plateformes industrielles opérant des activités de post-production au niveau du réseau de distribution (Afshari et al., 2014 ; Min et Ko, 2008). Notons que ces deux études se sont focalisées sur la localisation des plateformes de maintenance ou de

recyclage opérant en logistique inverse, alors qu'aucun travail ne discute la localisation des plateformes de personnalisation finale des produits (par exemple, le *blending* d'engrais).

Par ailleurs, la majorité des articles analysés admettent que la localisation des plateformes est décidée au cours de la première période et reste valable sur l'ensemble de l'horizon de planification (décision mono-période ou statique) (tableau 2.3). Dans ce cas, les données du problème (coûts, demandes, infrastructures, environnement économique, etc..) sont supposées stables. Or, dans le cas de marchés émergents comme ceux d'Afrique, les caractéristiques de la demande (le volume et les préférences de consommation) et les conditions de distribution (les coûts de distribution et les réglementations) sont en constante évolution. Dans ce cas, la solution liée à l'hypothèse de localisation statique ne sera pas optimale. Cette hypothèse convient donc aux marchés stables, saturés, ou ayant une évolution prévisible, comme ceux des pays développés. Par ailleurs, cette hypothèse est aussi valable dans le cas d'une planification à moyen terme dans laquelle il sera question d'aborder les enjeux spatiaux de la localisation des plateformes.

La flexibilité décisionnelle offerte aux décideurs par la localisation multi-périodes, en tolérant un ajustement flexible des décisions conformément aux variations du contexte étudié et ce tout au long de l'horizon de planification, n'a reçu que peu d'intérêt en littérature, en comparaison de la localisation mono-période (tableau 2.3).

4.2.2. Localisation des plateformes à capacité prédéfinie ou à dimensionner

Comme nous l'avons montré, la conception d'un réseau logistique relève, simultanément, de la question de la localisation des plateformes et du dimensionnement de leur capacité. Ces deux décisions sont fortement dépendantes. D'une part, la réduction du nombre de plateformes favorise l'investissement sur de grandes capacités, profitant ainsi des économies d'échelle. D'autre part, la localisation des plateformes dépend des hypothèses faites sur leur capacité ; plus les capacités sont importantes, plus le nombre de plateformes localisées sera faible. Cette forte interdépendance entre les décisions accroît la complexité du problème de conception.

Tableau 2.3 – Grille d'analyse des articles de conception d'un réseau logistique (partie 1)

Papier	Motivations et applications industrielles					Cadre décisionnel du problème								
	Motivation				Applications industrielles	Localisation des plateformes		Dimensionnement des capacités		Autres décisions				
	Extension des chaines logistiques vers de nouveaux	Intégration verticale ou horizontale des partenaires	Variations des demandes et des conditions de distribution	Réglementation environnementale		Localisation multipériodes des plateformes	Fermeture définitive "FD" ou temporaire "FT"	Acquisition des capacités modulaires	Extension "E" vs relocalisation des capacités (complète"RC", partielle "RP")	Sélection des fournisseurs	Technology selection	Sélection des opportunités de sous-traitance (production	Sélection des modes de transport	Contrôle des stocks	Allocation des flux (unique "U", multiple "M")
Nous	X		X		Industrie chimique (engrais)	X	FT, FD	M	E,RC, RP	X		X	X	X	M
Chen et al., 2017				X	Industrie forestière	-	-	-	-	-		-	-	-	M
Correia et Melo, 2017	X		X		Application numérique fictive	X	-	M	E, RC	-		-	-	-	M
Zahiri et al., 2017				X	Industrie pharmaceutique	-	-	-	-	-		-	X	X	M
Zhalechian et al., 2016				X	Industrie éléctronique	X	-	M	-	X		-	-	X	U,M
Cortinhal et al., 2015	X		X		Application numérique fictive	X	FD	M	E	X		P	-	-	M
Jena et al., 2015			X		Industrie forestière	X	FT	M	E,RC	-		-	-	-	X
Afshari et al., 2014				X	Logistique inverse des produits électroniques	-	-	-	-	-		-	-	-	M
Delmelle et al., 2014	X		X		Ecoles publiques	X	FT	M	E,RP	-		-	-	-	U
Zadeh et al., 2014	X				Industrie d'acier	X	-	M	E	X		-	-	X	M
Amin et Zhang, 2013	-	-	-	-	Application numérique fictive	-	-	-	-	-		-	-	-	M
Baghalian et al., 2013		X			Industrie agroalimentaire	-	-	-	-	-		-	-	-	M
Badri et al., 2013			X		Application numérique fictive	-	FD	M	-	X		L	-	-	M
Correia et al., 2013	X				Application numérique fictive	X	-	M	E	-		-	-	-	M
Hiremath et al., 2013	X				Industrie de l'autombile	-	-	-		-		-	-	-	M
Ramezani et al., 2013	X			X	Logistique inverse des produits électroniques	-	-	M	-	-		-	-	-	U
Razmi et al., 2013			X		Industrie pharmaceutique	-	FD	C	-	-		-	-	-	M
Pishvae et Razmi, 2012				X	Industrie médicale	-	-	-	-	-		-	-	-	M
Chaabane et al., 2011				X	Industrie d'acier	-	-	-	-	X		X	X		M
Dal-Mas et al., 2011				X	Industrie chimique (éthanol)	X	-	C	-	-		-	X	-	M
Torres-Soto et Üster, 2011	-	-	-	-	Application numérique théorique	-	FT	-	-	-		-	-	-	M
Wang et al., 2011	X				Application numérique théorique	-	-	-	-	-		-	-	-	M
Bashiri et Badri, 2010	X				Application numérique théorique	X	-	M	-	X		-	-	X	M
Naraharisetti et Karimi, 2010			X		Industrie de fabrication de peintures	X	FT	C	E,RC	X		-	-	X	M
Albareda-Sambola et al., 2009	X				Service	X	-	-	-	-		-	-	-	U
Manzini et Bind, 2009	X				Industrie de carrelage	X	-	-	-	X		-	-	X	M
Behmardi et Lee, 2008			X		Application numérique fictive	X	FT	C	E,RC	-		-	-	X	M
Hinojosa et al., 2008	-	-	-	-	Application numérique fictive	X	FT	-	-			P	-	X	M
Kim et Moon, 2008	-	-	-	-	Infrastructure d'hydrogène	-	-	C	-	-		-	-	-	M
Manzini et Gebennini, 2008	-	-	-	-	Industrie éléctronique	X	FT	-	-	-		-	X	X	M
Min et Ko, 2008	X				Service logistique	X	-	C	E	-		-	-	-	M
Thanh et al., 2008	X	X	X		Application numérique réaliste	X	FD	M	E	X		P	-	X	M
You et Grossmann, 2008		X			Industrie chimique	-	-	-	-	X		-	-	X	M
Melachrinoudis et Min 2007			X		Industrie de fabrication des matériaux d'emballage	-	FD	-	-	X		-	-	X	M
Dias et al., 2006	-	-	-	-	Application numérique fictive	X	FT	-	-	-		-	-	-	M
Hamer-Lavoie et Cordeau, 2006	-	-	-	-	Application numérique fictive	-	-	-	-	-		-	X	X	M
Melo et al., 2006	-	-	-	-	Application numérique fictive	-	FD	C,M	E,RP	X		-	-	X	M
Vila et al., 2006		X	X		Industrie du bois	-	FD	M	E,RC	-		-	-	X	M

Tableau 2.4 – Grille d'analyse des articles de conception d'un réseau logistique (partie 2)

Papier	Caractéristiques du réseau logistique											Système de valorisation des coûts				Critères d'optimisation		
	Topologie du réseau multi-niveau et flexible	Type de plateforme à localiser			Type de capacité à dimenssionner		Caractéristiques de la demande			Organisation de transport		Structure de coût		Caractéristiques des coûts				
		Site de production	Plateforme logistique	Plateforme industrielle post-production	Logistique (stockage/distribution)	Production	Saisonière	Diversifié	Incertaine	Transport multi-modale	Conditionnement hétérogène des flux	Récurrent	Investissement	Dépendant du temps	Orienté économie d'échelle	Orienté efficience	Orienté marché	Orienté durabilité
										Multi-modale	Hétérogène							
Nous	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	C,P	Px	W
Chen et al., 2017	-		X		-	-		X	-	-	-	X	X	-	-	C		GHG
Correia et Melo, 2017	-	X			X	X	-	-		-	-	X	X	X	X	C		
Zahiri et al., 2017	-	X	X		-	-	-	X	X	X	-	X	X	-	-	C		GHG,S
Zhalechian et al., 2016	-		X		X		-	X	X	-	-	X	X	X	X	C		GHG, S
Cortinhal et al., 2015	-	X	X		X	X	-	X	-	X	-	X	X	X	-	C	-	-
Jena et al., 2015	-		X		X		X		-	-	-	X	X	X	-	C		
Afshari et al., 2014	-		X	X	-	-	-	X	-	-	-	X	X	-	-	X	-	W
Delmelle et al., 2014	-		X		X		-	-	-	-	-	X	-	X	-	C	-	-
Zadeh et al., 2014	-	X			X	X	-	X	X	-	-	X	X	-	-	C	-	-
Amin et Zhang, 2013	-	X	X		-	-	-	X	X	-	-	X	X	-	-	C	-	-
Baghalian et al., 2013	-		X		-	-	-	X	X	-	-	X	-	-	-	P	SC	-
Badri et al., 2013	-	X	X		-	-	-	X	-	-	-	X	-	-	-	P	-	-
Correia et al., 2013	-		X		X		-	X	-	-	-	X	X	X	-	C	-	-
Hiremath et al., 2013	X	X	X		X	X	-	X	-	-	-	X	X	-	-	C,R	NS	-
Ramezani et al., 2013	-	X	X		X	X	-	X	-	X	-	X	X	-	-	P	DL, Q	W
Razmi et al., 2013	-	X	X		X		-	-	X	-	-	X	X	-	X	C	DL	
Pishvae et Razmi, 2012	-	X	X		-	-	-	-	X	-	-	X	X	-	-	C	-	-
Chaabane et al., 2011	-	X				X	-	-	-	X	-	X	X	-	-	C		GHG
Dal-Mas et al., 2011	-	X				X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	C	-	GFG
Torres-Soto et Uster, 2011	-		X		-	-	-	-	-	-	-	X		X	-	C	-	-
Wang et al., 2011	-	X	X		-	-	X	-	X	-	-	X	X	-	-	P	-	-
Bashiri et Badri, 2010	-		X		X		-	-	-	-	-	X	X	-	-	P	-	-
Naraharisetti et Karimi, 2010	-	X	X			X	-	X	-	-	-	X	X	-	-	P	-	-
Albareda-Sambola et al., 2009	-		X		-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	C	-	-
Manzini et Bind, 2009	-		X		-	-	-	-	-	X	-	X	X	-	-	C	-	-
Behmardi et Lee, 2008	-	X			-	-	-	X	-	-	-	X	X	X	-	P	-	-
Hinojosa et al., 2008	-	X	X		-	-	-	X	-	-	-	X	X	X	-	C	-	-
Kim et Moon, 2008	-	X	X		X	X		-	-	X	-	X	X	-	-	C	Px	S
Manzini et Gebennini, 2008	-	X	X		-	-	-	X	-	-	-	X	X	-	-	C	-	-
Min et Ko, 2008	X		X	X	X	X		X	-	-	-	X	X	X	-	C,R	-	-
Thanh et al., 2008	-	X	X		X	X	-	X	-	-	-	X	X	-	-	C	-	-
You et Grossmann, 2008	-	X	X				X	-	-	X	-	X	X	X	-	P	DL	-
Melachrinoudis et Min 2007	-	-	X	-	X		-	-	-	-	-	X	X		-	C	-	-
Dias et al., 2006	-	X			-	-	-	X	-	-	-	X	X	X	-	C	-	-
Hamer-Lavoie et Cordeau, 2006	-		X		-	-	-	X	-	X	-	X	X	X	-	C	-	-
Melo et al., 2006	-		X		X			-	-	-	-	X	X	X	-	C	-	-
Vila et al., 2006	-		X		X		X	X	-	-	-	X	X	X	-	P	-	-

C: Coût
P: Profit
Px: Proximité au marché
DL: Délais de livraison
Q: Qualité
SC: Coût de rupture
W: Pertes
S: Social
F: Risque financier
GHG: Gaz à effet de serre
R: Utilisation des capacités
NS: Niveau de service

Les études existantes simplifient cette complexité en approchant le problème de localisation des plateformes par des hypothèses simplificatrices sur la capacité: celle-ci est soit supposée être infinie, en relaxant la contrainte de limite de la capacité (ce problème est connu en litérature sous le nom de (*Uncapacited facility location*) (Albareda-Sambola et al., 2009 ; Manzini et Gebennini, 2008), soit finie et prédéfinie (*Capacited facility location*) en supposant que les plateformes sont acquises avec une capacité fixe (Afshari et al., 2014 ; Amin et Zhang, 2013 ; Baghalian et al., 2013 ; Chaabane et al., 2011 ; Chen et al., 2017 ; Dias et al., 2006 ; Hamer-Lavoie et Cordeau, 2006 ; Hiremath et al., 2013 ; Melachrinoudis et Min, 2007 ; Pishvaee et Razmi, 2012 ; Torres-Soto et Üster, 2011 ; Wang et al., 2011 ; Zahiri et al., 2017).

Cette hypothèse de capacité prédéfinie requiert donc l'existence des plateformes à louer ou à acheter. Or, dans le contexte Africain, et à la différence des continents plus développés, il y a un réel manque d'infrastructures de transport et de distribution, voire une faiblesse de la compétitivité des offres logistiques. Ainsi, la localisation des plateformes se traduit par la construction de nouvelles plateformes. En littérature, très peu d'auteurs abordent le problème de dimensionnement de nouvelles plateformes soit par l'acquisition de nouvelles capacités soit par la relocalisation des capacités existantes (tableau 2.3).

4.2.3. Acquisition de capacités modulaires

L'acquisition des capacités peut être modélisée soit par des variables continues (Behmardi et Lee, 2008 ; Dal-Mas et al., 2011 ; Kim et Moon, 2008 ; Melo et al., 2006 ; Min et Ko, 2008 ; Naraharisetti et Karimi, 2010 ; Razmi et al., 2013), soit par des variables binaires qui portent sur la sélection de capacités parmi un ensemble discret de capacités, dites « capacités modulaires » (Badri et al., 2013 ; Correia et al., 2013 ; Correia et Melo, 2017 ; Cortinhal et al., 2015 ; Delmelle et al., 2014 ; Jena et al., 2015 ; Melo et al., 2006 ; Ramezani et al., 2013 ; Thanh et al., 2008 ; Vila et al., 2006 ; Zadeh et al., 2014 ; Zhalechian et al., 2016). Cette dernière hypothèse convient à beaucoup de cas réels dans lesquels il sera question d'acquérir des installations de production ou de stockage sur catalogue sous forme d'unités ou de modules. Ces modules sont en réalité hétérogènes, i.e. de capacités différentes (Badri et al., 2013 ; Correia et al., 2013 ; Cortinhal et al., 2015 ; Jena et al., 2015 ; Melo et al., 2006 ; Ramezani et al., 2013 ; Thanh et al., 2008 ; Vila et al., 2006 ; Zadeh et al., 2014 ; Zhalechian et al., 2016), ce qui complexifiera davantage la modélisation et la résolution du problème. Ainsi, pour simplifier le problème, quelques auteurs comme (Correia et Melo, 2017) font une hypothèse d'homogénéité de ces modules (modules identiques).

4.2.4. Extension ou relocalisation des capacités

Le dimensionnement des capacités devra s'aligner avec la dynamique des marchés et des conditions de production-distribution, celles-ci varient en fonction du niveau de développement des pays. En Afrique, avec le développement démographique et à l'émergence des projets de développement des infrastructures, la demande et les conditions de distribution sont en constante évolution en comparaison avec les continents développés. Plus généralement, quand la demande de certains marchés change en permanence (croissance ou décroissance), les décideurs auront besoin d'avoir plus de flexibilité quant au dimensionnement des plateformes en fonction de cette dynamique (Jena, 2014). Cette flexibilité se matérialise par la possibilité d'étendre les capacités ou de les relocaliser durant l'horizon de planification.

En littérature, cette flexibilité a été très peu abordée. En effet, de nombreux papiers, comme (Bashiri et Badri, 2010 ; Dal-Mas et al., 2011 ; Kim et Moon, 2008 ; Ramezani et al., 2013 ; Razmi et al., 2013 ; Zhalechian et al., 2016), considèrent que cette capacité une fois dimensionnée reste inchangée. Cette hypothèse conduit à un surdimensionnement des capacités (car la capacité choisie doit être suffisante pour répondre à toute variation des demandes) et donc à une perte d'économie d'échelle.

D'autres auteurs ont étudié uniquement le cas d'extension des capacités pour accompagner la croissance des marchés. Ils supposent qu'une fois la capacité étendue, elle ne peut pas être réduite ou relocalisée ailleurs (Correia et al., 2013 ; Cortinhal et al., 2015 ; Min et Ko, 2008 ; Thanh et al., 2008 ; Zadeh et al., 2014). Min et Ko (2008) étudient la localisation et le dimensionnement des plateformes de distribution et de maintenance des produits électroniques retournés aux Etats Unis. Le plan d'extension des capacités proposé couvre un horizon de planification au cours duquel la demande des clients évolue. Zadeh et al. (2014) proposent un plan d'extension de plateformes existantes de production d'acier alors qu'aucune nouvelle plateforme ne sera établie.

Par ailleurs, très peu d'études abordent l'extension et la relocalisation des capacités (Behmardi et Lee, 2008 ; Correia et Melo, 2017 ; Delmelle et al., 2014 ; Jena et al., 2015 ; Melo et al., 2006 ; Naraharisetti et Karimi, 2010 ; Vila et al., 2006) et très peu généralisent cette flexibilité aux capacités existantes et nouvelles (Correia et Melo, 2017 ; Delmelle et al., 2014 ; Jena, 2014).

La relocalisation des capacités peut concerner la totalité des capacités d'une plateforme (nous pouvons parler alors de « *relocalisation complète* » (Jena, 2014) ou une partie des capacités (« *relocalisation partielle* » (Correia et Melo, 2017 ; Delmelle et al., 2014)). Jena (2014) aborde le dimensionnement des tentes d'accueil des ouvriers qui participent aux activités de récolte du bois durant quelques mois de l'année, ceux-ci se déplaçant d'une région à une autre en fonction de la saison de récolte qui varie en fonction des régions. A la différence de notre proposition, ces travaux portent seulement sur des capacités logistiques et non pas sur des capacités de personnalisation.

La relocalisation partielle des capacités peut s'appliquer aux situations dans lesquelles l'investissement en extension ou en réduction des capacités n'est pas très important. En effet, Delmelle et al. (2014) intègrent cette flexibilité dans le dimensionnement d'écoles dans lesquelles les capacités des classes peuvent être étendues en relocalisant des meubles dans de nouvelles ou anciennes écoles en fonction de l'évolution du nombre d'élèves de la région.

La littérature existante sur la relocalisation des capacités aborde une relocalisation totale ou partielle, alors que nous souhaitons étudier la relocalisation partielle des capacités productive et la relocalisation totale des capacités de stockage.

4.2.5. Fermeture définitive ou temporaire des plateformes

La relocalisation des capacités totales d'une plateforme s'accompagne d'une fermeture de ces plateformes. Cette fermeture peut être définitive ou temporaire selon la dynamique de la demande des marchés :

1) si la demande dans une région décline de façon temporaire, il sera judicieux de fermer la plateforme dans cette région temporairement pour éviter les charges fixes (Behmardi et Lee, 2008 ; Hinojosa et al., 2008 ; Jena, 2014 ; Manzini et Gebennini, 2008) Cette flexibilité se traduit par la relocalisation des capacités de cette plateformes en totalité vers d'autres plateformes qui seront rapatriées ultérieurement comme dans le cas des tentes d'accueil dans (Jena, 2014) ou par un contrat de location temporaire des plateformes (Dias et al., 2006 ; Hinojosa et al., 2008 ; Manzini et Gebennini, 2008).

2) si la demande dans une région décline de façon irréversible, une des solutions sera de se désinvestir et de cesser l'activité de la plateforme qui la servait ; celle-ci ne sera plus opérationnelle (Badri et al., 2013 ; Cortinhal et al., 2015 ; Delmelle et al., 2014 ; Melachrinoudis

et Min, 2007 ; Melo et al., 2006 ; Naraharisetti et Karimi, 2010 ; Razmi et al., 2013 ; Thanh et al., 2008 ; Vila et al., 2006).

Par ailleurs, lorsque la demande fluctue à moyen terme, une décision possible pourrait également être d'externaliser le stockage. Nous remarquons que peu d'articles ajoutent des considérations d'externalisation aux options d'investissement : (Correia et al., 2013 ; Hinojosa et al., 2008 ; Thanh et al., 2008) envisagent l'externalisation de la production alors que seul, (Bashiri et Badri, 2010) envisage l'externalisation du stockage.

4.3. Caractéristiques du réseau logistique et des marchés

4.3.1. Topologie du réseau multiniveaux flexible

Selon le tableau 2.4, nous constatons que de nombreux travaux en littérature considèrent une structure hiérarchique classique multiniveaux dans laquelle les produits circulent d'un niveau à un autre depuis les zones production vers les centres de distribution, puis vers les zones de consommation. Cependant, la disparité des conditions de distribution, accentuée en Afrique, et le niveau d'exigence des clients, justifient la mise en place d'un réseau logistique efficient, réactif et flexible, c'est-à-dire adapté à chaque segment de marché.

A notre connaissance, (Afshari et al., 2014 ; Amin et Zhang, 2013 ; Hiremath et al., 2013 ; Min et Ko, 2008) sont les seuls articles qui abordent cet axe de recherche. Hiremath et al. (2013) présentent un modèle de conception d'un réseau logistique intégré en plusieurs étapes, dans lequel les voitures sont livrées par trois canaux de livraison différents en fonction de la rotation des produits : les produits à rotation rapide sont livrés aux clients à partir des centres de distribution régionaux ; les produits à rotation plus lente sont livrés aux clients à partir des centres de distribution centraux, et les articles à rotation très lente sont livrés aux clients à partir des usines. Cependant, à la différence de notre problématique, ils n'ont traité que la distribution des flux ayant le même conditionnement. (Amin et Zhang, 2013 ; Afshari et al., 2014 ; Hiremath et al., 2013 ; Ramezani et al., 2013) proposent des schémas de distribution et de collecte de produits défectueux. Cependant, la logistique inverse ne rentre pas dans notre problématique.

4.3.2. Organisation des transports

Le transport au niveau d'un réseau logistique combine plusieurs modes de transport, et au moins deux modes : maritime et routier dans le cas de l'Afrique. D'après le tableau 2.4, nous constatons que très peu de travaux tiennent en compte cet aspect (Chaabane et al., 2011 ; Cortinhal et al., 2015 ; Dal-Mas et al., 2011 ; Hamer-Lavoie et Cordeau, 2006 ; Kim et Moon, 2008 ; Manzini et Bindi, 2009 ; You et Grossmann, 2008 ; Zahiri et al., 2017).

Cependant, pour simplifier le problème, la plupart de ces articles supposent un conditionnement identique des flux transportés, à l'exception de (Dal-Mas et al., 2011). Ces auteurs proposent un modèle de conception des schémas de distribution et de valorisation de la culture de la biomasse qui, après *blending*, produit à un biocarburant, ces deux types de flux n'étant pas conditionnés de la même façon.

4.3.3. Demande diversifiée, saisonnière et incertaine

De nombreux auteurs (tableau 2.4) étudient la conception d'un réseau logistique en tenant compte d'une demande diversifiée (i.e. plusieurs types de produits). De plus, la consommation des marchés peut subir des variations saisonnières qui devront influencer les décisions d'allocation des flux, et par conséquent la localisation et le dimensionnement des plateformes. Cet axe de recherche a été peu abordé en littérature (Dal-Mas et al., 2011 ; Jena, 2014 ; Vila et al., 2006 ; Wang et al., 2011 ; You et Grossmann, 2008).

De plus, les fluctuations, favorables ou défavorables, sont toujours entachées d'incertitude. Celle-ci accentue la complexité du problème de localisation des plateformes et influence profondément la configuration du réseau logistique. Toutefois, il existe très peu d'articles traitant la localisation multi-périodes des plateformes en univers incertain (Dal-Mas et al., 2011 ; Zadeh et al., 2014 ; Zhalechian et al., 2016). En effet, la plupart des auteurs supposent que les données du problème sont déterministes. Bien que cette hypothèse puisse réduire la complexité de la modélisation et de la résolution, elle conduit à des solutions non optimales, étant donné que la non-prise en compte de cette incertitude peut entraîner des manques d'économies caractéristiques de solutions sous-optimales.

4.4. Système de valorisation des coûts

La structure de coût de conception d'un réseau logistique implique 1) des coûts récurrents, relatifs au fonctionnement opérationnel du réseau, par exemple : les coûts de transport et de distribution, les coûts de manutention, les coûts fixes, les coûts de stockage ou de possession de stocks, les coûts de production. Certains auteurs introduisent les coûts de pénalité de retard des livraison aux clients (Correia et Melo, 2017 ; Razmi et al., 2013), 2) des coûts d'investissement en capacités de stockage, de production, des coûts de fermeture des plateformes ou de construction de nouvelles plateformes. En réalité, le dimensionnement des capacités est sujet d'économies d'échelles ; plus l'installation est grande, moins l'investissement par unité de produit traitée sera élevé. Cependant, très peu d'auteurs se sont intéressés à modéliser cette économie d'échelle (Correia et Melo, 2017 ; Razmi et al., 2013 ; Zhalechian et al., 2016).

4.5. Critères d'optimisation

La conception optimale d'un réseau logistique résulte d'un compromis entre différents objectifs contradictoires, tels que la minimisation du coût total de mise en œuvre du réseau logistique et l'impact environnemental ou social, la maximisation du profit ou l'utilisation des capacités, etc.

En examinant le tableau 2.4, nous constatons que la plupart des articles scientifiques sur ce thème sont axés sur un seul critère d'optimisation : la minimisation des coûts ou la maximisation des profits. Peu de travaux intègrent deux objectifs ou plus (Afshari et al., 2014 ; Baghalian et al., 2013 ; Chaabane et al., 2011 ; Chen et al., 2017 ; Dal-Mas et al., 2011 ; Kim et Moon, 2008 ; Min et Ko, 2008 ; Pishvaee et Razmi, 2012 ; Ramezani et al., 2013 ; Razmi et al., 2013 ; You et Grossmann, 2008 ; Zahiri et al., 2017 ; Zhalechian et al., 2016) et la minimisation du coût total ou la maximisation du profit total sont les critères d'optimisation les plus couramment retenus.

Certains articles axés sur l'efficacité considèrent également la maximisation de l'utilisation des ressources de production ou de stockage (Min et Ko, 2008). D'autres articles sont axés sur le service rendu au marché, et retiennent des critères comme la maximisation de la qualité et/ou de la réactivité aux demandes du marché.

Ces études sont motivées par la nécessité pour les entreprises de rester compétitives sur les marchés mondiaux et de répondre rapidement à l'évolution des besoins des consommateurs,

tant en termes de volume que de diversité des produits finis. La réactivité peut être mesurée physiquement, par le délai de réponse au client, le délai de livraison, le taux d'exécution des commandes (Afshari et al., 2014 ; Ramezani et al., 2013 ; Razmi et al., 2013 ; You et Grossmann, 2008) ou économiquement par le coût de rupture des stocks des produits finis, générant une perte de ventes (Baghalian et al., 2013). Les études axées sur la durabilité du réseau portent sur la minimisation de l'impact environnemental et sur l'impact économique (Amin and Zhang, 2013; Chaabane et al., 2011; Chen et al., 2017; Dal-Mas et al., 2011; Pishvaee and Razmi, 2012) et très occasionnellement sur la minimisation de l'impact social (Kim et Moon, 2008 ; Zahiri et al., 2017 ; Zhalechian et al., 2016). Citons par exemple le travail de Kim et Moon (2008) qui proposent un modèle de conception d'un réseau de production-distribution d'hydrogène qui doit être efficient et doit respecter les exigences de sécurité.

La majorité des études examinées sont axées sur l'efficience et la réactivité ou sur l'efficience et la durabilité du réseau. A notre connaissance, un seul article intègre des critères de ces trois catégories (Ramezani et al., 2013). Les auteurs de cet article suggèrent un modèle d'optimisation stochastique multi-objectifs pour la conception d'un réseau logistique inverse, appliqué aux industries de l'équipement électronique de véhicules. Ils considèrent simultanément la maximisation des profits, la maximisation du niveau de service et la minimisation des dommages impactant les matières premières. Cependant, les auteurs supposent une localisation mono-période des plateformes et considèrent un réseau logistique hiérarchique traditionnel qui n'est pas adapté dans notre cas.

4.6. Limite des travaux de recherche pour la conception d'un réseau logistique

En synthèse de cette revue de littérature sur la conception d'un réseau logistique, nous pouvons conclure qu'aucun des articles analysés n'aborde toutes les spécificités de notre problème. En effet, d'après les grilles d'analyse proposées (tableau 2.3 et tableau 2.4), nous pouvons constater que très peu d'auteurs abordent un problème similaire au nôtre. Jena (2014) propose un modèle pour la localisation et le dimensionnement multi-périodes des tentes accueillant les ouvriers pendant la saison de récolte du bois. La capacité de ces tentes peut être étendue ou relocalisée totalement vers un autre lieu et les tentes sont fermées temporairement en fonction de la saison de récolte du bois qui varie selon les régions. Cependant, l'auteur étudie ce problème en univers déterministe en ne minimisant que le coût total, ce qui ne permet pas de traduire des économies

d'échelle. De plus, si l'on fait une analogie entre les tentes et les plateformes logistiques, le dimensionnement des capacités de production n'est pas pris en charge dans leur modèle. Cortinhal et al. (2015) proposent un modèle pour la localisation multi-périodes des plateformes logistiques et de production avec la possibilité d'étendre ces plateformes et/ou de fermer les plateformes existantes. Ils supposent qu'une fois une plateforme fermée, elle ne peut être ré-ouverte. De plus, ils n'intègrent pas la flexibilité de relocaliser les capacités et ils considèrent le problème en univers certain en ne prenant en compte qu'un seul critère d'optimisation, le coût. Finalement, leur travail ne présente aucune application industrielle concrète. Plus récemment, Zhalechian et al. (2016) ont proposé de modéliser et de résoudre le problème de localisation et de dimensionnement des plateformes de distribution des produits électroniques neufs et de plateformes de maintenance et réparation des produits défectueux sous incertitude de la demande. Leur modèle vise à proposer des schémas efficients, écologiques (minimisant les rejets des gaz à effet de serre) et sociaux (créant des opportunités de travail). Cependant, bien qu'ils aient pris en compte la dynamique des marchés, ils ont supposé que les capacités installées restent inchangées durant l'horizon de planification.

5. Revue de littérature sur la différenciation retardée dans les chaînes logistiques

En général, le futur réseau logistique devra servir des marchés qui sont géographiquement éloignés. Comme ces marchés évoluent différemment et ont des préférences spécifiques, le réseau devra offrir la variété désirée, en qualité voulue, tout en assurant un meilleur rapport réactivité-efficience. Une solution classiquement adoptée est de retarder la personnalisation ou la différenciation finale des produits jusqu'à ce que la demande des clients soit connue (Alderson, 1957). Les unités ou ateliers de personnalisation sont localisés près des zones de production. Or, en raison de la dispersion géographique des marchés, de la volatilité et de l'incertitude des demandes, il devient plus complexe de maintenir un bon compromis réactivité-efficience.

Cette difficulté devient encore plus forte dans notre contexte dans lequel le produit est de faible valeur ajoutée mais pour lequel le potentiel de développement futur est prometteur. Pour lever ce dilemme, une idée émergente est de délocaliser la personnalisation au niveau de la = :;xw< ; distribution finale (Rietze, 2006 ; Wang et al., 2011).

Du point de vue industriel, cette stratégie a été adoptée par quelques industries comme l'industrie informatique, l’industrie automobile, l'industrie médicale, ou l'industrie alimentaire. A notre connaissance, la première étude sur ce sujet est (Feitzinger and Lee, 1997) dans laquelle les imprimantes « *DeskJet* » de *Hewlett-Packard* (HP) sont produites dans une usine à Singapour et personnalisées selon les spécifications des marchés européens dans un centre de distribution près de Stuttgart, en Allemagne. Plus récemment, (Seth et Panigrahi, 2015) décrit un secteur de biens de consommation à évolution rapide dans lequel les lignes d'emballage sont délocalisées au niveau des centres de distribution et pour lequel les produits en vrac importés sont emballés en fonction des conditions du marché et des tendances des ventes. Cependant, la recherche sur la délocalisation de la personnalisation finale au niveau de la distribution est limitée.

De nombreuses études ont analysé les avantages du report de la personnalisation et comment cette stratégie pourra aider à stimuler la réactivité de la chaîne de valeur, mais les modèles quantitatifs pour les décisions de délocalisation de la personnalisation au niveau de la distribution finale sont rares. (Schulze et Li, 2009 ; Schwartz et al., 2007) sont les seuls articles de recherche qui ont étudié la localisation de centres de distribution et d'activités de personnalisation. Cependant, ils ne tiennent pas en compte la dynamique de la demande et supposent donc que les décisions de localisation restent inchangées durant l’horizon de planification. De plus, ils supposent une structure du réseau prédéterminée et générique, quel que soit le marché à servir. Cette structure n'est pas flexible comme nous le souhaitons.

6. Conclusion du chapitre 2

Ce chapitre a présenté une revue de littérature permettant de positionner notre problématique de recherche par rapport aux travaux récents sur la localisation des hubs logistiques régionaux, sur la conception d'un réseau de chaînes logistiques et sur la localisation de la personnalisation au niveau des chaînes logistiques.

Il découle de cette analyse que de nombreuses études antérieures approchent le problème de localisation des hubs logistiques à l'aide de la programmation mathématique. Ces approches ne prennent en compte que des critères quantitatifs. Or, dans le contexte étudié, l'Afrique, d'autres critères d'ordre qualitatif auront une influence forte sur le choix de localisation des hubs logistiques, tels que la stabilité du pays, la qualité de l'infrastructure, la réglementation du marché de travail, etc. Afin d'avoir une vue holistique, Murthy et Mohle (2001) suggèrent que la prise de décision de localisation des plateformes devrait être basée sur des évaluations quantitatives et qualitatives, en utilisant des méthodes analytiques de décision multicritères (*Multi-Criteria Decision Making methods* - MCDM). Dans de nombreux cas, les auteurs choisissent leurs critères de manière relativement empirique et traduisent souvent abruptement l'évaluation subjective d'un critère en une note précise, sans tenir compte du fait que l'imprécision est une caractéristique inhérente au jugement humain.

Par ailleurs, les modèles de conception d'un réseau logistique, proposés dans cette littérature, ne traitent pas simultanément les questions soulevées dans notre problématique, telles que la délocalisation de la personnalisation finale dans le réseau de distribution, la dynamique spatio-temporelle des demandes, l'extension ou la relocalisation de capacités modulaires, l'incertitude d'évolution des demandes, la réactivité face aux demandes et la préservation de la qualité des produits personnalisés. De plus, nombreux sont ceux qui supposent que la localisation et le dimensionnement sont décidés au début de la planification et restent inchangés par la suite, en supposant que les données de distribution (demande, coûts) sont connues avec certitude. Très peu d'auteurs se sont intéressés à résoudre le problème dans sa version la plus réaliste (dynamique et incertitude).

Chapitre 3

Outils méthodologiques

1. Introduction du chapitre 3

Après avoir positionné notre problématique de recherche par rapport à la littérature, ce chapitre sera consacré à la revue et au choix de méthodes sur lesquelles nous allons nous appuyer pour élaborer l'approche de modélisation et de résolution de notre problématique.

Rappelons que notre problématique de recherche aborde deux axes de recherche : choix de localisation des hubs logistiques régionaux (chapitre 4), conception de réseaux de distribution hybrides (chapitre 5 et 6).

Tout d'abord, nous allons présenter la méthodologie de modélisation ASCI (Analyse, Spécification, Conception et Implémentation) qui nous servira pour élaborer une modélisation systémique de notre problème de conception de réseaux de distribution hybrides.

Ensuite, dans une deuxième section (§2), nous allons considérer les méthodes d'analyse multicritères floues développées jusqu'à présent, puis nous allons décrire en détails les principes de base de celle(s) choisie(s). Dans une troisième section (§3), nous allons examiner les méthodes d'optimisation multi-objectifs pour choisir celle qui sera adaptée au problème du chapitre 5. Dans une quatrième section (§4), et avant de conclure ce chapitre, nous allons détailler les méthodes d'optimisation sous incertitude et justifier le choix de la méthode qui sera déployée pour la résolution du problème relatif au chapitre 6.

2. Méthodologie ASCI

Cette méthodologie de modélisation, dénommée « Analyse-Spécification- Conception-Implantation », a été initiée par (Gourgand et Kellert, 1991) pour la modélisation de systèmes de production existants ou à concevoir (Cossard, 2004; Goujon, 1997; Grangeon, 2001; Féniès et al., 2006; Lacomme, 1998; Tchernev, 1997). Plus tard, elle a été adaptée à la modélisation et à l'évaluation d'autres systèmes, à savoir les systèmes de transport (Chabrol et Sarramia, 2001) et les systèmes hospitaliers (Chabrol et al., 2006 ; Combes, 1994 ; Féniès et al., 2006; Mebrek et Tanguy, 2005).

Cette méthodologie se base sur une approche orientée objet permettant l'élaboration séquentielle d'un modèle de connaissances et des modèles d'action associés au système étudié. Le modèle de connaissances est une formalisation de la structure et du fonctionnement du système par le biais d'un langage naturel ou graphique (Chabrol et al., 2009). Ce modèle doit

pouvoir être instancié pour n'importe quel système de la classe (Chabrol et al., 2009). Ce modèle peut permettre de traduire les connaissances dans un formalisme mathématique (par exemple, une méthode analytique qui exploiterait une analyse de réseau de files d'attente ou un modèle de traitement de données) ou dans un langage de programmation ou de simulation (par exemple, simulation à événements discrets).

Par ailleurs, cette approche met en évidence deux processus parallèles : le premier se focalise sur le domaine d'étude de façon générale (systèmes industriels, chaînes logistiques, systèmes hospitaliers) tandis que le deuxième se focalise sur un système particulier du domaine considéré. Le premier processus vise à capitaliser les connaissances acquises en termes de modèle de connaissances et d'outils, par l'étude successive de systèmes appartenant au domaine. Cette capitalisation permet alors d'aider à l'étude des prochains systèmes en offrant un modèle de connaissances et des outils (Lemoine, 2008).

Les deux processus partagent les mêmes phases, décrites sur la figure 3.1 (le premier est représenté à gauche et le second est représenté à droite). Cette figure résume la procédure de modélisation ASCI itérative dans sa dernière version (Chabrol et al., 2009), qui comprend sur quatre phases :

- Analyse,
- Spécification,
- Conception du modèle d'action,
- Implémentation du modèle d'action.

Les deux premières phases concernent l'élaboration du modèle de connaissances tandis que les deux dernières s'intéressent à la conception et à l'implémentation de modèles d'action. Ces étapes seront expliquées en détails dans ce qui suit.

2.1. Analyse et Spécification

Pour élaborer le modèle de connaissances, il faut tout d'abord mener une analyse fonctionnelle et structurelle du système et du domaine d'étude. Lors de cette étape, nous devons collecter les informations nécessaires pour mieux cerner le système à étudier et à modéliser et pour définir les objectifs de l'étude et les contraintes à respecter. Ensuite, nous procédons à la spécification des activités et donc des flux qui traversent ces systèmes, ainsi que des règles de fonctionnement

qui gèrent ces flux. Cette deuxième phase nécessite de l'attention car elle fixe le niveau de détail et le type d'évènements jugés pertinents.

Pour illustrer le modèle de connaissances obtenu, Lemoine (2008) recommande de décomposer le système étudié en trois sous-systèmes complémentaires et interdépendants. Il s'agit du sous-système physique (SSP), du sous-système logique (SSL) et du sous-système décisionnel (SSD). La figure 3.2 montre les interactions entre ces trois sous-systèmes.

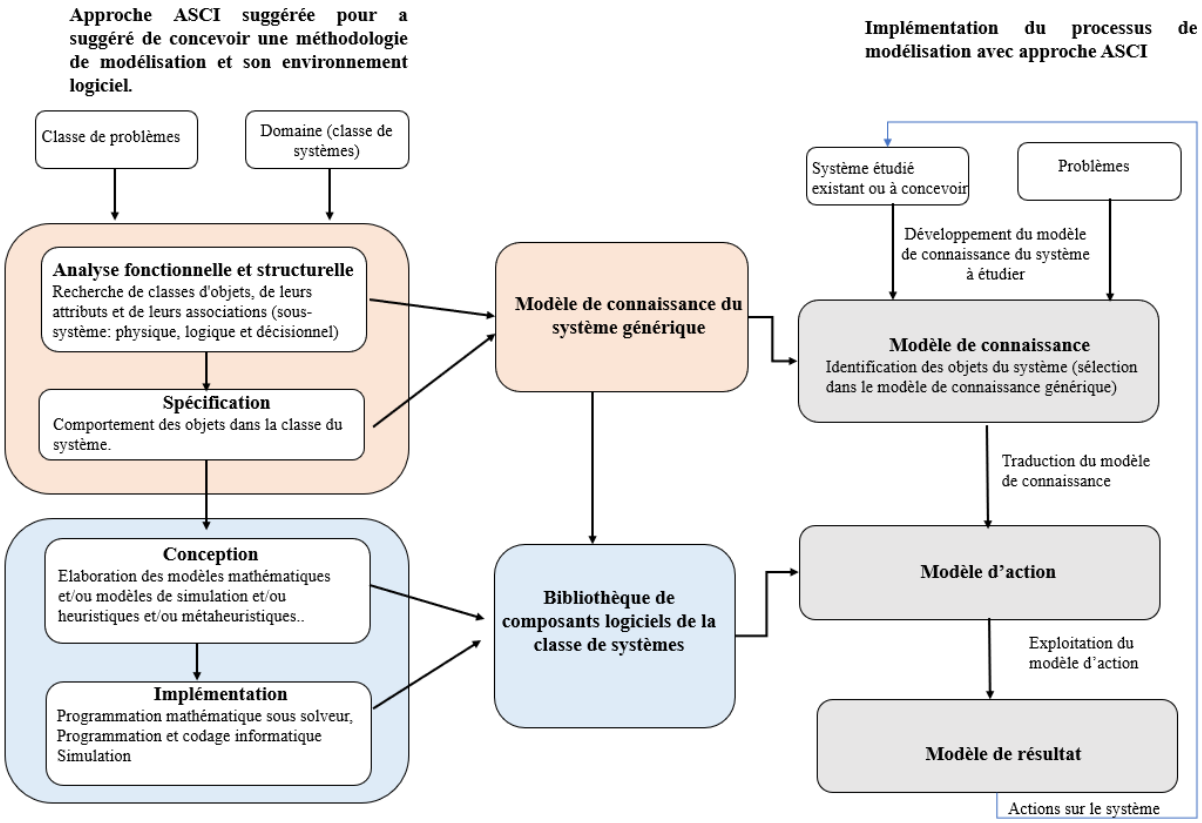

Figure 3.1 – Description de la méthodologie ASCI (Chabrol et al., 2009)

2.1.1. Le sous-système physique (SSP)

Ce sous-système est formé de l'infrastructure du système nécessaire à la production des services ou des produits. Il comprend les entités physiques du système étudié (unité de production, de stockage, leurs caractéristiques techniques), leur répartition géographique ainsi que les liens physiques et logiques entre elles.

2.1.2. Le sous-système logique (SSL)

Ce sous-système est constitué des entités de flux (financiers, humains, matériels, produits ou matières premières) que le système doit traiter, et des ensembles des services (opérations) élémentaires concernant le traitement de ces flux.

2.1.3. Le sous-système décisionnel (SSD)

Ce sous-système est formé des règles de gestion et de pilotage des entités physiques agissant à la fois sur le sous-système physique et le sous-système logique.

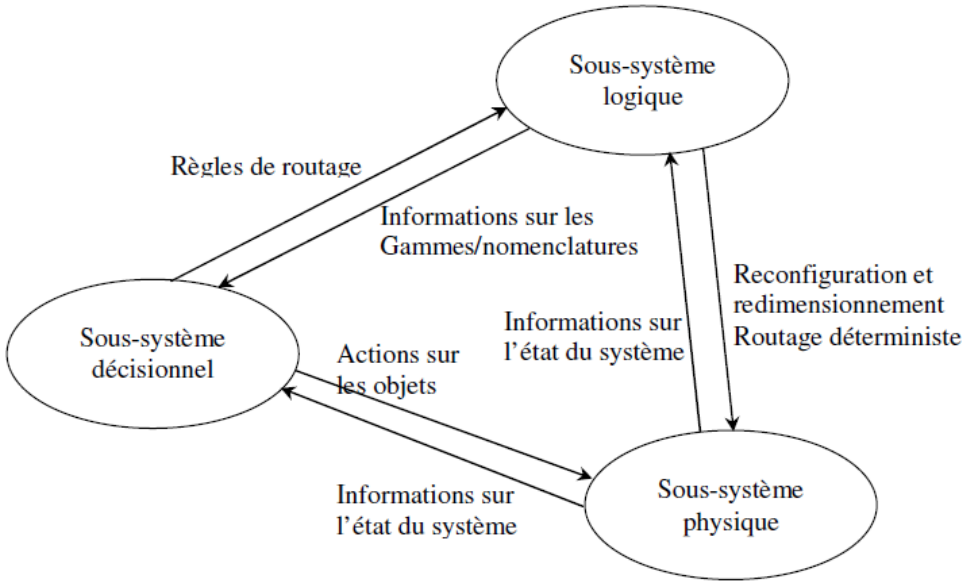

Figure 3.2 – Interaction entre SSP, SSD et SSL (Lemoine, 2008)

2.2. Conception et implémentation du modèle d'action

Après la vérification et la validation du modèle de connaissances par les acteurs du système, on procède à la traduction de ce modèle dans un formalisme mathématique ou dans un langage de programmation ou de simulation. Notons, que plusieurs modèles d'action peuvent être déduits d'un même modèle de connaissances, selon le formalisme choisi et/ou le degré de granularité souhaité (Lemoine, 2008). Ces modèles d'action seront par la suite implémentés à l'aide de la programmation informatique (cas des méta heuristiques ou des heuristiques) ou grâce à un solveur et/ou modeleur mathématique commercial (par exemple : *Xpress IVE, Gurobi, Cplex*)

pour les modèles mathématiques, ou d'un simulateur commercial (par exemple, *Witness, Arena* ou *Simul8*), pour les modèles de simulation.

3. Méthodes d'analyse multicritères floues

Comme explicité dans le chapitre 3, les méthodes d'analyse multicritères sont les méthodes les plus appropriées pour traiter notre problème de choix de localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique. L'évaluation des hubs candidats se basera principalement sur les indices des organisations mondiales et sur le jugement des experts internes. Toutefois, dans le contexte africain, l'évaluation des localisations par des experts peut être entachée d'incertitude ou d'imprécision. Le langage naturel (par des variables linguistiques comme faible, moyen, important) est souvent utilisé afin d'articuler la pensée et les perceptions subjectives des acteurs. Par conséquent, si une variable linguistique est utilisée comme étiquette pour un ensemble, les limites de l'ensemble auquel une évaluation appartient ou n'appartient pas deviendront vagues.

Pour surmonter ce problème, la logique floue sera adoptée comme cadre de modélisation globale de l'information. En effet, les nombres flous permettent d'exprimer les variables linguistiques sans perte importante d'information.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les bases fondamentales de cette théorie (§3.1) puis nous allons passer en revue les méthodes d'analyse multicritères floues les plus utilisées (§3.2). Nous allons enfin justifier notre choix et décrire la méthode ou la combinaison de méthodes choisie (s) (§3.3, §3.4).

3.1. Logique floue

La logique floue a été initiée par Lotfi Zadeh en 1965 (Zadeh, 1965) pour corriger les carences de la logique booléenne dans laquelle les propositions sont binaires : soit vraies, soit fausses, en offrant un cadre théorique de modélisation de l'imprécision applicable aux connaissances humaines subjectives. Ainsi, la logique floue permet d'aborder des problèmes dans lesquels les connaissances sont imprécises et soumises à des incertitudes de nature non probabiliste. Elle a été appliquée dans de nombreux domaines tels que l'automatique, la robotique, le traitement du signal et d'image, etc.

3.1.1. Fonction d'appartenance

La logique floue se base sur la théorie des sous-ensembles flous, qui permet d'affecter à chaque élément d'un ensemble flou une valeur représentant son degré d'appartenance à l'ensemble flou. Par exemple, un ensemble flou représentant la proposition « le jour est ensoleillé » pourrait attribuer un degré d'appartenance de 1 à une couverture nuageuse de 0%, 0,8 à une couverture nuageuse de 20%, 0,4 à une couverture nuageuse de 30%, et 0 à une couverture nuageuse de 75%.

Mathématiquement, un sous-ensemble flou $\tilde{A}$ appartenant à un ensemble classique X est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}$ qui associe chaque élément x de X à un nombre réel dans l'intervalle [0,1], comme suit :

$$\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0,1] \qquad (3.1)$$

$$x \rightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]$$

La fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}$ donne le degré d'appartenance de chaque élément x au sous ensemble flou $\tilde{A}$. Plus la valeur de $\mu_{\tilde{A}}$ (x) est grande, plus x appartient au sous-ensemble $\widetilde{A}$.

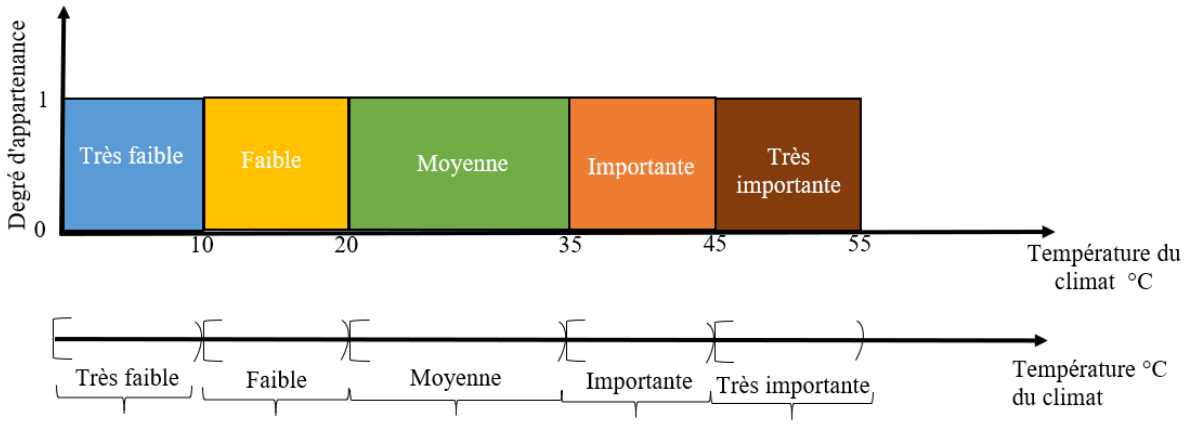

Figure 3.3 – Représentation de la température par la logique classique

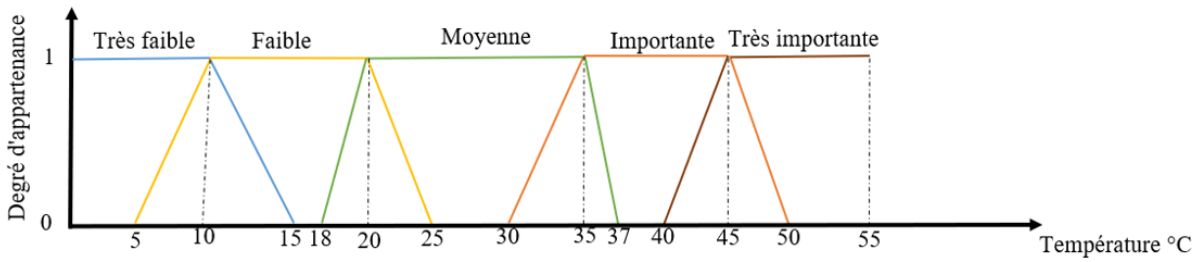

Figure 3.4 – Représentation de la température par la logique floue (Zadeh, 1965)

3.1.2. Variables linguistiques

Une variable linguistique est une variable dont la valeur est un mot ou une phrase dans une langue naturelle, utilisé pour définir un ensemble flou (Zadeh, 1965). Par exemple, on peut définir la température par cinq valeurs linguistiques : « très faible » ; « faible » ; « moyenne » ; « importante » et « très importante ». L'avantage de la logique floue est de diminuer l'influence des seuils arbitraires lorsque nous passons d'une variable linguistique à une autre (figure 3.3).

En effet, le passage est progressif et non plus brutal (figure 3.4). Chaque variable linguistique sera donc défini via une fonction d'appartenance associant à chaque température, par exemple, son degré d'appartenance à l'ensemble flou correspondant (figure 3.4).

3.1.3. Nombres flous

- *Définition 3.1: Nombre flou*

Un nombre flou $\tilde{A}$ est un sous-ensemble flou normalisé (i.e., $\exists\, x \in \mathbb{R}$ tel que $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$) convexe de fonction d'appartenance semi-continue supérieurement (i.e., pour tout niveau ε, l'ensemble des x de $\mathbb{R}$ tel que $\mu_{\tilde{A}}(x) \geq \varepsilon$ est fermé) et de support, noté $supp(\widetilde{A})$, borné (i.e. $supp(\widetilde{A}) = \{x \in \mathbb{R} | \mu_{\tilde{A}}(x) \neq 0\}$) (Bouchon-Meunier, 1995).

- *Définition 3.2: Nombre flou trapézoïdal*

Un nombre flou trapézoïdal $\widetilde{A}$ défini sur $\mathbb{R}$ peut être représenté par un quadruplet (a, b, c, d) comme illustré dans la figure 3.5. Il est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}(x)$ définie comme suit :

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a} & ; a \le x \le b \\ 1 & ; b \le x \le c \\ \dfrac{d-x}{d-c} & ; c \le x \le d \\ 0 & ; sinon \end{cases} \tag{3.2}$$

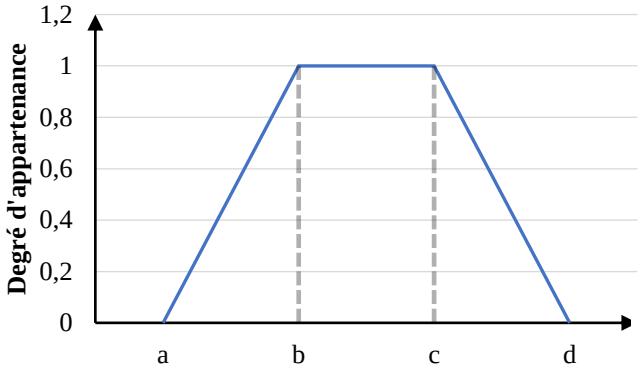

Figure 3.5 – Fonction d'appartenance d'un nombre flou trapézoïdal

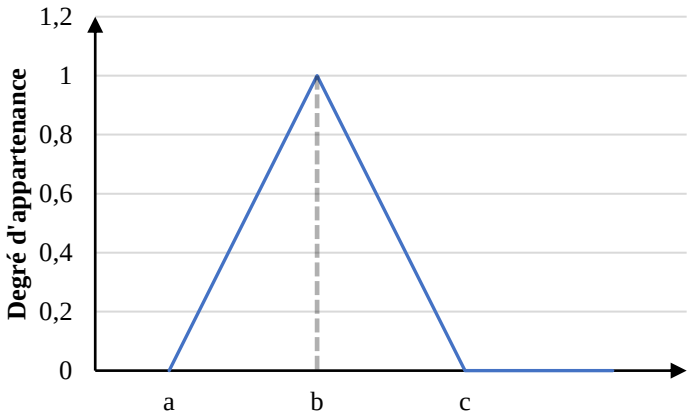

Figure 3.6 – Fonction d'appartenance d'un nombre flou triangulaire

- *Définition 4.3: Nombre flou triangulaire*

Un nombre flou triangulaire $\tilde{A}$, défini sur $\mathbb{R}$, est un nombre trapézoïdal pour lequel la valeur modale inférieure (b sur la figure 3.5) est égale à la valeur modale supérieure (c sur la même figure). Une valeur modale de $\tilde{A}$ est un élément x de $\mathbb{R}$ tel que $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$ (Bouchon-Meunier, 1995). Un nombre flou triangulaire est représenté par un triplet (a, b, c) donnant respectivement la borne inférieure, la valeur modale et la borne supérieure de l'ensemble flou, tel qu'illustré dans la figure 3.6.

Notons qu'il est possible de modéliser un nombre flou par des fonctions d'appartenance qui ne sont pas linéaires par morceaux (fonctions d'appartenance gaussiennes, en cloche, sigmoïdes, etc.). Cependant, les nombres flous trapézoïdaux ou triangulaires sont souvent utilisés en littérature et s'avèrent suffisants pour traduire la plupart des données subjectives.

3.1.4. Opérations arithmétiques floues

En logique floue, nous sommes souvent amenés à réaliser des calculs, comme le calcul de la distance entre deux nombres flous. Ces calculs font appel à des opérations arithmétiques floues. Celles-ci sont des extensions des opérations binaires appliquées à des nombres flous. Lorsqu'on considère des nombres trapézoïdaux, les opérations arithmétiques de base appliquées à deux nombres flous $\tilde{A}_1 = (a_1,\ b_1,\ c_1,\ d_1)$ et $\tilde{A}_2 = (a_2,\ b_2,\ c_2,\ d_2)$ définies dans (Chen et Chang, 2006)) sont souvent retenues :

$$\tilde{A}(+)\tilde{B} = (a_1 + a_2,\ b_1 + b_2,\ c_1 + c_2,\ d_1 + d_2) \tag{3.3}$$

$$\tilde{A}(-)\tilde{B} = (a_1 - d_2,\ b_1 - c_2,\ c_1 - b_2,\ d_1 - a_2) \tag{3.4}$$

$$\tilde{A}(\times)\tilde{B} = (a_1 \times a_2,\ b_1 \times b_2,\ c_1 \times c_2,\ d_1 \times d_2) \tag{3.5}$$

$$k \otimes \tilde{A} = (ka_1,\ kb_1,\ kc_1,\ kd_1) \tag{3.6}$$

$$-(\tilde{A}) = (-d_1,\ -c_1,\ -b_1,\ -a_1) \tag{3.7}$$

$$(\tilde{A})^{-1} = (\frac{1}{d_1},\ \frac{1}{c_1},\ \frac{1}{b_1},\ \frac{1}{a_1}) \tag{3.8}$$

De même, si nous considérons deux nombres flous triangulaires $\tilde{A}_1 = (a_1,\ b_1,\ c_1)$ et $\tilde{A}_2 = (a_2,\ b_2,\ c_2)$ les opérations arithmétiques de base de (Kaufmann et Gupta, 1988 ; Kaufmann et Gupta, 1991 ; Zimmermann, 2011), souvent retenues dans la littérature, sont :

$$\tilde{A}(+)\tilde{B} = (a_1 + a_2,\ b_1 + b_2,\ c_1 + c_2) \tag{3.9}$$

$$\tilde{A}(-)\tilde{B} = (a_1 - c_2,\ b_1 - b_2,\ c_1 - a_2) \tag{3.10}$$

$$\tilde{A}(\times)\tilde{B} = (a_1 \times a_2,\ b_1 \times b_2,\ c_1 \times c_2) \tag{3.11}$$

$$k \otimes \tilde{A} = (ka_1,\ kb_1,\ kc_1) \tag{3.12}$$

$$-(\tilde{A}) = (-c_1,\ -b_1,\ -a_1) \tag{3.13}$$

$$(\tilde{A})^{-1} = (\frac{1}{c_1},\ \frac{1}{b_1},\ \frac{1}{a_1}) \tag{3.14}$$

3.1.5. Distance euclidienne entre deux nombre flous

La distance euclidienne entre deux nombres flous $\tilde{A}_1$ et $\tilde{A}_2$, notée $d(\tilde{A}_1,\ \tilde{A}_2)$, est définie par :

$$d(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(\mu_{\tilde{A}_1}(x) - \mu_{\tilde{A}_2}(x))^2} \tag{3.15}$$

Pour les nombres flous triangulaires et les nombres flous trapézoïdaux, la valeur de n est souvent prise égale respectivement à 3 et 4. La distance entre deux nombres flous trapézoïdaux $\tilde{A}_1 = (a_1,\ b_1,\ c_1,\ d_1)$ et $\tilde{A}_2 = (a_2,\ b_2,\ c_2,\ d_2)$ est définie dans (Chen et Chang, 2006) comme :

$$d(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = \sqrt{\frac{1}{4}\sum(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2 + (d_1 - d_2)^2} \tag{3.16}$$

De même, la distance entre deux nombres flous triangulaires $\tilde{A}_1 = (a_1,\ b_1,\ c_1,\ d_1)$ et $\tilde{A}_2 = (a_2,\ b_2,\ c_2,\ d_2)$ proposée par Chen (2000) est :

$$d(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = \sqrt{\frac{1}{3}\sum(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2} \tag{3.17}$$

3.1.6. Représentation de l'α-coupe associée à un sous-ensemble flou

Soit $\tilde{A} = (a,\ b,\ c)$ un nombre flou triangulaire défini par la fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}$ telle que :

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a} & ; a \le x \le b \\ 1 & ; b \le x \le c \\ \dfrac{d-x}{d-c} & ; c \le x \le d \\ 0 & ; sinon \end{cases} \tag{3.18}$$

L'α-coupe associée à ce sous-ensemble flou $\tilde{A} = (a,\ b,\ c)$ est un sous-ensemble net (classique) de X des éléments ayant un degré d'appartenance supérieur ou égal à α : $A_\alpha = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \ge \alpha\}$ (Bouchon-Meunier, 1995).

Comme le montre la figure 3.7, la représentation *de l'*α-coupe de $\tilde{A} = (a,\ b,\ c)$ est un intervalle $[A_\alpha^L,\ A_\alpha^U]$ de niveau α défini comme suit :

$$A_\alpha^L = (b-a) \times \alpha + a \tag{3.19}$$

$$A_\alpha^U = c - (c-b) \times \alpha \tag{3.20}$$

Figure 3.7 – α-coupe associée à un nombre flou triangulaire

3.2. Revue des méthodes d'analyse multicritères floues

La prise de décision multicritères a été introduite au début des années 70, parallèlement au début de la théorie des ensembles flous (Abdullah, 2013). Les méthodes d'analyse multicritères forment une branche de la recherche opérationnelle et concurrencent les méthodes d'optimisation à critère unique. Elles sont employées pour déterminer la ou les meilleures solutions parmi un ensemble fini de solutions, connues a priori, c'est-à-dire celles offrant le meilleur compromis entre plusieurs critères et ce, en se basant sur les préférences du décideur.

Selon (Mena, 2000), ces méthodes offrent un avantage compétitif par rapport aux techniques d'optimisation à critère unique du fait que :

- *« la comparaison de plusieurs actions possibles se fait rarement suivant un seul critère ;*
- *les préférences sur un critère sont, dans bien des cas, sont difficilement modélisables par une fonction ;*
- *lorsqu'il y a plusieurs objectifs, il est impossible de les atteindre tous à la fois. »*

Ces méthodes ont été déployées pour la résolution de différents problèmes décisionnels dans des domaines divers et variés, notamment la sélection des fournisseurs, la localisation des plateformes de distribution, l'évaluation du traitement des déchets médicaux etc. (Aruldoss et al., 2013 ; Farahani et al., 2010 ; Figueira et al., 2005 ; Mardani et al., 2015).

Selon (Zavadskas et Turskis, 2011), ces méthodes peuvent être réparties en deux écoles :

a. Ecole américaine, orientée recherche opérationnelle, qui regroupe des méthodes basées sur les fonctions de valeur multi-attributs et la théorie de l'utilité multi-attributs, la méthode la plus connue étant la Méthode TOPSIS (*Technique for Order by Similarity to Ideal Solution*) : elle consiste à choisir la meilleure alternative basée sur la maximisation de la distance à une solution "idéale négative" et la minimisation de la distance à une solution "idéale positive". TOPSIS est généralement considérée comme étant facile à utiliser et a reçu une grande attention de la part des chercheurs et des praticiens (Behzadian et al., 2012).

b. Ecole européenne, qui, à l'opposé de l'école américaine, s'est éloignée de l'idée d'obtenir un optimum. Elle a développé des méthodes de sur-classement permettant de comparer les alternatives deux à deux et de classer les préférences des décideurs pour les alternatives de diverses manières, les méthodes les plus connues étant AHP, ELECTRE et PROMETHEE.

    - Méthode AHP (*Analytical Hierarchy Process)* : cette méthode utilise des comparaisons par paires basées sur le jugement d'experts pour dériver des échelles de priorité entre les critères (Saaty, 2008). Dans un deuxième temps, des priorités numériques sont calculées pour chaque alternative de décision. La méthode a été largement utilisée dans la littérature de la localisation des plateformes, pour l'allocation des ressources, les prévisions, etc. (Russo et Camanho, 2015) ;

- Méthode ELECTRE (I, II, III) (Elimination et Choix Exprimant la Réalité) (Roy, 1990) : ces méthodes sont basées sur le principe de comparaison de paires d'alternatives, soit pour la sélection d'un sous-ensemble d'alternatives offrant le meilleur compromis possible (ELECTRE I), soit pour la classification des alternatives sur la base d'un indice de concordance et de discordance (ELECTRE II, III) (voir la revue de littérature de (Govindan et Jepsen, 2016) ;
- Méthode PROMETHEE (I, II) (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) (Brans et Mareschal, 2005) : ces méthodes classent les alternatives candidates de la meilleure à la pire, sur la base d'une comparaison par paires des alternatives par rapport à chaque critère, de manière soit partielle (PROMETHEE I) soit complète (PROMETHEE II). Elles ont été appliquées à de nombreux problèmes de la vie réelle (voir la revue de littérature de (Behzadian et al., 2010)).

Comme de nombreux problèmes de décision impliquent des informations ou des préférences imprécises, l'utilisation de la logique floue a été suggérée dans toutes les méthodes de MCDM (Kahraman, 2008). La méthode AHP a été largement utilisée dans les études précédentes, en particulier lorsque le nombre total de critères est faible (Aruldoss et al., 2013). Elle est souvent adoptée comme méthode de pondération des critères, et est alors combinée avec d'autres techniques d'aide à la décision multicritères, comme ELECTRE (Ka, 2011) ou TOPSIS (Wang et Liu, 2007), utilisées pour calculer le score final des alternatives. Toutefois, l'utilisation d'AHP comme méthode d'analyse multicritères présente quelques limites, notamment : 1) si le nombre d'alternatives et/ou de critères est important, la comparaison par paires de critères devient difficile à réaliser et le risque d'incohérence croit du point de vue du jugement de l'expert. 2) la modification des évaluations lors de l'introduction de nouvelles alternatives est difficile et prend du temps. 3) il y a un risque de perdre des détails sur des informations importantes en cours de calcul, à cause du système d'agrégation additive qui favorise la compensation des bons scores d'alternatives par rapport à certains critères et les mauvais scores par rapport à d'autres critères.

D'autre part, la classification des alternatives basées sur ELECTRE ou PROMETHEE nécessite d'évaluer une fonction de préférence pour PROMETHEE et une matrice de discordance et de concordance pour ELECTRE, ce qui peut être complexe. De plus, le nombre d'alternatives retenues dépend implicitement des seuils de concordance et de discordance (pour ELECTRE)

ou des seuils de la fonction de préférence pour PROMETHEE. Au contraire, TOPSIS (Wang et Liu, 2007) ou TOPSIS floue (Chen, 2000) ont souvent été sélectionnées en raison de leur flexibilité et de leur facilité d'utilisation même avec un nombre élevé de critères (Behzadian et al., 2012). Cependant, elles exigent la définition préalable des poids des critères, chose qui peut être facilité par AHP. C'est pourquoi, dans le cadre de notre thèse, nous allons appliquer TOPSIS floue pour l'évaluation des localisations des hubs logistiques régionaux et la combiner avec AHP pour pondérer les critères.

3.3. Description des méthodes choisies

3.3.1. TOPSIS floue

Le principe de base de cette méthode est la recherche de l'alternative dont la distance à la solution idéale positive (i.e. meilleure sur tous les critères) est la plus petite et la distance à la solution idéale négative, ou anti-idéale, (i.e. qui est la plus mauvaise sur tous les critères) est la plus grande (Hwang et Yoon, 1981). Plus concrètement, nous considérons par exemple cinq possibilités A, B, C, D et E qui seront évaluées par rapport à deux critères C_1 et C_2, en considérant des poids égaux. Les solutions idéales et anti-idéales sont explicitées sur la figure 3.8. En se basant sur la distance euclidienne habituelle, nous pouvons constater que le point C est le plus proche de la solution idéale, tandis que le point D est le plus écarté de la solution anti-idéale. Pour lever le dilemme de choix entre C et D, dans cet exemple, TOPSIS/TOPSIS floue défini pour chaque alternative une distance pondérée à la solution idéale et à la solution anti-idéale (Méndez et al., 2009 ; Pomerol et Barba-Romero, 1993).

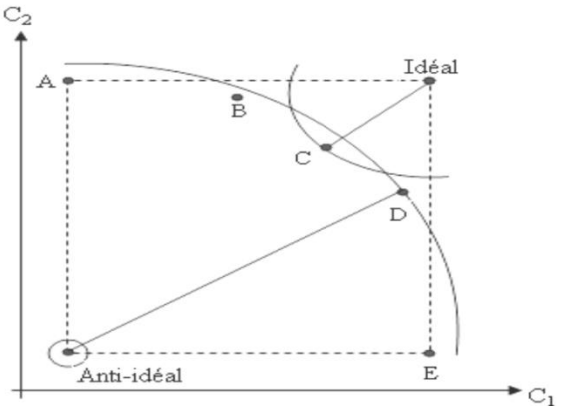

Figure 3.8 – Illustration du concept des distances à l'idéal et à l'anti-idéal (Méndez et al., 2009)

A la différence de TOPSIS classique, dans laquelle toutes les évaluations et les poids des critères sont supposés connus avec précision et sont modélisés avec des nombres réels précis, TOPSIS floue permet de modéliser des évaluations et des poids des critères par des valeurs floues. TOPSIS floue reprend les mêmes étapes de TOPSIS, à la différence que les valeurs impliquées dans le calcul sont floues. Elle consiste en six étapes principales :

- ***Etape 1 : construction de la matrice de décision floue pondérée***

Soit *m* alternatives A_i(*i=1,.., m*) évaluées en utilisant *n* critères C_j (*j=1,.., n*), ce qui conduit à la matrice de décision D (3.21) où x_{ij} est une valeur linguistique représentant l'évaluation de l'alternative « i » par rapport au critère « j ». Chaque évaluation est ensuite traduite en un nombre flou en utilisant une échelle spécifique, ce qui donne une matrice de décision floue (3.22). Rappelons qu'une matrice est qualifiée de "floue" si elle comprend au moins une entrée floue (Buckley, 1985). Pour pondérer cette matrice $\widetilde{D}$, on la multiple par le vecteur des poids des critères W= [w_1, w_2, ..., wn] (3.23).

$$D = \begin{array}{c|cccc} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ A_2 & x_{21} & x_2 & & x_{2n} \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{array} \quad (3.21)$$

$$\widetilde{D} = \begin{array}{c|cccc} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ A_2 & \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & & \tilde{x}_{2n} \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_m & \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{array} \quad (3.22)$$

$$\tilde{x}_{ij} = \check{r}_{nij} \otimes w_j \quad (3.23)$$

- ***Etape 2 : construction de la matrice de décision floue normalisée***

Les critères peuvent être évalués selon différentes échelles. La normalisation permet de les considérer sur une échelle similaire, de sorte que leur importance relative n'est exprimée que par leur poids. Ainsi, les valeurs normalisées seront incluses dans l'intervalle [0, 1]. Le calcul de la normalisation dépend de l'orientation du critère, i.e. si un critère est un critère de coût (à

minimiser, ensemble C) ou un critère de bénéfice (à maximiser, ensemble B). La matrice de décision floue normalisée est définie comme suit :

$$\widetilde{D} = \left[\tilde{r}_{i,j}\right]_{m*n} i=1,..,\ m\ et\ j=1,..,\ n \tag{3.24}$$

- Dans le cas où les évaluations des alternatives dans la matrice $\widetilde{D}$ sont données sous la forme des nombres flous triangulaires $\tilde{x}_{ij}$= (a_{ij},b_{ij}, c_{ij}), les valeurs normalisées seront calculées de la manière suivante :

  $\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+}\right)$ si le critère C_j est de type bénéfice ($C_j \in B$). (3.25)

  $\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}}\right)$ si le critère C_j est de type coût ($C_j \in C$). (3.26)

  Avec $c_j^+ = \max_i c_{ij}$ et $a_j^- = \min_i a_{ij}$.

- Pour des nombres flous trapézoïdaux $\tilde{x}_{ij}$= (a_{ij},b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}), les valeurs normalisées sont déterminées comme suit :

  $\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{d_j^+}, \frac{b_{ij}}{d_j^+}, \frac{c_{ij}}{d_j^+}, \frac{d_{ij}}{d_j^+}\right)$ si le critèreC_j est de type bénéfice ($C_j \in B$). (3.27)

  $\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{d_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}}\right)$ si le critère C_j est de type coût ($C_j \in C$). (3.28)

  Avec $d_j^+ = \max_i d_{ij}$ et $a_j^- = \min_i a_{ij}$.

- ***Etape 3 : construction de la matrice de décision floue pondérée***

La matrice floue pondérée est calculée en multipliant les valeurs de la matrice de décision floue normalisée par les poids des critères d'évaluation comme suit :

$$\tilde{V} = \left[\tilde{v}_{i,j}\right]_{m*n} i=1,..,\ m\ et\ j=1,..,\ n \tag{3.29}$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \otimes \tilde{w}_j \tag{3.30}$$

- ***Etape 4 : détermination de la solution idéale FPIS et la solution anti-idéale FNIS***

La solution idéale positive floue FPIS (*Fuzzy Positive Ideal Solution*) notée A^+et la solution idéale négative floue FNIS (*Fuzzy Negative Ideal Solution*) notée A^-sont données par :

$$A^+ = (\tilde{v}_1^+ , \tilde{v}_2^+ , \dots , \tilde{v}_n^+) \tag{3.31}$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^- , \tilde{v}_2^- , \dots , \tilde{v}_n^-) \tag{3.32}$$

Pour des nombres flous triangulaires : $\tilde{v}_j^+ = \max_i \tilde{v}_{ij3}$ et $\tilde{v}_j^- = \min_i \tilde{v}_{ij1}$; *i=1,.., m* et *j=1,.., n.*

Pour des nombres flous trapézoïdaux : $\tilde{v}_j^+ = \max_i \tilde{v}_{ij4}$ et $\tilde{v}_j^- = \min_i \tilde{v}_{ij1}$; *i=1,.., m* et *j=1,.., n.*

- ***Etape 5 : détermination des distances de chaque alternative par rapport FPIS et FNIS***

La distance de chaque alternative A_i par rapport à *FPIS* et à *FNIS* est donnée par *:*

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^{n} d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), i = 1, .., m \quad (3.33)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^{n} d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), i = 1, \dots, m \quad (3.34)$$

La distance entre deux nombres flous est calculée en utilisant l'équation (3.17).

- ***Etape 6 : calcul des coefficients de proximité des alternatives***

Cette étape consiste à associer à chaque alternative A_i un coefficient de proximité, ou coefficient de rapprochement au profil idéal (« *Closeness Coefficient* » : CC_i), calculé en se basant sur les distances d_i^+ et d_i^- comme suit :

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, i = 1, .., m. \quad (3.35)$$

Les alternatives sont ensuite classées en fonction des valeurs décroissantes des CC_i. L'alternative ayant le plus grand coefficient de proximité sera le meilleur choix.

3.3.2. AHP

La particularité de AHP est qu'elle structure le problème décisionnel selon une hiérarchie transparente et facile à parcourir, généralement sous forme d'un arbre. Cela se fait selon une approche descendante, en partant du sommet en définissant l'objectif global jusqu'aux différents critères et sous-critères formant un ensemble homogène. Les alternatives de décision sont fixées au dernier niveau de la structure (i.e. points terminaux des branches de l'arbre). En général, la partie d'AHP s'intéressant aux poids des critères s'articule autour de trois étapes : construction de la matrice de comparaison de paires, agrégation des poids finaux et vérification de la cohérence (Saaty, 2008).

- ***Etape1 : construction de la matrice de comparaison de paires de critères***

Après avoir défini la structure hiérarchique construite, cette étape consiste à déterminer l'importance relative de chaque critère par rapport aux autres critères appartenant à la même branche. La comparaison par paires indique dans quelle mesure un critère est plus ou moins

important pour un autre critère. Notez que comme nous avons n critères, le nombre de comparaisons par paires à construire est $\frac{n\,(n-1)}{2}$.

Dans sa version la plus complète, on établit également la matrice de comparaison par paires des alternatives, mais comme nous l'avons expliqué, nous allons seulement utiliser AHP comme méthode de pondération. C'est pourquoi, nous n'allons expliquer que la démarche d'élaboration de la matrice de comparaison de paires de critères.

Soit A la matrice de comparaison par paires dont les lignes donnent les ratios de pondération de chaque critère par rapport à tous les autres critères de la même branche. Chaque ratio a_{ij} est obtenu en comparant l'importance du critère « i » au critère « j » à l'aide d'une échelle qualitative (tableau 3.1). Ainsi, si $a_{ij} > 1$, alors le critère « i » est plus important que « j ». Si deux critères ont la même importance, alors $a_{ij} \times a_{ji} = 1$. Les matrices de comparaison par paire se présentent sous la forme :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & \cdots & w_1/w_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \tag{3.36}$$

Où w_j est le poids relatif du critère j.

Soit $w = [w_1, w_2, w_3, \ldots, w_n]$ le vecteur de pondération des critères. Selon Saaty (2008), w correspond au vecteur propre de A. Pour déterminer w, nous devons résoudre l'équation (3.37). Celle-ci peut s'écrire : $A.w = n.w$ et est donc équivalente à : $(A - n.I).w = 0$

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

Selon Saaty (2008), l'équation 3.38 a une solution non nulle si n est une valeur propre de A. Cependant, puisque A est de rang 1, parce que chaque rangée est un multiple constant de la première rangée, toutes ses valeurs propres sont égales à zéro sauf une. De plus, comme la solution w est n'importe quelle colonne de A, cela conduit à diverses solutions qui diffèrent par une constante multiplicative. Ainsi, pour rendre w unique, on le normalise comme suit :

$$w_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} \bar{a}_{ik}}{n} \text{ avec } \bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n} a_{kj}} \quad (3.38)$$

Tableau 3.1 – L'échelle de comparaison basée de l'échelle de (Saaty, 2008)

Valeur de aij	Interprétation
1	Les critères i et j sont d'égale importance
2	Le critère i est légèrement plus important que le critère j
3	Le critère i est plus important que le critère j avec
5	Le critère i est plus important que le critère j.
7	Le critère i est fortement plus important que le critère j.
9	Le critère i est absolument plus important que le critère j.

- ***Etape 2 : agrégation des poids***

Après avoir calculé toutes les matrices de comparaison par paires de critères, nous calculons le poids final d'un critère élémentaire en multipliant son poids élémentaire par le poids du critère parent selon une approche ascendante, jusqu'à atteindre le premier critère de la branche.

Tableau 3.2 – L'échelle de comparaison basée de l'échelle de (Saaty, 2008)

n	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53

- ***Etape 3 : vérification de la cohérence***

Enfin, pour être certain de la consistance de l'évaluation, nous calculons l'indice de cohérence comme suit :

- Tout d'abord, on calcule la valeur propre λ_{max} de chaque matrice en résolvant l'équation A.w = λ_{max}. w, où w est le vecteur propre ;
- Ensuite, on calcule l'indice de cohérence pour chaque matrice d'ordre n CI = (λ_{max}-n) /(n-1) ;
- Enfin, on calcule le rapport de cohérence CR = CI/RI, où RI est un indice de cohérence aléatoire connu selon l'ordre de la matrice (tableau 3.2).

4. Méthodes d'optimisation multi-objectifs

La plupart des problèmes d'optimisation réels impliquent différents objectifs d'optimisation souvent conflictuels qu'il faut prendre en compte simultanément. Dans notre problème de conception de réseaux de distribution hybrides par exemple, il faut trouver un compromis entre la minimisation des coûts, la maximisation de la proximité des stocks aux marchés et la minimisation des dommages impactant les produits durant la distribution finale. L'optimisation multi-objectifs, à la différence de l'optimisation à objectif unique, permet de proposer la solution ou l'ensemble de solutions (au sens de Pareto) offrant le meilleur compromis entre ces objectifs.

Dans ce qui suit, avant de passer en revue les méthodes d'optimisation multi-objectifs (§4.2) et de décrire la méthode que nous avons retenue (§4.3), nous allons présenter quelques définitions théoriques.

4.1. Définitions et cadre théorique

4.1.1. Problème d'optimisation multi-objectifs

Un Problème d'Optimisation Multi-objectifs (POM) peut être formulé comme suit :

$$Min / Max\ \mathrm{f(x)} = (\mathrm{f}_1(x), f_2(x), ..., f_k(x))^T \tag{3.39}$$

Sous contraintes :

$$g_i(\mathrm{x}) \leq 0,\ \mathrm{i} = 1,2,...,\mathrm{m} \tag{3.40}$$

$$h_j(\mathrm{x}) \leq 0,\ \mathrm{j} = 1,2,...,\mathrm{n} \tag{3.41}$$

Avec k qui représente le nombre des fonctions à optimiser (minimiser ou maximiser), m le nombre des inégalités et n est le nombre de contraintes d'égalité. $x = (x_1, x_2, ..., x_e)$ est le vecteur des variables de décisions.

4.1.2. Notion de dominance

- *Définition 3.4 : faible dominance*

Une solution $x=(x_1, x_2,..., x_e)$ domine faiblement une solution $y=(y_1, y_2,..., y_e)$, au sens de Pareto, si et seulement si $\forall i \in 1,2,...,e \mid f_i(x) \leq f_i(y)$. Dans ce cas on écrit $x \leq y$ (Miettinen, 1999).

- *Définition 3.5 : dominance*

Une solution $x=(x_1, x_2,..., x_e)$ domine une solution $y=(y_1, y_2,..., y_e)$, au sens de Pareto, si et seulement si $\forall i \in 1,2,...,e \mid f_i(x) \leq f_i(y)$ et $\exists j \in 1,2,...,e \mid f_i(x) \prec f_i(y)$. Dans ce cas on écrit $x \prec y$ (Miettinen, 1999).

4.1.3. Optimalité de Pareto

Contrairement à l'optimisation à objectif unique, dans l'optimisation multi-objectifs, il n'y a pas de solution globale unique, mais il existe un ensemble de solutions qui crée des solutions optimales de Pareto. Les solutions optimales de Pareto sont des solutions non dominées, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'autre solution qui améliorerait un objectif sans provoquer une détérioration d'un autre (Deb, 2001).

Soit P un ensemble de solutions candidates d'un POM. Une solution $x=(x_1, x_2,..., x_e)$ est dite Pareto-optimale s'il n'existe aucune autre solution $y=(y_1, y_2,..., y_e)$ telle que $y \prec x$ (Miettinen, 1999).

4.1.4. Vecteur objectif idéal et vecteur objectif Nadir

Soit P un ensemble de solutions candidates d'un POM. Le vecteur objectif idéal $y^*=(f_1^*, f_2^*,..., f_k^*) \notin P$ (i.e. solution idéale) est obtenu en optimisant séparément chaque fonction objectif. Comme le montre la figure 3.9 où les deux fonctions sont à minimiser, y* n'appartient pas à l'espace objectif réalisable. Sur cette figure, y* comprend les bornes inférieures (respect. supérieures) de chaque objectif dans l'espace faisable. Par ailleurs, le

vecteur objectif Nadir, ou solution anti-idéale, est formé des bornes supérieures de chaque objectif dans l'espace faisable (figure 3.9).

En pratique, le vecteur de Nadir est déterminé le plus souvent à partir de la table de gain (« *payoff table* ») dont la diagonale représente les solutions optimales des optimisations individuelles des fonctions objectifs.

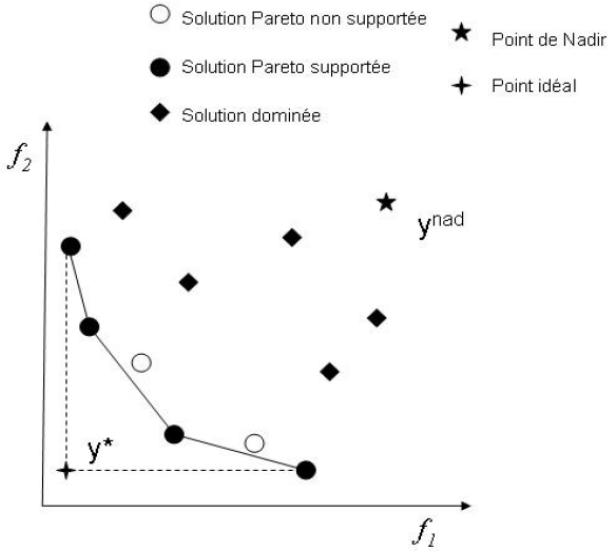

Figure 3.9 – Représentation du front de Pareto, point idéal et point Nadir (Alaya, 2009)

4.1.5. Table de gain « payoff table » basée sur l'optimisation lexicographique

Selon Mavrotas (2009), la meilleure façon pour déterminer cette table de gains est de se baser sur l'optimisation lexicographique, i.e. de faire une série d'optimisation individuelles.

Nous considérons un problème bi-objectif (f_1, f_2). L'élaboration de cette table peut être effectuée comme suit (cf. tableau 3.2) :

- Le nombre de colonnes ou de lignes correspond au nombre de fonction objectives ;
- On optimise chaque fonction individuellement et on inscrit la solution obtenue en diagonale (f_1* en première ligne, f_2* en deuxième ligne) ;
- Au niveau de la 2ème colonne de la 1ère ligne, on optimise f_2 en rajoutant une nouvelle contrainte au problème $f_1 = f_1$* ;
- De même, à la 1ère colonne, on inscrit la solution d'optimisation de f_1 sachant que $f_2 = f_2$*.

Pour illustrer, nous considèrons le POM suivant dont la table de gain correspond au tableau 3.3 :

$$Max\ f_1 = 3x_1 + 4x_2 \quad (3.42)$$

$$Max\ f_2 = x_1 \quad (3.43)$$

Sous contraintes :

$$x_1 \geq 20 \quad (3.44)$$

$$5x_1 + 4x_2 \leq 200 \quad (3.45)$$

Tableau 3.3 – Exemple de table de gain basée sur l'optimisation lexicographique

	f_1	f_2
Max f_1	160 (solution optimale de la maximisation de f_1)	20
Max f_2	120	40 (solution optimale de la maximisation de f_2)

4.2. Revue de littérature sur les méthodes d'optimisation multi-objectifs

En littérature, il existe diverses méthodes d'optimisation multi-objectifs. (Marler et Arora, 2004) regroupent ces techniques en fonction de l'implication du décideur dans le processus de résolution du problème, selon trois catégories :

- Les méthodes « *a priori* » : ces méthodes impliquent le décideur au début du processus d'optimisation. Il doit préciser ses préférences, qui peuvent être articulées en termes de buts ou d'importance relative de différents objectifs. La plupart de ces méthodes intègrent des paramètres, qui sont des buts, des poids, etc.
- Les méthodes *interactives* : ces méthodes impliquent le décideur durant le processus d'optimisation pendant lequel il doit interagir avec l'algorithme de résolution du problème, jusqu'à ce qu'il converge vers les solutions qui lui semblent préférables.
- Les méthodes « *a posteriori* » : à la différence des autres techniques, ces méthodes n'impliquent le décideur qu'à la fin de l'optimisation pour sélectionner les solutions en fonction de ses préférences.

Par ailleurs, ces techniques peuvent également être classées en fonction de la façon de traiter les fonctions objectifs, selon deux classes (Alaya, 2009) :

- La classe de méthodes transformant le problème multi-objectifs en un problème à objectif unique. Ces méthodes fournissent une solution optimale unique en utilisant notamment des méthodes d'agrégation ;
- La classe de méthodes fournissant un ensemble de solutions Pareto optimales. Celles-ci sont divisées en deux sous-classes :
    - Les méthodes Pareto : celles-ci utilisent directement la notion de dominance au sens de Pareto pour la sélection des solutions générées.
    - Les méthodes non Pareto : celles-ci optimisent séparément les fonctions objectifs.

En ce qui nous concerne, nous souhaitons poursuivre la revue des méthodes appartenant à la première classification. En effet, il nous parait important de sélectionner des méthodes en fonction de l'implication du décideur. Notre partenaire doit être impliqué dans le processus d'optimisation. Parmi les trois catégories présentées, nous optons pour les méthodes *a posteriori* pour les raisons suivantes :

- En adoptant les méthodes « *a priori* », il sera difficile à notre partenaire de quantifier précisément et avec ces certitudes ses préférences avant l'optimisation. De plus, plusieurs décideurs sont impliqués dans la prise de décision alors que ces méthodes n'offrent pas la possibilité de fixer des préférences multi-décideurs ;
- En adoptant les méthodes interactives, notre partenaire n'aura pas une vue holistique de l'espace des solutions ;
- Les méthodes « *a posteriori* » permettront au décideur d'accéder à toutes les solutions possibles. Ainsi, elles garantissent qu'aucune bonne solution ne sera manquée.

Parmi les méthodes « *a posteriori* » les plus utilisées en littérature (Mavrotas, 2009), nous citons la méthode « *ε-constraint* » et la méthode de somme pondérée (« *weighted sum method* »). Ces méthodes convertissent un problème d'optimisation multi-objectifs en un problème d'optimisation à objectif unique (« *Single Optimisation Problem – SOP* »), qui peut ensuite être résolu par une méthode appropriée pour trouver une solution optimale de Pareto :

une série de problèmes de SOO devra être résolue pour trouver l'ensemble des solutions optimales de Pareto (Pandu, 2016).

4.2.1. Méthode de somme pondérée « Weighted Sum (WS) method »

Cette méthode peut utiliser les deux approches présentées dans la partie précédente : *« a priori »*, en fournissant une solution unique qui reflète les préférences du décideur représentées par un ensemble de pondérations, et « *a posteriori* », en fournissant un ensemble de solutions avec des préférences définies après l'optimisation (Jubril, 2012).

La méthode propose de bâtir une combinaison linéaire ou convexe des objectifs $f_i(x)$, $i = 1, 2..., k$. Chacun des objectifs $f_i(x)$ est multiplié par un facteur de poids normalisé w_i et le produit ajouté pour donner l'objectif scalaire $\phi(x, w_i)$ comme suit :

$$\phi(x, w) = \sum_{i=1}^{k} w_i f_i(x) \tag{3.46}$$

Avec n représentant le nombre de fonction objectifs, $\sum_{i=1}^{k} w_i = 1$ et $w_i \succ 0,\ i = 1, 2, ..., k$

4.2.2. Méthode ε-constraint

Cette méthode a été introduite par (Haimes et Wismer, 1971). Son principe consiste à sélectionner une des fonctions objectifs pour l'optimiser, et à transformer les autres fonctions en de nouvelles contraintes d'inégalité, en spécifiant leur seuil de satisfaction ε_n. Le problème d'optimisation multi-objectifs (cf 3.39 - 3.41) peut alors être traduit comme suit :

$$Min / Max\ f_u(\mathrm{x}) \tag{3.47}$$

Sous contraintes :

$$f_h(\mathrm{x}) \leq \varepsilon_h,\ \mathrm{h} = 1,2,...,\mathrm{k} | \mathrm{k} \neq \mathrm{u} \text{ et } \varepsilon_h \succ 0 \tag{3.48}$$

$$g_i(\mathrm{x}) \leq 0,\ \mathrm{i} = 1,2,...,\mathrm{m} \tag{3.49}$$

$$h_j(\mathrm{x}) = 0,\ \mathrm{j} = 1,2,...,\mathrm{n} \tag{3.50}$$

Pour bien déployer cette méthode, comme recommandé par Mavrotas (2009), il faut définir les domaines de variation de chacune des fonctions objectifs, ou au moins de *n-1* fonctions

objectifs, ce qui permet de définir les ε_h . Pour ce faire, il a recommandé d'élaborer une table de gain basée sur l'optimisation lexicographique (comme défini dans la sous-section §4.1.5). Ensuite, on divise chaque intervalle de chaque fonction objectif en p intervalles égaux dont les p+1 points extrémités (i.e. points de grille) définissent les valeurs de ε_h .

4.2.3. Synthèse

Les deux méthodes WS et *ε-constraint* sont couramment utilisées en littérature en raison de leur simplicité et donc de leur facilité d'utilisation. Cependant, *ε-constraint* présente pour nous plusieurs avantages par rapport à la méthode WS (Mavrotas, 2009), notamment :

- il est difficile de définir les vecteurs de poids pour obtenir une solution Pareto-optimale dans une région souhaitée dans l'espace objectif si on adopte WS ;
- dans WS, les fonctions objectifs ne sont pas de même échelle. Ceci a une forte influence sur les résultats obtenus. Par conséquent, nous devons normaliser les fonctions objectifs avant d'effectuer leur somme pondérée. Ceci ce n'est demandé par la méthode *ε-constraint* ;
- un autre avantage de la méthode *ε-constraint* est que nous pouvons contrôler le nombre de solutions efficaces générées en ajustant correctement le nombre de points de grille dans chacune des plages des fonctions objectifs. Cela n'est pas si facile si l'on utilise la méthode WS.

Pour les raisons présentées ci-dessus, notre choix s'est porté sur l'application de la méthode *ε-constraint* pour résoudre le problème de conception de réseaux de distribution hybrides qui sera étudié dans les deux chapitres 5 et 6. Le principal inconvénient de *ε-constraint* est le fait qu'elle nécessite plus de temps de calcul s'il y a beaucoup de fonctions objectifs. Cette limite ne va toutefois pas nous influencer, car nous n'avons que trois fonctions objectifs.

5. Méthodes d'optimisation sous incertitude

5.1. Revue de littérature sur les méthodes d'optimisation sous-incertitude

Comme la conception de réseaux de distribution hybrides doit être adaptée aux conditions futures incertaines de distribution dans les marchés africains, il est souhaitable de prendre en compte les incertitudes dans la phase de conception des réseaux.

Le plus souvent, les incertitudes peuvent être modélisées soit par des distributions de probabilités à partir de l'historique des données (optimisation stochastique), soit par un ensemble de scénarios utilisant différentes instanciations des paramètres du problème (optimisation robuste) (Snyder, 2006).

L'objectif de l'optimisation stochastique comme de l'optimisation robuste est de trouver une solution qui fonctionnera bien sous n'importe quelle combinaison possible des paramètres incertains. La définition d'un "bon fonctionnement"" varie toutefois d'une application à une autre, et le choix d'une mesure de performance appropriée fait partie du processus de modélisation (Synder, 2006).

5.1.1. Optimisation stochastique

Les techniques d'optimisation stochastique supposent que les paramètres du problème sont des variables aléatoires dont la loi de probabilité est prédéfinie. La fonction objectif peut concerner la minimisation ou la maximisation de l'espérance d'une ou plusieurs grandeurs (par exemple, la minimisation de l'espérance du coût ou la maximisation du profit attendu du système) ou la minimisation / maximisation de la probabilité d'un ou plusieurs évènements (par exemple, maximisation de la probabilité que la solution soit "bonne"). A partir de là, la définition de la fonction objectif et des données stochastiques du modèle nécessite des informations pour quantifier la probabilité associée à chaque variable et/ou paramètre.

Dans notre contexte d'étude, il semble pratiquement impossible de recueillir ces informations, du fait de l'évolution continue du contexte (marchés émergents et infrastructures en pleine évolution). Les techniques d'optimisation robuste diminuent cette difficulté. C'est pourquoi, nous allons nous focaliser dans cette revue de littérature sur les techniques d'optimisation robuste.

5.1.2. Optimisation robuste

Depuis les études de (Gupta et Rosenhead, 1968), les anciennes techniques d'optimisation robuste avaient pour objet de trouver des solutions flexibles dans un contexte incertain. Ces solutions peuvent facilement être modifiées pour s'adapter aux différentes réalisations possibles. Récemment, de nouvelles techniques se sont davantage concentrées sur la recherche de solutions capables de résister aux aléas (Roy, 2010 ; 2002).

Les méthodes d'optimisation robuste nécessitent la définition d'un ensemble de scénarios représentant des réalisations possibles des paramètres incertains, et d'une mesure de robustesse.

Les modèles d'optimisation robuste les plus courants sont le modèle de minimisation du coût maximal « *min max cost* » et le modèle de minimisation du regret maximal « *min max regret* »

- Le modèle « *min max cost* » :

Ce modèle a été introduit par (Kouvelis et Yu, 1997) et considère comme fonction objectif la minimisation du coût maximum parmi tous les scénarios. Celle-ci se définit comme suit :

$$z_A = \min_{x \in A}(\max_{s \in S}(f_s(x))) \tag{3.52}$$

Avec :

- S : l'ensemble fini des scénarios ;
- A : un ensemble fini de solutions réalisables ;
- $f_s(x)$: le coût de la solution x sur le scénario s.

Cette mesure de robustesse (i.e. fonction objectif) est très conservative. Elle se focalise principalement sur le scénario de pire cas. De plus, elle peut générer des solutions assez médiocres pour des scénarios autres que celui de coût maximum. Ainsi, il n'y a aucune garantie que la solution trouvée soit meilleure sur les scénarios de plus faible coût (Synder, 2006).

- Le modèle de regret minimal « *min max regret* » :

Il a été proposé plus tard par les mêmes auteurs (Kouvelis et Yu) qui s'intéressaient à l'évaluation du regret d'une solution, définie comme la différence (absolue ou en pourcentage) entre le coût d'une solution dans un scénario donné et le coût de la solution optimale pour ce scénario. Cela permet donc à chaque scénario d'avoir la même importance dans la solution finale. Le regret est parfois décrit comme une perte d'opportunité : la différence entre la qualité d'une stratégie donnée et la qualité de la stratégie qui aurait été choisie si l'on avait su ce que l'avenir nous réservait.

La fonction objectif de ce modèle se définit en général comme suit :

$$z_A = \min_{x \in A}(\max_{s \in S}(f_s(x) - f^*_s(x))) \tag{3.53}$$

Avec :

- S : l'ensemble fini de scénarios ;
- A : un ensemble fini de solutions réalisable ;
- $f_s(x)$: le cout de la solution x sur le scénario s ;
- $f^*_s(x)$: le cout de la solution optimale sur le scénario s ;
- $R(x,s) = f_s(x) - f^*_s(x)$ le regret de la solution x par rapport au scénario s.

En général, ces problèmes sont résolus à l'aide d'algorithmes spécifiques. Cependant, Mausser et Laguna ont proposé des algorithmes généraux pour les programmes linéaires de regret minimal absolu (Mausser et Laguna, 1998) et pour les problèmes de regret minimal relatif (Mausser et Laguna, 1999).

La stratégie générale de ces algorithmes peut être décrite comme suit :

1. Tout d'abord, il faut trouver une solution candidate *x* correspondant à un scénario s ;
2. On calcule le regret maximum de la solution *x* sur l'ensemble des scénarios, si la solution x est choisie.
3. On garde la solution si le regret maximum est plus faible, sinon :
4. On génère une nouvelle solution et on recommence les trois premières étapes.

La difficulté de la deuxième étape dépend du type des scénarios (discrets ou continus). Si le nombre de scénario est fini, il suffit de calculer le regret sur l'ensemble des scénarios. En revanche, dans le cas de scénarios appartenant à des intervalles, calculer le regret maximum est beaucoup plus compliqué.

5.2. Synthèse

Nous avons choisi le modèle de regret minimal dans lequel les regrets seront calculés sur des scénarios discrets d'évolution de la demande. Comme la demande des marchés africains devient très peu prévisible en avançant dans l'horizon de planification, on sera amené à générer plusieurs scénarios, ce qui compliquera notre démarche. Pour remédier à ce problème, nous avons décidé de découper notre horizon de planification en sous-horizons, en procédant à une planification à horizon glissant. A chaque pas d'optimisation, nous générons un ensemble réduit

de scénarios d'évolution de la demande sur le sous-horizon de planification en cours. La planification à horizon glissant a été appliquée dans la planification de la production (Sahin et al., 2013). Elle consiste à mettre à jour régulièrement les décisions à mesure que de nouvelles données deviennent disponibles (figure 3.10). A la première itération, la planification est lancée sur la base de prévisions des demandes qui sont certaines au début (sur un horizon dit "gelé" HG^0) puis avec une incertitude croissante sur l'horizon de planification HP^0. A la fin de cette itération, les plans correspondant à HG^0 sont mis en œuvre, puis une nouvelle optimisation est lancée sur la base de la nouvelle demande prévue sur un nouvel horizon de planification HP^1.

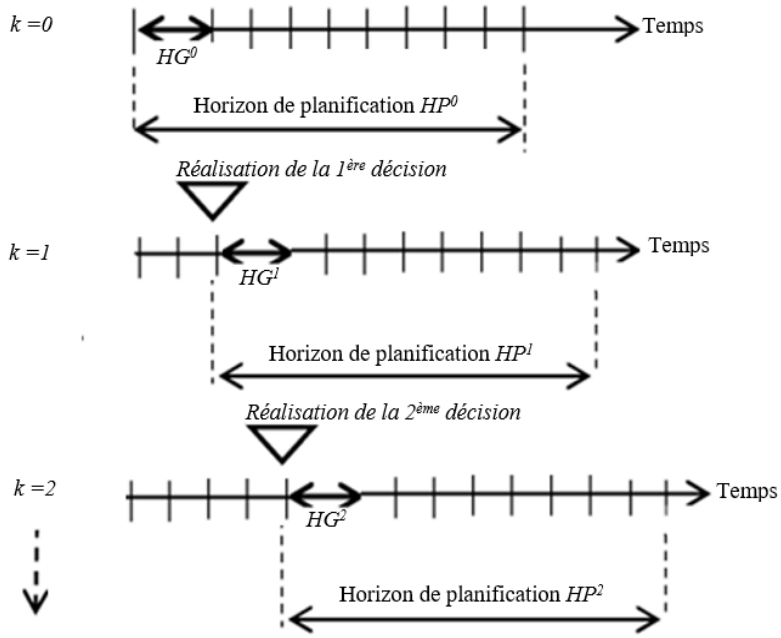

Figure 3.10 – Principe de la planification à horizon glissant

6. Conclusion du chapitre 3

Ce chapitre s'est intéressé à identifier les méthodes qui seront appliquées pour la résolution des problèmes décrits dans notre problématique. Pour le choix d'un hub logistique régional tenant compte de l'imprécision sur le jugement de notre partenaire, nous allons appliquer AHP (pour pondérer les critères) et TOPSIS floue.

Pour fournir à notre premier partenaire industriel un ensemble de meilleurs schémas de réseaux de distribution minimisant le coût, maximisant la proximité des produits aux marchés et minimisant les dommages sur les produits finis, nous allons appliquer la méthode d'optimisation *ε-constraint* qui leur permettra de choisir les solutions selon leurs préférences. Finalement, en prenant en compte l'incertitude sur l'évolution de la demande, nous allons élaborer une approche de planification robuste basée sur le regret minimal.

Deuxième partie : Proposition et mise en œuvre des modèles d'aide à la décision

Chapitre 4

Localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique sur la base d'une approche d'aide à la décision

1. Introduction du chapitre 4

L'objectif de ce chapitre est de présenter et de mettre en œuvre une approche d'analyse multicritères pour la localisation des hubs logistiques régionaux servant de porte d'entrée aux marchés africains pour plusieurs industriels. Ces industriels tentent de redéfinir leur réseau de distribution pour explorer ces marchés. Pour cela, la mise en place de hubs logistiques permet généralement de diminuer les coûts de transport direct source/destination (Alumur et Kara, 2008), mais elle nécessite des investissements importants. L'influence des choix décisionnels sur les coûts d'investissement et d'exploitation de ces hubs a attiré l'attention des praticiens et d'universitaires.

Dans ce contexte, nous avons mené une étude avec notre premier partenaire, prestataire de services logistiques (*Third-Party Logistics* - 3PL) marocain, avec l'objectif de l'aider dans l'implantation de ses hubs logistiques régionaux en Afrique, qui est un marché prometteur en cours de développement. Le choix et l'évaluation des critères de localisation au niveau de ce continent sont difficiles, car il existe d'importantes disparités entre les pays et les régions.

Comme explicité en chapitre 1, les contraintes du partenaire industriel sont ainsi :

1. de définir une approche d'évaluation générique pour explorer systématiquement les critères de choix pertinents ;
2. de réutiliser lorsque possible des évaluations de critères provenant d'organisations internationales (Banque Mondiale, Forum Economique Mondial, etc.), considérées comme fiables ;
3. de compléter ces évaluations externes par d'autres évaluations provenant d'experts internes, en tenant si possible compte de la confiance que l'expert a dans son propre jugement concernant l'évaluation d'un critère pour un lieu donné. Certains critères sont en effet particulièrement difficiles à évaluer.

Comme le jugement des experts est souvent imprécis, la théorie des ensembles flous a été adoptée comme cadre de modélisation globale de l'information. La méthode AHP est utilisée pour pondérer les critères de décision tandis qu'une version modifiée de TOPSIS floue est choisie comme méthode d'évaluation multicritères. Nous suggérons en effet dans notre approche, de modifier la distance entre deux solutions couramment utilisées dans TOPSIS floue, avec deux objectifs principaux : 1) éviter une défuzzification précoce des connaissances,

qui peut remettre en question l'intérêt d'une modélisation floue de l'information, et 2) prendre en compte la confiance des experts dans l'appréciation finale.

Ce chapitre est structuré comme suit : la section 2 traite des spécificités de la localisation des plateformes logistiques en Afrique et détaille les besoins du partenaire industriel. La section 3 décrit notre approche d'analyse multicritères pour la localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique. La mise en œuvre de cette approche a été illustrée dans la section 4 sur un cas réaliste, en la comparant avec une approche d'analyse multicritères classique (TOPSIS floue). Le chapitre se conclut par un rappel de nos principales contributions.

2. Une approche pour l'aide à la décision multicritères « floue »

La majorité des transactions internationales ou inter-régionales de l'Afrique s'effectuent par voie maritime, qui représente 90% du trafic commercial international, alors que le transport aérien ne représente que 1% du trafic. Par conséquent, nous n'évaluerons que les écosystèmes portuaires dans lesquels les futurs hubs logistiques régionaux seront localisés. Dans ce qui suit, nous allons définir le cadre de référence des critères (§3.1), puis présenter les critères d'évaluation des alternatives de localisation (§3.2) et enfin leurs mesures (§3.3).

2.1. Cadre de référence des critères de localisation des hubs

Le cadre de référence suggéré est basé sur le paradigme de base de localisation des hubs logistiques régionaux, exprimé comme suit : "La livraison des produits sur les marchés régionaux nécessite des *services logistiques* (par exemple, une ligne maritime) assurés par un *hub* utilisant des *ressources* (ressources humaines qualifiées, routes, chemins de fer...).

L'utilisation des services et des ressources logistiques est réglementée par une *législation* (règlements douaniers pour les services logistiques ; législation du travail pour les ressources humaines ; règlements de sécurité pour les ressources matérielles...). Le bien-être des ressources humaines de même que l'équité de la législation dépendent de la *stabilité* et de *l'éthique* de l'administration, et donc du gouvernement".

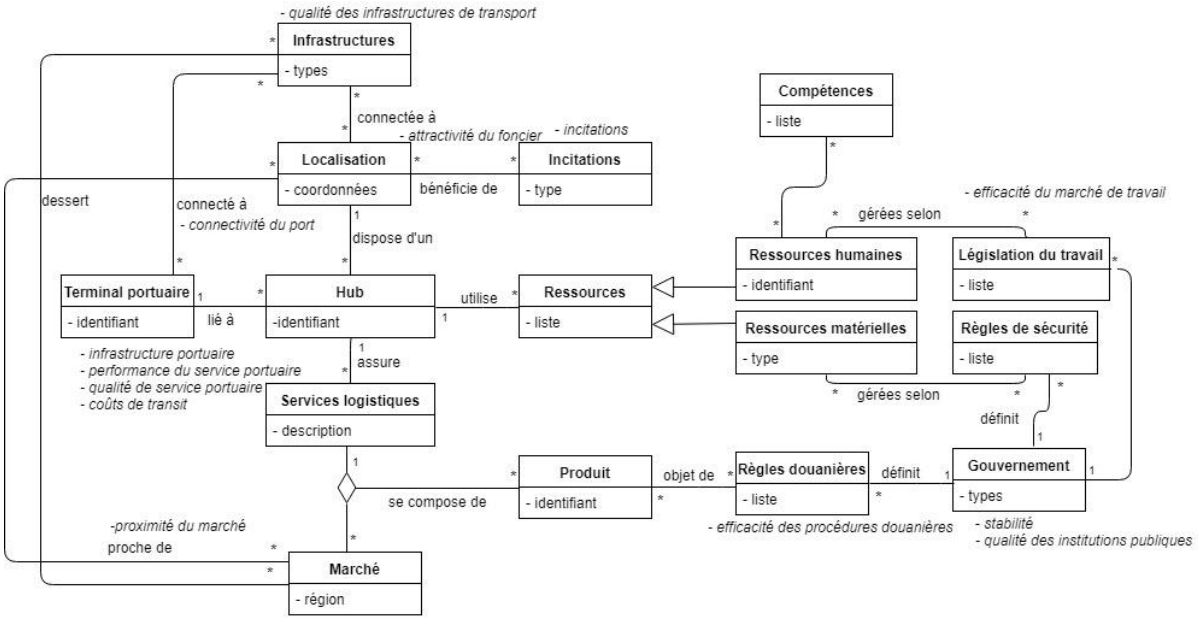

Figure 4.1 – Diagramme de classes du contexte étudié

Nous avons enrichi ce paradigme de base et modélisé le cadre résultant en utilisant le diagramme de classes UML (Fowler, 2004). La figure 4.1 montre qu'un hub logistique régional est lié à un terminal portuaire et aux infrastructures de transport (routes, chemins de fer, etc.).

Le hub logistique régional fournit des services logistiques nécessitant des ressources humaines et moyens matériels utilisés conformément à la réglementation définie par un gouvernement. Un service logistique permet d'alimenter un marché avec des produits.

2.2. Définition des critères de localisation des hubs régionaux

De nombreux critères concernant l'attractivité du pays sont régulièrement évalués par des organismes internationaux, comme l'indice de facilitation du commerce (*Enabling Trade Index*. - ETI), l'indice de compétitivité mondiale (*Global Competitiveness Index* - GCI) et l'indice de paix mondiale (*Global Peace Index* - GPI). L'indice de performance logistique (*Logistic Performance Index* - LPI) est également intéressant pour une appréciation globale de l'infrastructure d'un pays. Les critères concernant l'écosystème logistique du hub régional ont été définis plus précisément à l'aide d'une revue de littérature (chapitre 3), puis discutés avec les experts du 3PL.

A ce stade, il a été décidé, pour une meilleure lisibilité, de hiérarchiser les critères en deux catégories : critères d'attractivité d'un pays (§3.2.1) et critères d'attractivité de l'écosystème

logistique du hub régional (§3.2.2). L'étude de cas (§.5) montrera que les critères de la première catégorie sont assez robustes (ils conviennent à tout type d'application) alors que ceux de la seconde catégorie doivent être choisis et adaptés pour une application donnée (certains critères peuvent, par exemple, être exprimés différemment selon le type de biens à distribuer).

2.2.1. Critères d'attractivité d'un pays

Ces critères évaluent l'attractivité d'un pays et sa capacité à faciliter le drainage des investissements étrangers. Nous proposons cinq critères principaux, à savoir : la stabilité du pays, l'efficacité des institutions publiques, la disponibilité des infrastructures, l'efficacité des procédures douanières et l'attractivité du marché de travail. Chacun d'eux sera subdivisé en un ensemble de sous-critères.

- **Stabilité du pays**

Ce critère évalue les facteurs de stabilité qui influencent l'image de marque et la capacité d'un pays à drainer et sécuriser les investissements étrangers. Les sous-critères sont basés sur la fiabilité de l'environnement d'affaires caractérisé par la stabilité politique et la sécurité ainsi que sur la stabilité macroéconomique.

La stabilité politique et la sécurité (GPI[15]), ce sous-critère indique le niveau des dangers et des risques d'instabilité politique liés aux changements imprévisibles du gouvernement, aux événements de violence politique et aux événements terroristes perturbant l'ordre général du pays : manifestations, grèves, assassinats politiques, guerres civiles, etc. Ce risque, qu'il s'agisse de la destruction des biens matériels ou des dommages humains, ou des détournements des deniers publics, conduit à la dégradation du climat des affaires et influence indirectement la fiabilité et la compétitivité des plateformes logistiques, ainsi que la capacité des pays à dynamiser le portefeuille d'investissements directs étrangers.

La stabilité macro-économique (GCI[16]). Elle peut influencer négativement le choix du pays car les investisseurs seront réticents à opérer dans un pays économiquement instable ; le commerce international et local sera dégradé, ce qui entraînera une détérioration des activités et des gains logistiques. La stabilité macro-économique influence également la fiabilité des

[15] https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Peace_Index

[16] https://reports.weforum.org/global-competitiveness-report-2015-2016/competitiveness-rankings/

données utilisées par les investisseurs pour analyser l'opportunité d'investissement dans un pays et son développement à long terme.

- **Efficacité des institutions publiques**

Ce critère évalue l'efficacité des institutions publiques qui gouvernent, réglementent et protègent les investisseurs. Ces institutions sont essentielles pour créer un climat d'affaire favorable à l'investissement. La qualité de ces institutions influence les décisions d'investissement et les politiques et stratégies de production et de développement des entreprises. GCI propose de traduire ce critère en sous-critères dénotant l'efficacité réglementaire, institutionnelle, juridique et fiscale, à savoir le contrôle de la corruption, la protection des droits des investisseurs, la transparence des politiques gouvernementales, l'efficacité et la simplification de la réglementation de création des entreprises et la disponibilité des incitations gouvernementales pour les investisseurs.

- **Qualité des infrastructures**

Ce critère évalue la disponibilité des infrastructures nécessaires à la distribution et au transport des marchandises à l'intérieur d'un pays et au-delà des frontières, notamment : l'infrastructure ferroviaire et portuaire, les routes et autoroutes et les technologies de l'information.

Tableau 4.1 – Mesures des critères d'attractivité du pays (1ère catégorie)

Critère	Sous-critère	Mesure	Source de la mesure	Orientation de la mesure
Stabilié du pays	Stabilité politique et sécurité	De : 1 très stable à 5 : moins stable	Global Peace Index https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Peace_Index	Coût
	Stabilité macro-économique	De : 1 moins stable à 5 : très stable	Global competitiveness Index https://reports.weforum.org/global-competitiveness-report-2015-2016/competitiveness-rankings/	Bénéfice
Efficacité des institutions publiques		De : 1 moins efficaces à 7 : très efficace	Global competitiveness Index https://reports.weforum.org/global-competitiveness-report-2015-2016/competitiveness-rankings/	Bénéfice
Qualité des infrastructures		De : 1 extrêmement sous-développée à 5 : bien développées et efficace	Logistic performance index http://lpi.worldbank.org/international/global	Bénéfice
Efficacité des procédures douanières		De : 1 extrêmement inefficace à 7 : extrêmement efficace	Global competitiveness Index https://reports.weforum.org/global-competitiveness-report-2015-	Bénéfice
Attractivité du marché de travail		De : 1 extrêmement inefficace à 7 : extrêmement efficace	Logistic performance index http://lpi.worldbank.org/international/global	Bénéfice

- **Efficacité des procédures douanières**

Ce critère dénote la facilité de transit international liée à l'entrée et à la sortie des marchandises à travers les frontières d'un pays. GCI évalue ce critère en fonction de l'efficacité des procédures douanières à l'importation et à l'exportation en termes de temps, de coût et de qualité de processus de dédouanement. Il intègre aussi l'existence d'accords de libre-échange réduisant ou éliminant les barrières commerciales.

- **Attractivité du marché du travail**

Ce critère traduit l'attractivité et l'efficacité du marché du travail. Selon le Groupe Manpower cette efficacité se mesure en termes de disponibilité de main-d'œuvre qualifiée, de coût de la main-d'œuvre (salaire de base et mesures fiscales), de la flexibilité de la réglementation du travail et de la productivité potentielle de la main-d'œuvre. Comme cet indice ne concerne pas le marché du travail africain, nous allons utiliser l'indice d'efficacité du marché du travail développé par le Forum économique mondial LPI qui propose une évaluation de l'attractivité du marché de travail de plusieurs pays, y compris ceux d'Afrique, sur la base de ces mêmes sous-critères.

Ces différents critères ainsi que leur origine et leur échelle sont résumés dans le tableau 4.1. On peut noter certaines incohérences qui seront traitées par la suite (par exemple, seul le premier critère est libellé à l'origine comme un "coût", c'est-à-dire un critère à minimiser).

2.2.2. Critères d'attractivité de l'écosystème logistique d'un hub régional

Ces critères dénotent l'attractivité de l'écosystème logistique du futur hub logistique. Il s'agit de :

- **Qualité d'infrastructure portuaire**

Ce critère évalue la qualité de l'infrastructure des terminaux portuaires et la disponibilité des moyens de manutention pour traiter les expéditions internationales et nationales, par voie maritime, ferroviaire et routière. Ce critère influencera la qualité du fonctionnement du futur hub logistique. Par exemple, si les ports sont susceptibles d'accueillir des navires plus nombreux et plus grands, le hub pourra traiter de gros flux. Selon (Lirn et al., 2003 ; van Dyck et Ismael, 2015 ; Yang et Chen, 2016), ce critère peut être évalué en fonction de la profondeur d'eau (tirant d'eau admissible pour les navires en pleine charge), de la longueur linéaire des postes d'amarrage, de la taille du terminal, de l'équipement portuaire (moyens de manutention), de la

disponibilité et de l'efficacité des lignes intermodales du terminal et de l'efficacité des installations logistiques portuaires.

- **Qualité du service portuaire**

Ce critère traduit implicitement le risque d'endommagement des cargaisons pendant la manutention au port. Ce facteur a un impact fort sur le service offert par le futur hub logistique régional, car des problèmes récurrents pourraient chasser les clients potentiels et décourager les clients existants (Tongzon, 2004).

Tableau 4.2 – Mesure des critères d'attractivité de l'écosystème logistique (2ème catégorie)

Critère	Sous-critère	Decription de la mesure	Echelle de la mesure	Orientation de la mesure	Source de la mesure
Qualité d'infrastructure portuaire	Profondeur d'eau	Tirant d'eau admissible pour les navires à pleine charge	Mètres	Bénéfice	Jugement d'expert
	Longueur du linéaire	Longueur totale des quais	Kilomètres	Bénéfice	Site web du port
	Taille du port	Capacité physique totale du port	Hectar	Bénéfice	Site web du port
	Disponibilité des équipements de manutention au port	Disponibilité des équipements de manutention bien développés	Valeur linguistique	Bénéfice	Jugement d'expert
	Liens intermodaux	Efficacité du réseau de transport intermodal	Valeur linguistique	Bénéfice	Jugement d'expert
	Efficacité des installations logistiques au port	Efficacité et qualité des installations logistiques portuaires	Valeur linguistique	Bénéfice	Jugement d'expert
Qualité de service portuaire		Risque d'endommagement des cargaisons pendant leur manutention au port.	Valeur linguistique	Bénéfice	Jugement d'expert
Performance du service portuaire	Temps moyen d'attente dans la zone de mouillage	Temps total moyen d'attente des navires avant d'être pris en charge	Jours	Coût	Site web du port
	Temps moyen de traitement des navires	Temps moyen nécessaire pour charger ou décharger des navires	Jours/heures	Coût	Site web du port
	Délai moyen d'attente des contneurs au terminal	Nombre moyen de jours pendant lesquels un conteneur peut rester au terminal une fois qu'il a été déchargé d'un navire	Jours	Coût	Site web du port
Charges du transit au port	Charge de manutention à l'import	Coût total de manutention : navires, fret	Devise/unité de flux	Coût	Site web du port
	Charge de manutention à l'export			Coût	
	Droit du port	Frais occasionnés par l'utilisation de l'infrastructure portuaire pendant le transit	Devise	Coût	Site web du port
Connectivité du port		Nombre de connexions maritimes	Nombre	Bénéfice	Site web du port
Attractivité du foncier au port	Disponibilité du foncier	la disponibilité des espaces vides et le développement éventuel d'extensions	Valeur linguistique	Coût	Jugement d'expert
	Prix de location/achat	Coût moyen du loyer/m²	Valeur linguistique	Coût	Jugement d'expert
Proximité au marché régional cible		Durée du trajet jusqu'à chaque marché par mode optimal	Jours	Coût	Rapport en ligne
Attractivité des incitations		Disponibilité des incitations fiscales et non fiscales au sein de ce terminal, telles que des zones franches logistiques.	Valeur linguistique	Bénéfice	Jugement d'expert

- **Performance du service portuaire**

Ce critère évalue la performance du service portuaire. Plus celle-ci est élevée, plus l'écosystème portuaire sera compétitif et plus l'implantation du hub dans cet écosystème sera probable. En effet, les ports sont des nœuds cruciaux dans le réseau de distribution et doivent être en mesure de garantir aux utilisateurs un service fiable. Leur performance est basée sur le temps moyen d'attente des navires dans la zone de mouillage (*average waiting time*), le temps moyen de

traitement des navires (ou temps de transit) (*average turnaround time*), le délai moyen d'attente des conteneurs au terminal après avoir été déchargés d'un navire (*terminal dwell time*). Plus un navire reste longtemps à quai, plus le coût qu'il devra payer sera élevé (Tongzon, 2004).

- **Charges du transit au port**

Il s'agit de l'aspect financier de l'attractivité des terminaux. Selon LPI, ces charges regroupent les coûts de manutention du terminal à l'import et à l'export ainsi que les droits exigés par l'autorité portuaire. Ces charges varient en fonction du conditionnement des flux (vrac, conteneur, etc..).

- **Connectivité du port**

Ce critère évalue le degré de connectivité du port aux autres ports. Plus le terminal est connecté, plus l'emplacement du terminal sera attractif pour accueillir un hub logistique régional. Il décrit ici la disponibilité de lignes maritimes reliant ce port à d'autres ports importants.

- **Attractivité du foncier au port**

Ce critère traduit la disponibilité d'espaces libres pour y implanter le futur hub logistique à des prix abordables. Cette attractivité est matérialisée par deux sous-critères : la disponibilité de terrains libres avec la possibilité d'une éventuelle d'extension et le coût d'aménagement du terrain (pour acquisition ou location au m^2) qui peut varier d'un écosystème à un autre à l'intérieur d'un même pays.

- **Proximité au marché régional cible**

Ce critère traduit la proximité de l'écosystème logistique au marché régional cible. Celle-ci est l'agrégation des proximités de l'écosystème par rapport à chaque marché relevant du marché régional. Souvent, la proximité se traduit par la distance géographique. Or, à distance égale, le temps de transport varie selon l'état des infrastructures. C'est pourquoi nous traduisons cette proximité par le temps de transport avec le mode optimal.

- **Attractivité des incitations au port**

Ce critère traduit la disponibilité d'incitations fiscales et non fiscales au sein ou aux alentours du terminal, telles que des zones franches logistiques.

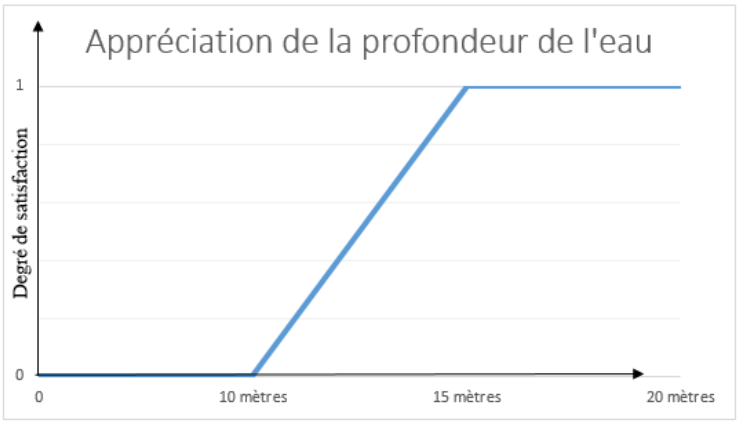

Figure 4.2 – Appréciation de la profondeur de l'eau

2.2.3. Mesures des critères

Le tableau 4.1 résume les mesures des critères d'attractivité d'un pays qui devront servir à évaluer les alternatives. Principalement, ces mesures proviennent des indices des organismes internationaux (Banque Mondiale, Forum Economique Mondial). Toutes ces mesures sont qualitatives et précises. Celles liées à l'écosystème logistique sont hétérogènes (qualitatives/quantitatives, précises/imprécises). Certaines d'entre elles, comme celles associées aux trois premiers sous-critères du tableau 4.2, sont quantitatives qui doivent être interprétées à l'aide d'une fonction d'utilité. Par exemple, la figure 4.2 exprime que sous 10 mètres, la profondeur de l'eau n'est pas suffisante (satisfaction=0) ; entre 10 mètres et 15 mètres, le degré de satisfaction augmente tandis qu'au-dessus de 15 mètres, la satisfaction est complète. La valeur des autres critères (provenant soit d'experts, soit d'informations accessibles) doit être minimisée ou maximisée. L'utilisation de TOPSIS floue permet de normaliser les évaluations avant l'agrégation.

Des valeurs linguistiques ont été utilisées pour traduire les évaluations qualitatives des experts, comme "Faible" ou "Bon", modélisées par des ensembles flous représentés par des trapèzes (figure 4.4). Le chevauchement des catégories permet de diminuer l'effet du seuil lorsque des nombres précis (1, 2, 3...) sont utilisés, ce qui est important lorsque les experts évaluent des critères complexes ou multifacettes. L'ensemble flou décrivant l'avis de l'expert sera complété par un chiffre compris entre 0 et 1 indiquant la confiance de l'expert dans son évaluation.

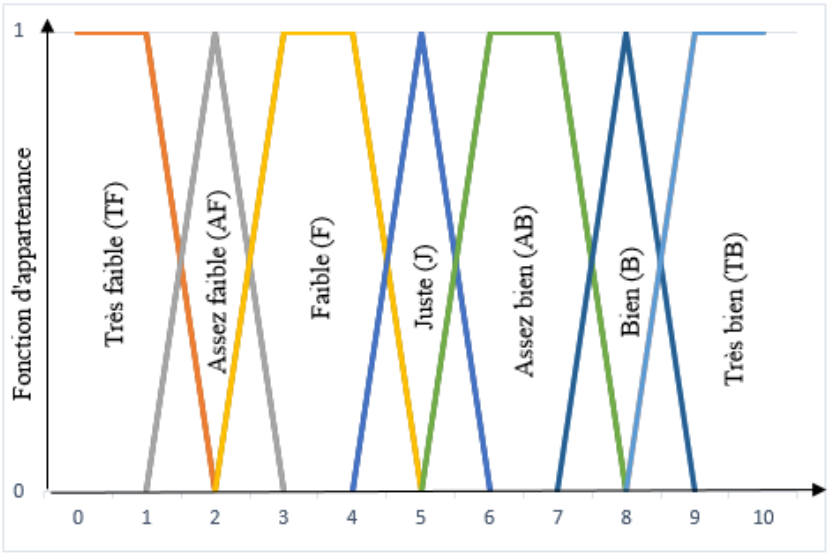

Figure 4.3 – Exemple de variables linguistiques pour l'évaluation des données qualitatives (Hatami-Marbini et Kangi, 2017)

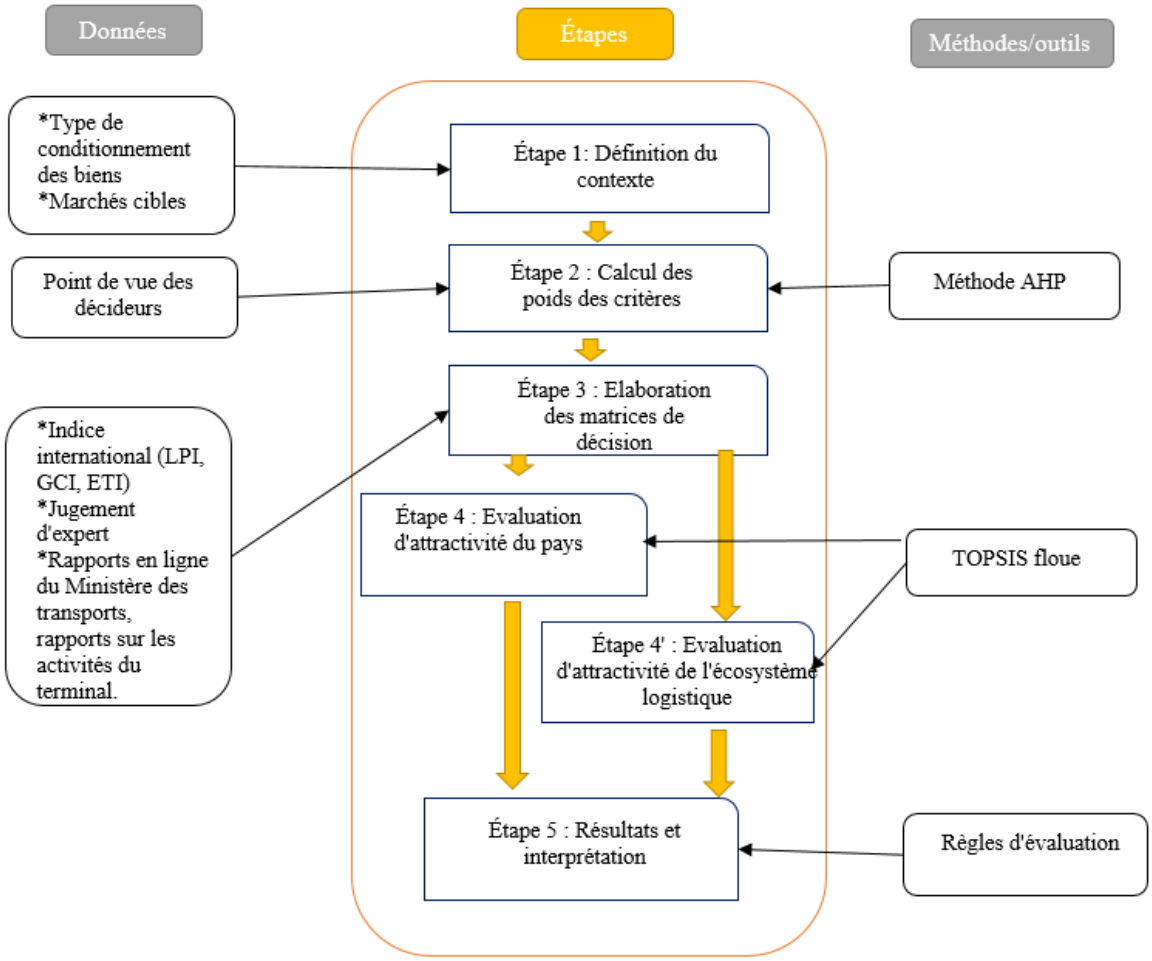

Figure 4.4 – Démarche proposée d'analyse multicritères floue

2.3. Description de la démarche d'évaluation multicritères floue

Comme explicité dans le chapitre 3, nous adoptons une approche d'analyse multicritères hybride combinant AHP et TOPSIS floue : la première sera utilisée pour pondérer les critères alors que la seconde sera améliorée pour permettre d'évaluer les alternatives en tenant compte de la confiance dans le jugement des experts. L'explication de ces techniques a été présentée dans le chapitre 3. Néanmoins, nous donnons ci-dessous un bref résumé afin de justifier les modifications apportées et l'approche globale proposée (figure 4.3).

2.3.1. Etape 1 : Définition du contexte

Tout d'abord, le décideur précise les caractéristiques de son problème de localisation, c'est-à-dire le type de conditionnement utilisé, le marché régional ciblé, etc. Cette étape permet d'adapter la liste des sous-critères (associés au 2ème macro-critère) au contexte décisionnel. Par exemple, si les produits sont des engrais expédiés par vraquier, il faut évaluer les écosystèmes portuaires vraquiers.

2.3.2. Étape 2 : Calcul des poids des critères

Ensuite, le décideur donne son jugement sur le poids relatif des critères appartenant au même macro-critère. Les poids finaux sont calculés à l'aide de la méthode AHP (Saaty, 2008).

2.3.3. Étape 3 : Elaboration de la matrice de décision

Une matrice de décision est construite, composée de l'évaluation de toutes les alternatives (en lignes) selon tous les critères (en colonnes). La matrice est ensuite normalisée de sorte que l'importance relative des critères est exprimée par leur pondération, sans interférence avec leur échelle d'évaluation.

2.3.4. Étapes 4 et 4' : Evaluation de l'attractivité du pays et de l'écosystème logistique

Les poids obtenus à l'aide d'AHP (étape 2) sont maintenant appliqués à la matrice de décision pour construire la matrice de décision floue normalisée et pondérée. L'étape suivante de TOPSIS est de calculer les solutions "idéale positive" (meilleure) et "idéale négative" (pire), la meilleure alternative étant à la fois proche de la solution idéale positive et éloignée de la solution idéale négative. Le calcul de proximité d'une solution par rapport aux solutions idéales dans un contexte d'évaluation de critères à l'aide de nombres flous pose le problème du calcul d'une

distance. Il s'agit en effet de comparer deux nombres flous. La distance entre deux nombres flous est généralement définie comme un nombre précis, essentiellement dans un but de simplification. C'est ainsi le cas dans la version classique de TOPSIS floue, dans laquelle la distance précise suggérée dans (Chen, 2000) est souvent utilisée. L'utilisation d'une distance floue dans TOPSIS floue a à notre avis trois intérêts principaux :

1. La distance entre les nombres flous devrait logiquement être floue. (Voxman, 1998) est le premier à faire remarquer qu'il y a un paradoxe dans la définition d'une distance nette entre deux nombres flous : "*Si nous ne sommes pas certains des nombres eux-mêmes, comment pouvons-nous être certains des distances entre eux ?*" (Voxman, 1998) ;

2. Définir une distance floue permet de retarder la phase de défuzzification, étape majeure dans le calcul des quantités floues qui entraîne toujours une perte d'information. Garder l'imprécision aussi longtemps que possible dans les calculs permet une meilleure propagation d'une information riche (même si elle est plus difficile à interpréter) incluant l'imprécision des connaissances ;

3. Comme indiqué dans la suite, une distance floue peut fournir un cadre permettant également de prendre en compte la confiance d'un expert envers une évaluation spécifique. Cela peut être utile dans le cas d'un problème pour lequel l'incertitude sur les données peut être importante.

Les solutions proposées dans la littérature sur la distance floue entre deux nombres flous présentent quelques limites (Jahantigh et al., 2014). De plus, nous ne trouvons pas de proposition de distance floue entre deux nombres généralisés tenant compte de la confiance du jugement des experts. Par conséquent, nous proposons une nouvelle mesure de distance qui étend celle proposée par Jahantigh et al. (2014) et a une meilleure consistance (même si elle n'est pas parfaite) avec des propriétés de bon sens, tout en intégrant la confiance. Ces propriétés de bon sens sont les suivantes :

- la distance d'un nombre flou à zéro est ce nombre ;

- la distance entre un nombre et lui-même est nulle.

Considérons deux nombres flous trapézoïdaux généralisés $\tilde{X}$ et $\tilde{Y}$:

$\tilde{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, \omega_x)$ et $\tilde{Y} = (y_1, y_2, y_3, y_4, \omega_y)$ avec $\omega_x, \omega_y \in [0,1]$ les degrés de confiance du jugement des décideurs sur les deux nombres flous respectivement :

$\omega_{\min} = \min(\omega_x, \omega_y)$ et $\omega_{\max} = \max(\omega_x, \omega_y)$

L'α-coupe de $\tilde{X}$ et $\tilde{Y}$ est définie comme suit :

$$\forall \alpha \in [0, \omega_x] \,|\, [\tilde{X}]_\alpha = [X^L(\alpha), X^R(\alpha)] \text{ and } \forall \alpha \in [0, \omega_y] \,|\, [\tilde{Y}]_\alpha = [Y^L(\alpha), Y^R(\alpha)]. \quad (4.1)$$

Nous définissons la distance floue entre $\tilde{X}$ et $\tilde{Y}$ comme suit :

$$\tilde{d}(\tilde{X}, \tilde{Y}) = (\theta, d(\tilde{X}, \tilde{Y}), x, d_\infty^g(\tilde{X}, \tilde{Y})) \quad (4.2)$$

Avec

- $\theta = \dfrac{d_\infty^g(\tilde{X}, \tilde{Y}) - d(\tilde{X}, \tilde{Y})}{2}$ (4.3)
- $x = \dfrac{d_\infty^g(\tilde{X}, \tilde{Y}) + d(\tilde{X}, \tilde{Y})}{2}$ (4.4)
- $d(\tilde{X}, \tilde{Y})$ est la distance nette entre X et Y définie dans (Jahantigh et al., 2014)
- $d_\infty^g(\tilde{X}, \tilde{Y})$ est la mesure Hausdorff généralisée (Jahantigh et al., 2014)

Sur quelques exemples, le tableau 4.3 montre une comparaison entre la distance floue entre deux nombres flous trapézoïdaux la plus récemment proposée (Guha et Chakraborty, 2010) et la mesure que nous proposons. Il en découle que notre approche conduit à des résultats plus cohérents que l'approche précédente. En effet, la distance entre un nombre flou et zéro est plus proche de ce nombre flou que selon l'approche précédente.

Tableau 4.3 – Illustration de la comparaison des mesures d'une distance floue

$\tilde{X}$	$\tilde{Y}$	**Mesure proposée**			**Guha et Chakraborty , 2010**
		$d(\tilde{X}, \tilde{Y})$	$d_\infty(\tilde{X}, \tilde{Y})$	$\tilde{d}(\tilde{X}, \tilde{Y}) = (\theta,\ d(\tilde{X}, \tilde{Y}),\ x,\ d_\infty(\tilde{X}, \tilde{Y}))$	
(1, 2, 3, 4)	(1, 2, 3, 4)	0	0	(0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0)
(1, 2, 3, 4)	(0, 0, 0, 0)	1.6	4	(1.2, 1.6, 2.8, 4)	(2.5, 3, 3, 4.5)
(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4, 5)	0.5	1	(0.25, 0.5, 0.75, 1)	(0, 1, 1, 2)
(2, 3, 4, 5)	(1, 2, 3, 4)	0.5	1	(0.25, 0.5, 0.75, 1)	(0, 1, 1, 2)

Cette distance est utilisée pour calculer l'Indice de Proximité (IP) de chaque alternative. L'indice de proximité est une agrégation des distances entre chaque alternative et les solutions idéales positives et négatives. Deux indices de proximité sont obtenus respectivement pour l'attractivité du pays et celle de l'écosystème logistique.

Évidemment, les indices de proximité dérivés de distances floues sont aussi des nombres flous. Nous pouvons les calculer à l'aide de la mesure classique proposée en littérature, transposée aux nombres flous (4.5). Les alternatives doivent ensuite être classées. Plusieurs méthodes de classement des nombres flous ont été proposées (Brunelli et Mezei, 2013), et peuvent conduire à des résultats différents.

Toutes ces méthodes décrivent les nombres flous par des grandeurs précises avant de les classer ; il s'agit donc d'une défuzzification implicite. Afin de garder la trace de l'imprécision des évaluations, nous proposons de classer les indices de proximité flous selon un point de vue pessimiste et optimiste, en utilisant respectivement la valeur inférieure et supérieure de l'α-coupe de l'indice de proximité flou (4.6, 4.7). La normalisation des indices de proximité débouche sur un indice de proximité pessimiste et sur un indice optimiste (4.8, 4.9).

$$\widetilde{IP_i} = \frac{\tilde{d}_i^-}{\tilde{d}_i^- + \tilde{d}_i^+}, \text{ i} = 1, 2, .., m \tag{4.5}$$

$$\widetilde{SupIP_i} = Sup_{0\le\alpha\le1}[\widetilde{IP_i}]_\alpha, \text{ i} = 1, 2, .., m \tag{4.6}$$

$$\widetilde{InfIP_i} = Inf_{0\le\alpha\le1}[\widetilde{IP_i}]_\alpha, \text{ i} = 1, 2, .., m \tag{4.7}$$

$$\widetilde{IP_i^+} = \widetilde{SupIPn_i} = \frac{\widetilde{SupIP_i}}{Max(\widetilde{SupIP_i})}, \text{ i} = 1, 2, .., m \tag{4.8}$$

$$\widetilde{IP_i^-} = \widetilde{InfIPN_i} = \frac{\widetilde{InfIP_i}}{Max(\widetilde{InfIP_i})}, \text{ i} = 1, 2, .., m \tag{4.9}$$

Avec :

- $\tilde{d}_i^-$: la distance floue entre une alternative i et la solution idéale négative
- $\tilde{d}_i^+$: la distance floue entre une alternative i et la solution idéale positive.

2.3.5. Étape 5 : Interprétation des résultats

Nous pouvons maintenant aider le décideur à classer les alternatives en fonction des indices de proximité liés à l'attractivité d'un pays et à la compétitivité d'un écosystème logistique. Nous suggérons de ne pas agréger ces indices car ils dénotent différents aspects du choix d'un écosystème, qui ne devraient à notre avis pas être compensés lors d'une agrégation. Si nécessaire, les différentes combinaisons possibles de valeurs d'indices de proximité peuvent être associées à des recommandations standards comme dans le tableau 4.4.

Il est à noter que ces règles peuvent également s'appliquer à l'indice de proximité pessimiste $IP^-(L), IP^-(C)$ et optimiste $IP^+(L), IP^+(C)$ définis à l'étape 4.

Tableau 4.4 – Exemple de suggestions pour l'évaluation des localisations des hubs

Indice de proximité ($2^{ème}$catégorie)	**Indice de proximité ($1^{ère}$catégorie)**	**Suggestion**
$\boldsymbol{IP(L) \in [0, 0.2)}$	$\forall \boldsymbol{IP(C)}$	Non recommandé
$\boldsymbol{IP(L) \in]0.2, 0.5)}$	$\boldsymbol{IP(C) \in [0, 0.2)}$	Non recommandé
	$\boldsymbol{IP(C) \in]0.2, 0.5)}$	Recommandé avec un potentiel faible
	$\boldsymbol{IP(C) \in]0.5, 0.75]}$	Recommandé avec un potentiel assez faible
	$\boldsymbol{IP(C) \in]0.75, 1]}$	Recommandé avec un potentiel acceptable
$\boldsymbol{IP(L) \in]0.5, 0.75]}$	$\boldsymbol{IP(C) \in [0, 0.2)}$	Non recommandé
	$\boldsymbol{IP(C) \in]0.2, 0.5)}$	Recommandé avec un potentiel faible
	$\boldsymbol{IP(C) \in]0.5, 0.75]}$	Recommandé avec un potentiel assez faible
	$\boldsymbol{IP(C) \in]0.75, 1]}$	Recommandé avec un potentiel acceptable
$\boldsymbol{IP(L) \in]0.75, 1]}$	$\boldsymbol{IP(C) \in [0, 0.2)}$	Non recommandé
	$\boldsymbol{IP(C) \in [0.2, 0.5)}$	Recommandé avec un potentiel acceptable
	$\boldsymbol{IP(L) \in]0.5, 0.75]}$	Recommandé avec un potentiel important
	$\boldsymbol{IP(C) \in]0.75, 1]}$	Recommandé avec un potentiel très important

3. Etude de cas

Les sections 2 et 3 ont permis d'expliciter les besoins de notre partenaire industriel (3PL) puis de présenter notre approche d'aide à la décision. Dans ce qui suit, nous allons valider cette approche à travers une étude de cas réaliste. Celle-ci a été élaborée et analysée avec l'aide de notre partenaire. Pour des raisons de confidentialité, ce cas a été légèrement modifié ici (critères et évaluations) mais reste réaliste.

Tableau 4.5 – Hubs candidats

Ecosystème portuaire candidat	**Pays**	**Pays enclavés desservis**
Djibouti	Djibouti	Ethiopie
Mombassa	Kenya	Uganda- Burundi- Congo- Sudan- Rwanda
Dar es Salaam	Tanzanie	Rwanda - Burundi-Uganda-Malawi-Congo
Walvis Bay	Namibie	Zimbabwe
Durban	Afrique du sud	Zambie-Zimbabwe-Botswana
Maputo	Mozambique	Zimbabwe-Zambie

Tableau 4.6 – Matrice de comparaison par paires des critères d'attractivité des pays

Macro-critère (1ère catégorie)	Stabilité	Efficacité des institutions publiques	Qualité des infrastructur	Attractivité du marché	Efficacité des procédures douanières
Stabilité	1	9	3	9	9
Efficacité des institutions publiques	0.11	1	3	5	0.33
Qualité des infrastructures	0.33	0.33	1	3	1
Attractivité du marché de travail	0.11	0.2	0.33	1	5
Efficacité des procédures douanières	0.11	3	1	0.2	1
Indice de consistance (CI)	9%				
Ratio de consistance (CR)	8%				

3.1. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude de cas illustrative est double :

1) Tout d'abord, nous analyserons l'impact de la prise en compte du niveau de confiance attaché au jugement des experts sur une évaluation spécifique, et l'impact du retard de la défuzzification permis par la définition des distances floues. Pour appuyer cette comparaison, nous considérons trois cas :

a) cas 1 : utilisation de TOPSIS floue classique (avec des distances précises et tous les niveaux de confiance égaux à 1) ;

b) cas 2 : utilisation de TOPSIS floue modifiée avec des distances floues et tous les niveaux de confiance égaux à 1 ;

c) cas 3 : utilisation de TOPSIS floue modifiée avec des distances floues et des niveaux de confiance différents (avec 80% des niveaux de confiance réglés à 1 et 20% à 0,5).

2) Nous illustrerons l'effet de la prise en compte des critères liés à l'attractivité du pays et à l'attractivité de l'écosystème logistique séparément, puis simultanément.

Tableau 4.7 – Pondération finale des critères au niveau des pays

Sous-critère	Poids final
Stabilité politique	46%
Stabilité macro-économique	5%
Efficacité des institutions publiques	16%
Qualité des infrastructures	11%
Attractivité du marché de travail	10%
Efficacité des procédures douanières	10%

Tableau 4.8 – Poids final des critères au niveau des écosystèmes logistiques

Sous-critère	Poids final
Profondeur d'eau	4%
Longueur du linéaire	1%
Taille du port	3%
Disponibilité des équipements de manutention au port	4%
Liens intermodaux	11%
Efficacité des installations logistiques au port	3%
Qualité de service au port	14%
Temps moyen d'attente dans la zone de mouillage	11%
Temps moyen de traitement des navires	2%
Délai moyen d'attente des conteneurs au terminal	4%
Charges de manutention à l'import	5%
Charges de manutention à l'export	5%
Droit au port	5%
Connectivité du port	12%
Disponibilité du foncier	1%
Prix de location/achat	2%
Attractivité des incitations	2 %
Proximité au marché régional	12%

3.2. Résultats expérimentaux

3.2.1. Étape 1 : Définition des préférences sur l'emplacement du hub

Nous considérons six écosystèmes portuaires candidats. Tous ont un bon potentiel mais, selon (Banque Africaine, 2010), ce potentiel varie selon la zone de chalandise qu'ils desservent (tableau 4.5). Les flux sont conditionnés en conteneurs, avec pour conséquence que l'attractivité du terminal se concentre sur les ports à conteneurs.

Tableau 4.9 – Matrice de décision concernant les critères d'attractivité des pays

Critère	Source de la mesure	Niveau de confiance	Djibouti	Mombasa	Dar es Salaam	Walvis Bay	Durban	Maputo
Stabilité politique	(GPI, 2016)	1	2.3	2.4	2	2	2	2
Stabilité macro-économique	(GCI, 2016)	1	4.7	3.6	5	5	5	4.7
Efficacité des institutions publiques	(GCI, 2016)	1	3.7	3.5	4	4	4	3
Qualité des infrastructures	(LPI, 2016)	1	2.3	3.2	3	3	4	2.2
Attractivité du marché de travail	(GCI, 2016)	1	4.3	4.6	4	4	3	4
Efficacité des procédures douanières	(LPI, 2016)	1	2.4	3.2	3	3	4	2.5

3.2.2. Étape 2 : Calcul des coefficients de pondération des critères

Les matrices de comparaison par paires des sous-critères relatifs aux pays (tableau 4.6) et aux écosystèmes logistiques (non montrée ici) ont été construites à l'aide d'interviews chez le 3PL suivant la méthode AHP. Les tableaux 4.7 et 4.8 représentent les pondérations finales des critères appartenant aux deux aspects évalués (attractivité du pays et performance logistique de l'écosystème).

3.2.3. Étape 3 : Élaboration des matrices de décision

Une matrice de décision est ensuite construite pour chaque niveau. Les évaluations des hubs par rapport aux critères au niveau des pays sont principalement tirées des indices récents délivrés par les organisations internationales (tableau 4.9). La deuxième matrice de décision (tableau 4.10) est basée sur des informations quantitatives recueillies auprès de plusieurs sources et sur le jugement qualitatif des experts internes du 3PL. Les évaluations représentées par des variables linguistiques sont ensuite traduites en nombres flous trapézoïdaux à l'aide de la figure 4.3.

Tableau 4.10 – Matrice de décision par rapport aux critères d'attractivité de l'écosystème logistique

N°	Sous critère	Niveau de confiance		Djibouti	Mombassa	Dar es Salaam	Walvis Bay	Durban	Maputo
		Cas 1 et 2	Cas 3						
SC1	Profondeur d'eau	1	1	16.5	10	13	13	12	11
SC2	Longueur du linéaire	1	1	1050	839	725	600	2578	300
SC3	Taille du port	1	1	22	13.7	18.75	40	185	10
SC4	Disponibilité des équipements de manutention au port	1	1	TB	B	AB	AB	TB	B
SC5	Liens intermodaux	1	1	F	F	AB	TB	TB	B
SC6	Efficacité des installations logistiques du port	1	1	TB	F	B	TB	TB	B
SC7	Qualité de service au port	1	0.5	TB	B	AB	TB	TB	AB
SC8	Temps moyen d'attente dans la zone de mouillage	1	0.5	TB	B	TB	AB	AF	B
SC9	Temps moyen de traitement des navires	1	1	7 à 8	4 à 5	4 à 9	7 à 8	3 à 5	3 à 5
SC10	Délai moyen d'attente des conteneurs au terminal	1	1	TB	B	AB	B	AF	B
SC11	Charges de manutention à l'import	1	1	272 à 300	105 à 160	90 à 135	5145 à 8191	1603 à 3133	200 à 300
SC12	Charges de manutention à l'export	1	1	273 à 300	56 à 80	20 à 90	5145 à 10192	1603 à 3134	212 à 285
SC13	Droit au port	1	1	274 à 300	62 à 125	80 à 120	2165 à 3808	1064 à 3133	212 à 234
SC14	Connectivité du port	1	0.5	B	AF	F	AF	TB	F
SC15	Disponibilité du foncier	1	1	B	B	B	B	AF	F
SC16	Prix de location/achat	1	1	AF	B	TB	F	F	B
SC17	Attractivité des incitations	1	1	AF	TB	AB	AB	AF	AB
SC18	Proximité au Rwanda	1	1	B	F	AF	TF	TF	TB
SC19	Proximité au Burundi	1	1	TF	F	AF	TF	TF	TF
SC20	Proximité au Uganda	1	1	TF	F	AF	TF	TF	TF
SC21	Proximité au Congo	1	1	TF	F	AF	TF	TF	TF
SC22	Proximité à Zambie	1	1	TF	TF	AF	TF	F	TF
SC23	Proximité au Zimbabwe	1	1	TF	TF	TF	AF	F	F
SC24	Proximité au Malawi	1	1	TF	TF	AF	TF	TF	TF

Tableau 4.11 – Matrice de décision floue normalisée et pondérée par rapport aux critères d'attractivité de l'écosystème logistique

	Djibouti	Mombassa	Dar es Salaam	Walvis Bay	Durban	Maputo
SC1	(0.04, 0.04, 0.04, 0.04 ; 1)	(0, 0, 0,0 ; 1)	(0.024, 0.024, 0.024,0.024 ; 1)	(0.024, 0.024, 0.024,0.024 ; 1)	(0.008, 0.008, 0.008 ; 1)	**(0.004, 0.004, 0.004,0.004 ; 1)**
SC2	(0.008, 0.008, 0.008,0.008 ; 1)	(0.003, 0.003, 0.003,0.003 ; 1)	(0.002, 0.002, 0.002,0.002 ; 1)	(0.001, 0.001, 0.001,0.001 ; 1)	(0.01, 0.01, 0.01, 0.01 ; 1)	**(0, 0, 0,0 ; 1)**
SC3	(0.03, 0.03, 0.03, 0.03 ; 1)	(0, 0, 0,0 ; 1)	(0.024, 0.024, 0.024,0.024 ; 1)	(0.03, 0.03, 0.03, 0.03 ; 1)	(0.03, 0.03, 0.03, 0.03 ; 1)	**(0, 0, 0,0 ; 1)**
SC4	(0.032, 0.036, 0.04, 0.04 ; 1)	(0.028, 0.032, 0.032,0.036 ; 1)	(0.02, 0.024,0.028, 0.032 ; 1)	(0.02, 0.024,0.028, 0.032 ; 1)	(0.032, 0.036, 0.04, 0.04 ; 1)	**(0, 0, 0,0 ; 1)**
SC5	(0.011, 0.022, 0.022,0.033 ; 1)	(0.011, 0.022, 0.022,0.033 ; 1)	(0.055, 0.066, 0.077,0.088 ; 1)	(0.088, 0.099, 0.110,0.11 ; 1)	(0.088, 0.099, 0.11, 0.11 ; 1)	**(0.028, 0.032, 0.032,0.036 ; 1)**
SC6	(0.024, 0.027, 0.03, 0.03 ; 1)	(0.003, 0.006, 0.006,0.009 ; 1)	(0.021,0.024, 0.024,0.027 ; 1)	(0.024, 0.027, 0.03, 0.03 ; 1)	(0.024, 0.027, 0.03, 0.03 ; 1)	**(0.077, 0.088, 0.088,0.099 ; 1)**
SC7	(0.112, 0.126, 0.14, 0.14 ; 1)	(0.098, 0.112, 0.112,0.126 ; 1)	(0.07, 0.084,0.098, 0.112 ; 1)	(0.112, 0.126, 0.14, 0.14 ; 1)	(0.112, 0.126, 0.14, 0.14 ; 1)	**(0.021, 0.024, 0.024,0.027 ; 1)**
SC8	(0.088, 0.099, 0.11, 0.11 ; 1)	(0.077, 0.088, 0.088,0.099 ; 1)	(0.055,0.066, 0.077,0.088 ; 1)	(0.055, 0.066, 0.077,0.088 ; 1)	(0.022, 0.033, 0.044,0.055 ; 1)	**(0.07, 0.084,0.098, 0.112 ; 1)**
SC9	(0.016, 0.016, 0.018,0.018 ; 1)	(0.009, 0.009, 0.011,0.011 ; 1)	(0.009, 0.009, 0.02, 0.02 ; 1)	(0.016, 0.016, 0.018,0.018 ; 1)	(0.007, 0.007, 0.011,0.011 ; 1)	**(0.007, 0.007, 0.011,0.011 ; 1)**
SC10	(0.032, 0.036, 0.04, 0.04 ; 1)	(0.028, 0.032, 0.032,0.036 ; 1)	(0.02, 0.024,0.028, 0.032 ; 1)	(0.028, 0.032, 0.032,0.036 ; 1)	(0.008, 0.012, 0.016,0.02 ; 1)	**(0.028, 0.032, 0.032,0.036 ; 1)**
SC11	(0.015, 0.015, 0.017,0.017 ; 1)	(0.028, 0.028, 0.043,0.043 ; 1)	(0.033, 0.033, 0.05, 0.05 ; 1)	(0.001, 0.001, 0.001,0.001 ; 1)	(0.001, 0.001, 0.003,0.003 ; 1)	**(0.015, 0.015, 0.023,0.023 ; 1)**
SC12	(0.003, 0.003, 0.004, 0.004 ; 1)	(0.013, 0.013, 0.018,0.018 ; 1)	(0.011, 0.011, 0.05, 0.05 ; 1)	(0, 0, 0,0 ; 1)	(0, 0, 0...01,0.001 ; 1)	**(0.004, 0.004, 0.005,0.005 ; 1)**
SC13	(0.01, 0.01, 0.11, 0.11 ; 1)	(0.025, 0.025, 0.05, 0.05 ; 1)	(0.026, 0.026, 0.039,0.039 ; 1)	(0.001, 0.001, 0.001,0.001 ; 1)	(0.001, 0.001, 0.003,0.003 ; 1)	**(0.013, 0.013, 0.015,0.015 ; 1)**
SC14	(0.084,0.096, 0.096, 0.108 ; 1)	(0.024, 0.036, 0.048,0.06 ; 1)	(0.012, 0.024, 0.024,0.036 ; 1)	(0.024, 0.036, 0.048,0.06 ; 1)	(0.096, 0.108, 0.12, 0.12 ; 1)	**(0.012, 0.024, 0.024,0.036 ; 1)**
SC15	(0.008, 0.009, 0.009, 0.01 ; 1)	(0.008, 0.009, 0.009,0.01)	(0.008, 0.009, 0.009,0.01 ; 1)	(0.008, 0.009, 0.009,0.01 ; 1)	(0.002, 0.003, 0.004,0.006 ; 1)	**(0.001, 0.002, 0.002,0.003 ; 1)**
SC16	(0.004, 0.006, 0.008, 0.01 ; 1)	(0.014, 0.016, 0.016,0.018 ; 1)	(0.016, 0.018, 0.02, 0.02 ; 1)	(0.002, 0.004, 0.004,0.006 ; 1)	(0.002, 0.004, 0.004,0.006 ; 1)	**(0.014, 0.016, 0.016,0.018 ; 1)**
SC17	(0.004, 0.006, 0.008,0.01 ; 1)	(0.016, 0.018, 0.02, 0.02 ; 1)	(0.01, 0.012,0.014, 0.016 ; 1)	(0.016, 0.018, 0.02, 0.02 ; 1)	(0.004, 0.004, 0.004,0.006 ; 1)	**(0.016, 0.018, 0.02, 0.02 ; 1)**
SC18	(0.014, 0.016, 0.016, 0.018 ; 1)	(0.002, 0.004, 0.004,0.006 ; 1)	(0.004, 0.006, 0.008,0.01 ; 1)	(0, 0, 0.002, 0.004 ; 1)	(0, 0, 0.002, 0.004 ; 1)	**(0.016, 0.018, 0.02, 0.02 ; 1)**
SC19	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0.004, 0.008, 0.008,0.012 ; 1)	(0.008, 0.012, 0.016,0.02 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	**(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)**
SC20	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0.004, 0.008, 0.008,0.012 ; 1)	(0.008,0.012, 0.016,0.02 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	**(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)**
SC21	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0.004, 0.008, 0.008,0.012 ; 1)	(0.008, 0.012, 0.016,0.02 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	**(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)**
SC22	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0.008, 0.012, 0.016,0.02 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0.004, 0.008, 0.008,0.012 ; 1)	**(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)**
SC23	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0.008, 0.012, 0.016,0.02 ; 1)	(0.004, 0.008, 0.008,0.012 ; 1)	**(0.004, 0.008, 0.008,0.012 ; 1)**
SC24	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0.008, 0.012, 0.016,0.02 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)	**(0, 0, 0.004, 0.008 ; 1)**

Tableau 4.12 – Solution idéales floues FPIS+, FNIS-

	FPIS+	**FNIS-**
SC1	(0.04, 0.04, 0.04, 0.04 ; 1)	(0, 0, 0, 0 ; 1)
SC2	(0.01, 0.01, 0.01, 0.01 ; 1)	(0, 0, 0, 0 ; 1)
SC3	(0.03, 0.03, 0.03, 0.03 ; 1)	(0, 0, 0, 0 ; 1)
SC4	(0.032, 0.036, 0.04, 0.04 ; 1)	(0.02, 0.02, 0.03, 0.03 ; 1)
SC5	(0.088, 0.099, 0.11, 0.11 ; 1)	(0.01, 0.02, 0.02, 0.03 ; 1)
SC6	(0.024, 0.027, 0.03, 0.03 ; 1)	(0,0.01, 0.01, 0.01 ; 1)
SC7	(0.112, 0.126, 0.14, 0.14 ; 1)	(0.07, 0.08, 0.1, 0.11 ; 1)
SC8	(0.088, 0.099, 0.11, 0.11 ; 1)	(0.02, 0.03, 0.04, 0.06 ; 1)
SC9	(0.016, 0.016, 0.02, 0.02 ; 1)	(0.01, 0.01, 0.01, 0.01 ; 1)
SC10	(0.032, 0.036, 0.04, 0.04 ; 1)	(0.01, 0.01, 0.02, 0.02 ; 1)
SC11	(0.033, 0.033, 0.05, 0.05 ; 1)	(0, 0, 0, 0 ; 1)
SC12	(0.013, 0.013, 0.05, 0.05 ; 1)	(0, 0, 0, 0 ; 1)
SC13	(0.026, 0.026, 0.05, 0.05 ; 1)	(0, 0, 0, 0 ; 1)
SC14	(0.096, 0.108, 0.120, 0.12 ; 1)	(0.01, 0.02, 0.02, 0.04 ; 1)
SC15	(0.008, 0.009, 0.009, 0.01 ; 1)	(0, 0, 0, 0 ; 1)
SC16	(0.016, 0.018, 0.02, 0.02 ; 1)	(0, 0, 0, 0 ; 1)
SC17	(0.016, 0.018, 0.02, 0.02 ; 1)	(0, 0.01, 0.01, 0.01 ; 1)
SC18	(0.016, 0.018, 0.02, 0.02 ; 1)	(0, 0, 0, 0 ; 1)
SC19	(0.008, 0.012, 0.016, 0.02 ; 1)	(0, 0, 0,0. 01 ; 1)
SC20	(0.008, 0.012, 0.016, 0.02 ; 1)	(0, 0, 0,0.01 ; 1)
SC21	(0.008, 0.012, 0.016, 0.02 ; 1)	(0, 0, 0,0.01 ; 1)
SC22	(0.008, 0.012, 0.016, 0.02 ; 1)	(0, 0, 0,0.01 ; 1)
SC23	(0.008, 0.012, 0.016, 0.02 ; 1)	(0, 0, 0,0.01 ; 1)
SC24	(0.008, 0.012, 0.016, 0.02 ; 1)	(0, 0, 0,0.01 ; 1)

3.2.4. Étape 4' : Evaluer l'attractivité de chaque écosystème logistique

TOPSIS floue est ensuite utilisée pour évaluer chaque localisation potentielle en fonction de la 2ème catégorie des critères (§3.2.2). Nous utilisons l'échelle de conversion suggérée à la figure 4 pour transformer les matrices de décision des tableaux 4.9 et 4.10, y compris les nombres précis et les intervalles et les étiquettes linguistiques, en une matrice de décision floue ne contenant que des nombres flous (non fournie ici). Cette matrice est ensuite normalisée puis pondérée (tableaux 4.7 et 4.8). Le résultat est présenté dans le tableau 4.11.

- ***Calcul des solutions idéales floues.***

La solution idéale positive floue (FPIS+) et la solution idéale négative floue (FNIS-) sont évaluées (tableau 4.12) comme décrit dans le chapitre 3.

- ***Calcul de la distance entre chaque alternative et les solutions idéales.***

Nous rappelons que le cas 1 utilise TOPSIS floue classique (distances précises ; tous les niveaux de confiance égaux à 1) ; le cas 2 utilise TOPSIS floue avec des distances floues, et le cas 3, TOPSIS floue avec des distances floues et différents niveaux de confiance.

Nous calculons les distances précises (pour le cas 1) et floues (pour les cas 2 et 3) entre les localisations candidates et les solutions idéales et négatives idéales (tableau 4.13).

Tableau 4.13 – Distance entre chaque alternative et FPIS+/ FNIS- (Critères sur les écosystèmes logistiques)

	Cas 1 Distance nette de		**Cas 2 Distance floue de**		**Cas 3 Distance floue de**	
	$FPIS^+$	$FNIS^-$	$FPIS^+$	$FNIS^-$	$FPIS^+$	$FNIS^-$
Djibouti	1.34	1.2	(0.08, 0.15, 0.23, 0.31)	(0.15, 0.24, 0.51, 0.7)	(0.11, 0.17, 0.28, 0.38)	(0.143,0.2, 0.35, 0.49)
Mombassa	1.28	1.09	(0.28, 0.29, 0.56, 0.85)	(0.13, 0.19, 0.32, 0.45)	(0.15, 0.22, 0.36, 0.51)	(0.14, 0.17, 0.31, 0.45)
Dar es Salaam	1.07	1.09	(0.16, 0.14, 0.3, 0.46)	(0.16, 0.25, 0.42, 0.58)	(0.11, 0.16, 0.27, 0.37)	(0.09, 0.11, 0.2, 0.29)
Walvis Bay	1.41	0.85	(0.26, 0.27, 0.53, 0.79)	(0.13, 0.22, 0.34, 0.47)	(0.13, 0.2, 0.33, 0.46)	(0.15, 0.23, 0.39, 0.54)
Durban	1.54	0	(0.11, 0.18, 0.28, 0.39)	(0.13, 0.21, 0.35, 0.48)	(0.13, 0.2, 0.33, 0.46)	(0.17, 0.27, 0.44, 0.62)
Maputo	1.35	0	(0.2, 0.21, 0.41, 0.61)	(0.12, 0.18, 0.31, 0.43)	(0.15, 0.236, 0.38, 0.54)	(0.16, 0.21, 0.37, 0.53)

- ***Détermination de l'indice de proximité***

Enfin, nous calculons pour chaque alternative les indices de proximité précis et flou (tels que définis dans la section § 4.3) permettant d'évaluer la compétitivité logistique de l'écosystème (tableau 4.14) et l'attractivité du pays (tableau 4.15).

3.3. Analyse et interprétation des résultats

Les tableaux 4.14 et 4.15 résument le classement final des alternatives par rapport à l'attractivité de chaque écosystème logistique et à l'attractivité de chaque pays.

Les résultats du tableau 4.15 montrent tout d'abord que la prise en compte d'une distance floue permet d'obtenir une information plus riche sur le classement. Dar es Salaam est le meilleur emplacement dans le cas 1 et dans l'évaluation pessimiste du cas 2, mais on peut voir que Djibouti, classé premier selon une évaluation optimiste (dans le cas 2), a un meilleur potentiel que Dar es Salaam (sa satisfaction maximale des critères est bien meilleure). Dans tous les cas, distinguer le classement pessimiste et optimiste permet au décideur d'accéder à une information plus riche, fournissant une mesure indirecte du risque qu'il peut prendre en adoptant une stratégie optimiste ou pessimiste. Le mauvais classement de Durban et Maputo dans le cas 1 vient de leur proximité à la solution idéale négative, caricaturée par le calcul de la distance nette. Les distances floues montrent qu'en fait, ces solutions sont proches des autres : Durban est même classé deuxième dans le cas 2, et premier dans le cas 3. Même avec le faible niveau d'incertitude introduit dans le cas 3 (80% des évaluations avec une confiance = 1 ; 20% avec une confiance = 0,5), on peut constater que la prise en compte de cette confiance peut remettre en cause le classement : même si les classements optimistes des cas 2 et 3 sont proches, les pessimistes apparaissent comme tout à fait différents.

Dans une moindre mesure, des commentaires similaires peuvent être faits sur les résultats concernant l'attractivité du pays (les cas 2 et 3 sont similaires puisque les évaluations des experts, y compris la confiance, ne concernent que l'attractivité logistique).

Les figures 4.5 et 4.6 présentent une synthèse des évaluations pessimistes (resp. optimistes) normalisées de chaque lieu par rapport à chaque indice, obtenue à l'aide des tableaux 4.14 et 4.15 (cas 2). Pour ce faire, nous plaçons chaque alternative sur le plan en fonction de ses coordonnées : en abscisse, nous trouvons la valeur de l'indice de proximité normalisé relatif à l'attractivité du pays et en ordonnée, la valeur de l'indice de proximité normalisé relatif à l'attractivité de l'écosystème logistique. Les deux visions, optimiste et pessimiste, conduisent à des résultats différents. Ceci confirme que le report de la défuzzification jusqu'au calcul de l'indice de proximité a un impact significatif sur le jugement final, ce dernier étant relatif à la vision du décideur (optimiste ou pessimiste).

Tableau 4.14 – Classement final des alternatives en ce qui concerne l'attractivité de l'écosystème logistique

	Cas 1		**Cas 2**			**Cas 3**		
	IP(L)	Classement	$\widetilde{IP(L)}$	Classement pessimiste	Classement optimiste	$\widetilde{IP(L)}$	Classement pessimiste	Classement optimiste
Djibouti	0.472	2	(0.15, 0.33, 1.3, 3)	2	1	(0.16, 0.33, 0.93, 1.95)	1	2
Mombassa	0.46	3	(0.1, 0.22, 0.66, 1.1)	4	6	(0.15, 0.26, 0.79, 1.58)	2	5
Dar es Salaam	0.505	1	(0.16, 0.35, 1.05, 1.81)	1	3	(0.13, 0.24, 0.74, 1.48)	3	6
Walvis Bay	0.377	4	(0.1, 0.25, 0.71, 1 .2)	4	5	(0.15, 0.33, 0.9, 1.89)	2	3
Durban	0	5	(0.15, 0.34, 0.89, 2)	2	2	(0.16, 0.35, 0.94, 2.06)	1	1
Maputo	0	5	(0.12, 0.26, 0.78, 1.32)	3	4	(0.15, 0.28, 0.84, 1.71)	2	4

Tableau 4.15 – Classement final des alternatives en termes d'attractivité des pays

	Cas 1		**Cas 2 et 3**		
	IP(C)	Classement	$\widetilde{IP(C)}$	Classement pessimiste	Classement optimiste
Djibouti	0.679	4	(0.08, 0.2, 0.4, 1.6)	5	5
Mombassa	0.912	4	(0.1, 0.25, 0.5, 2)	4	4
Dar es Salaam	0.969	2	(0.22, 0.58, 1.3, 3.45)	1	1
Walvis Bay	0.969	2	(0.22, 0.58, 1.3, 3.45)	1	1
Durban	0.983	1	(0.2, 0.52, 1.18, 3.14)	2	2
Maputo	0.934	3	(0.11, 0.28, 0.55, 2.2)	3	3

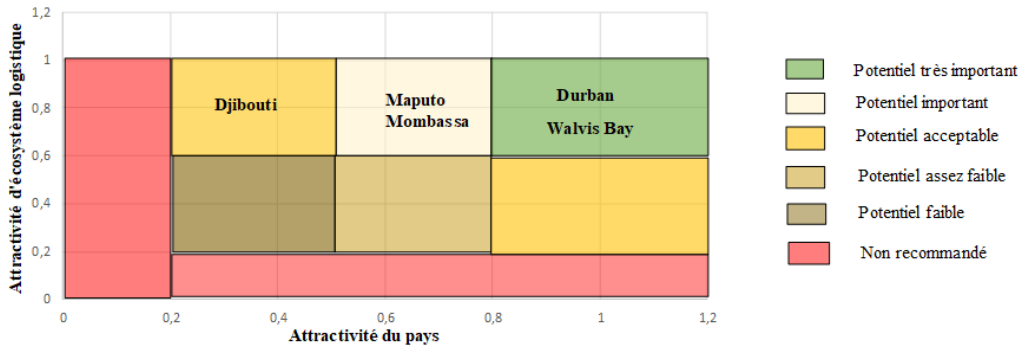

Figure 4.5 – Evaluation finale optimiste (cas 2)

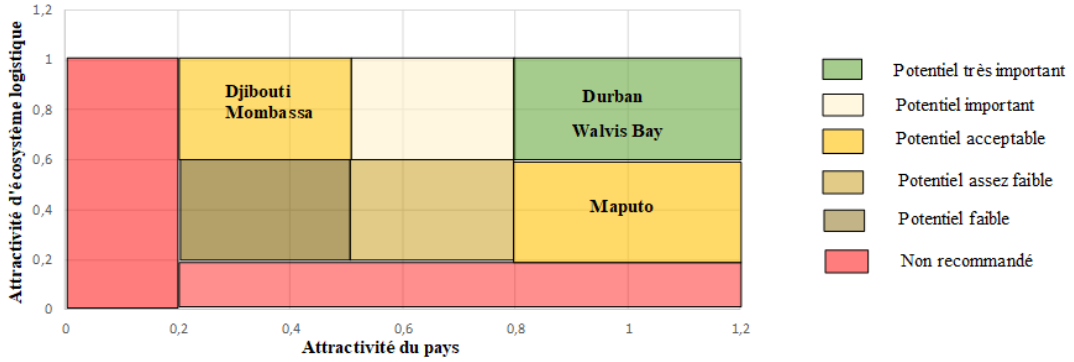

Figure 4.6 – Evaluation finale pessimiste (cas 2)

4. Conclusion du chapitre 4

Ce chapitre a présenté et illustré notre approche d'analyse multicritères floue pour la localisation des hubs régionaux permettant à des industriels clients de notre partenaire 3PL d'accéder efficacement aux marchés africains.

Dans cette optique, il est important de positionner judicieusement les hubs logistiques qui permettront de livrer les produits dans une zone donnée. L'implantation des hubs en Afrique présente néanmoins des difficultés spécifiques, parmi lesquelles la faiblesse des infrastructures de transport, la lourdeur de la réglementation douanière et l'instabilité politique dans de nombreux pays.

Afin d'aborder ce problème, nous avons suggéré d'évaluer séparément l'attractivité d'un pays et celle de l'écosystème logistique portuaire dans lequel le futur hub sera implanté. Sur la base des besoins exprimés par notre partenaire 3PL, les sous-critères de chaque catégorie ont été définis à partir des critères issus de la littérature, des critères suggérés par les organisations internationales et d'une collaboration avec les experts du partenaire logistique. La logique floue

a fourni le cadre d'intégration permettant de considérer simultanément des évaluations des critères consistant en nombres précis, intervalles et jugements subjectifs, provenant de diverses sources. TOPSIS floue est utilisée comme méthode de base pour évaluer séparément l'attractivité d'un pays et la compétitivité logistique d'un site. Néanmoins, cette technique souffre de limitations lorsqu'elle est appliquée sur des données entachées d'imprécision mais aussi d'incertitude. Afin de remédier à ces limitations, nous avons proposé une mesure de distance floue permettant de prendre en compte l'imprécision des données pendant tous les calculs, et pas seulement au début comme dans le TOPSIS floue classique. En outre, étant donné que certaines des évaluations des critères sont fournies par des experts, nous avons suggéré de tenir compte de la confiance de l'expert dans son propre jugement.

La méthode a été appliquée pour validation sur un cas réaliste, montrant que les améliorations suggérées permettent d'accéder à une information plus riche qui peut être très différente des résultats obtenus en utilisant TOPSIS floue classique. Même si cette information peut sembler plus difficile à interpréter, nous pensons qu'elle fournit une mesure de l'intérêt potentiel de certaines solutions risquées qui valent la peine d'être considérées dans notre monde concurrentiel.

Après cette première phase permettant de fournir une aide à la décision pour la localisation d’un hub porte d’entrée vers un marché régional, les chapitres suivants (chapitres 5 et 6) sont orientés sur la conception de l'ensemble du réseau de distribution au moyen de techniques d'optimisation.

Chapitre 5

Conception multi-objectifs de réseaux de distribution hybrides en Afrique : *Application à la distribution et au blending d'engrais*

1. Introduction du chapitre 5

Après avoir présenté et illustré notre approche de localisation des hubs logistiques régionaux en Afrique (chapitre 4), ce chapitre s'intéressera à la conception multi-objectifs de réseaux de distribution hybrides dans ce continent, intégrant ces hubs, dans un contexte déterministe.

Si les hubs régionaux permettent de servir plusieurs industriels, la conception des schémas logistiques doit être adaptée au besoin de chaque industriel et donc aux spécificités des flux à traiter (produire, stocker et distribuer). Les futurs réseaux de distribution doivent permettre de rapprocher l'offre et la demande en termes de diversité, qualité et proximité aux zones de consommation, à des prix compétitifs tenant compte du pouvoir d'achat des clients. De plus, ils doivent être adaptés aux conditions et aux contraintes actuelles de distribution en Afrique. En effet, une particularité des pays africains est, à l'opposé de la plupart des pays développés, le manque d'infrastructures de transport fiables et d'offres logistiques compétitives. Ceci augmente la pression sur les coûts d'investissement et d'exploitation des plateformes et complexifie d'avantage le problème de conception de réseaux de distribution en Afrique.

Cette difficulté se conjugue à celle, plus générale, du besoin croissant en personnalisation des produits à des prix de vente abordables. Ainsi, pour offrir un portefeuille de produits très diversifiés, garantir une forte réactivité et proximité des produits aux marchés géographiquement éloignés tout en maintenant des économies d'échelle, une idée émergente, proposée par notre partenaire, consiste à personnaliser ces produits pendant la distribution. Plus précisément, cette personnalisation se traduit par la mise en place d'installations de personnalisation (assemblage, conditionnement…) au niveau des plateformes de distribution.

La conception de réseaux de distribution intégrant ces plateformes de personnalisation dans le contexte Africain nécessite d'apporter un éclairage aux questions suivantes :

- Où seront localisées les plateformes de personnalisation et de distribution ?
- Quelle capacité de personnalisation et de stockage devra-t-elle être installée dans ces plateformes ?
- Quelle diversité sera offerte par chaque plateforme de personnalisation ?
- Comment acheminer les flux des composants et produits finis dans les réseaux ?

La localisation optimale de la personnalisation dans un réseau de distribution résultera d'un compromis entre l'efficience, la réactivité et le maintien de la qualité des produits personnalisés

pendant leur distribution finale. D'une part, la personnalisation aura tendance à remonter en amont en raison des économies d'échelle liées à la consolidation des flux amont en cas de forte diversité des composants (intrants pour la personnalisation). A l'inverse, elle aura tendance à être repoussée vers l'aval en raison de la qualité des routes (allongement du temps de transport occasionnant une baisse de la qualité du produit, par exemple par ségrégation des engrais) et de la nécessité d'être très réactif par rapport aux demandes des clients (réduction des délais de réponses).

Le *blending* et la distribution d'engrais en Afrique est un bon exemple des problèmes résultant du report de la personnalisation finale de demandes très spécifiques et saisonnières. Les principaux acteurs présents sur le continent, y compris notre partenaire industriel, tentent actuellement à compléter leur offre de produits standards par des produits spécifiques, adaptés à une composition du sol et à un type de culture agricole. Ces produits spécifiques sont fabriqués en mélangeant des composants de base dans des installations dédiées, les « plateformes de *blending* », qui peuvent être situées à chaque niveau des réseaux de distribution. Parallèlement, un défi majeur est de baisser le prix de vente au client final afin d'améliorer la situation des agriculteurs africains en termes d'utilisation d'engrais. En effet, les prix de vente actuels sont trop élevés par rapport au pouvoir d'achat des agriculteurs locaux, alors que les coûts logistiques jouent un rôle important dans le prix de vente final.

En raison de la complexité décisionnelle et l'originalité du problème industriel étudié, notre contribution se veut à la fois scientifique et industrielle :

1. du point de vue scientifique, nous proposons un nouveau modèle d'optimisation mathématique multi-objectifs et générique aux problèmes de conception et/ou de restructuration de réseaux de distribution hybrides. Trois critères d'optimisation sont pris en compte : la minimisation du coût total, la maximisation de la proximité des stocks de produits personnalisés aux marchés et la minimisation des dommages impactant les produits pendant la distribution finale, en rapprochant les plateformes de personnalisation des marchés. De plus, ce modèle aborde des questions industrielles réalistes rarement abordées simultanément dans la littérature, y compris : l'intégration des contraintes de distribution en Afrique, le report de la personnalisation finale, le dimensionnement de capacités modulaires sous contrainte de saisonnalité des marchés, le transport multimodal moyennant une flotte de conditionnement hétérogène (vrac et conteneurs) et la modélisation de coûts reflétant des économies d'échelle.

2. De point de vue industriel, ce modèle devrait servir comme support d'aide à la décision pour la localisation et le dimensionnement des plateformes de *blending* et distribution d'engrais pour le compte de notre partenaire industriel.

Ce chapitre est organisé comme suit : la section suivante propose une analyse des arbitrages décisionnels, pour en déduire la complexité décisionnelle du problème. Dans la troisième section, nous allons présenter la modélisation systémique et mathématique de ce problème décisionnel. La quatrième section sera dédiée à l'analyse de la validité du modèle à travers des scénarios réalistes (mais non réels) sur la base du problème de distribution et de *blending* d'engrais en Côte d'Ivoire. Finalement, nous concluons ce chapitre en explicitant les limites et perspectives de ce modèle qui seront abordées dans le chapitre suivant (chapitre 6).

2. Description du problème décisionnel

Selon les exigences du développement industriel, les décideurs peuvent avoir recours soit à une restructuration de réseaux logistiques existants, soit à une conception de nouveaux réseaux. La première stratégie est généralement motivée par l'évolution des conditions des marchés et d'environnement des affaires dans les pays où les décideurs sont déjà présents (i.e. si des plateformes distribution et production y sont déjà opérationnelles). Ainsi, leur objectif sera plutôt d'aligner leurs réseaux logistiques sur les nouvelles conditions et exigences des marchés.

La deuxième stratégie sera adoptée par des décideurs souhaitant pénétrer de nouveaux marchés en construisant leurs réseaux à partir de rien. Quelle que soit la stratégie de développement adoptée, le problème décisionnel de conception/restructuration des réseaux logistiques est très complexe par la multiplicité des contraintes à prendre en compte, et nécessite une analyse d'arbitrages bien structurée.

Nous rappelons que le problème de conception et/ou de restructuration de réseaux logistiques combine deux niveaux décisionnels, stratégique et tactique. Ceux-ci sont fortement interdépendants :

- Le **niveau stratégique** aborde la détermination du nombre et de la localisation optimaux des plateformes logistiques et/ou industrielles (par exemple : usines de fabrication, ateliers d'assemblage) à ouvrir/fermer, le dimensionnement optimal de leur capacités (production/stockage), i.e. établir des choix technologiques des

installations/équipements, ainsi que le choix des opportunités d'approvisionnement (« *mono-sourcing* », « *multi-sourcing* ») et de sous-traitance (production/stockage).

- Au **niveau tactique**, il s'agit de décider de l'allocation des flux (matières premières/produits finis) tout au long des réseaux de distribution, de sorte que les demandes des clients soient satisfaites dans les conditions de diversité, délais, qualité et coûts objectifs désirés. Il s'agit donc de déterminer l'allocation des demandes et des commandes (d'autres plateformes) aux plateformes logistiques et/ou de production, de choisir les modes de transport et les politiques de contrôle de stocks.

De point de vue général, les décisions stratégiques ont un fort impact, à terme, sur les performances opérationnelles des réseaux de distribution. Elles abordent non seulement la question de l'emplacement et la capacité optimale des plateformes (décisions spatiales) mais également la question de la période optimale d'ouverture ou de fermeture des plateformes et de l'ajustement progressif de la configuration des réseaux tout au long de l'horizon de planification (décisions temporelles). Cet ajustement porte sur la possibilité d'étendre ou de réduire la capacité et/ou de relocaliser les capacités dans les réseaux. La prise en considération de la composante temporelle dans la planification rend le modèle plus adapté au contexte Africain, aussi dynamique qu'incertain. Cependant, en raison de la forte interdépendance entre ces décisions, le problème devient plus compliqué à résoudre si elles sont prises simultanément.

A cet égard, il serait judicieux en premier abord de bien analyser le problème en univers certain (i.e. déterministe), en supposant que les décisions stratégiques (localisation et dimensionnement) sont définies au début de l'horizon de planification et restent inchangées, avant d'aborder le problème dans sa version la plus complète et complexe (voir chapitre 6). Par ailleurs, en raison des variations saisonnières de la demande à court et moyen terme, les décisions tactiques peuvent changer dans le temps.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à examiner les principaux arbitrages décisionnels de chacune des décisions de localisation et de dimensionnement considérées à part (ex. décider de la localisation en supposant des plateformes à capacité prédéterminée). Enfin, nous analyserons la complexité du problème en considérant simultanément ces décisions (ex. décider de la localisation des plateformes dont la capacité est également à définir).

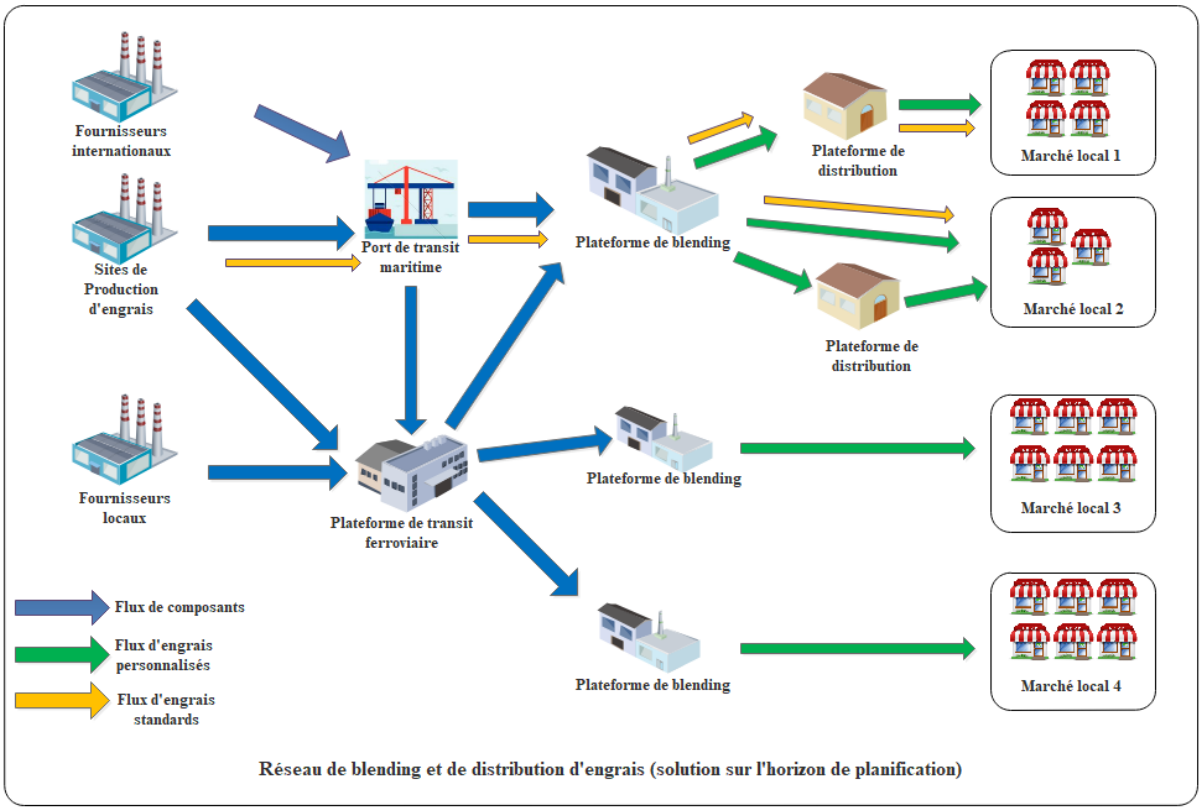

Figure 5.1 – Exemple de configuration type d'un futur réseau de distribution hybride

2.1. Localisation des plateformes de distribution et personnalisation

Dans cette partie, nous allons analyser les compromis à réaliser pour la localisation des plateformes logistiques considérées seules dans les réseaux distribution à concevoir. Ensuite, nous allons expliquer les inducteurs de la localisation de la différenciation retardée dans de réseaux de distribution hybrides. En synthèse, nous aurons une idée sur les arbitrages à effectuer lorsqu'un décideur pense à la localisation des plateformes logistiques et de personnalisation simultanément.

2.1.1. Localisation des plateformes logistiques

Penser une stratégie de localisation des plateformes logistiques revient à décider du nombre et du positionnement géographique optimaux des plateformes logistiques. La localisation discrète, sujet de notre étude, consiste à sélectionner un sous-ensemble de plateformes parmi un ensemble fini de localisations potentielles, en satisfaisant des objectifs donnés (par exemple : minimisation des coûts/maximisation des niveaux de service).

- Si nous retenons plusieurs localisations, nous allons réduire les coûts de distribution des produits finis, étant donné que les plateformes seront à proximité des zones de consommations (cela si la distribution finale s'effectue par camions et que la prestation est facturée en fonction de la distance parcourue), mais en contrepartie nous allons multiplier les investissements et les coûts de manutention, de stockage et d'exploitation fixes.
- Si nous retenons un nombre très réduit de plateformes candidates, nous allons économiser les investissements et les coûts d'exploitation par effet d'échelle, au prix d'une augmentation des coûts de distribution des produits finis (étant donné que les plateformes seront éloignées des zones de consommations).

Par conséquent, le nombre optimal des plateformes logistiques à localiser résultera d'un compromis entre les économies d'échelle d'investissement, les coûts d'exploitation et les économies du coût distribution et du temps de transport (i.e. gain en réactivité en aval).

2.1.2. Localisation de la différenciation retardée dans un réseau de distribution

Comme expliqué plus avant dans ce chapitre (§2.1), la localisation de la personnalisation (i.e. la différenciation retardée) dans la phase de distribution mérite d'être mûrement réfléchie, eu égard à ses influences potentielles sur la chaîne de valeur :

- Retarder la personnalisation dans un réseau distribution (i.e. allouer à chaque marché local une plateforme de personnalisation) permet de générer des économies du coût de stockage et de préserver la qualité des produits, ces derniers étant personnalisés et distribués rapidement dans le marché. Or, ce choix de positionnement plus aval dans un réseau engendre une accumulation des investissements. Par ailleurs, l'organisation du transport devient plus compliquée et onéreuse si les composants sont acheminés en vrac.
- Avancer la personnalisation plus amont dans un réseau de distribution permettra d'engendrer des économies d'échelle sur les investissements et les coûts de transport des composants mais risquera d'entraîner une accumulation des stocks et des retards de livraison si les offres de transport vers le marché ne sont pas compétitives et/ou une dégradation de la qualité des produits personnalisés s'ils sont transportés sur des routes endommagées.

Tenant compte de ces considérations, la localisation optimale de la personnalisation dans un réseau de distribution résultera d'un arbitrage entre les économies d'échelle d'investissement,

la charge d'exploitation des plateformes, le coût de transport et les économies de transport des produits personnalisés sous des conditions de distribution, d'offres logistiques et de sensibilité des produits au transport.

2.1.3. Synthèse : Localisation des plateformes logistiques et de personnalisation

En considérant simultanément la localisation des plateformes de distribution et de personnalisation, la complexité décisionnelle du problème explose. Ces deux décisions sont fortement interdépendantes. En effet, les plateformes de personnalisation constituent un point de découplage (i.e. flux poussés en amont et tirés en aval). Elles échangent les flux (produits et composants) avec les plateformes logistiques sans aucune hiérarchie prédéfinie (figure 5.1).

La localisation des plateformes de personnalisation dépendra de la localisation des plateformes de distribution (qui fournissent des composants et demandent des produits finis) et de la demande allouée. De même, la localisation des plateformes logistiques dépend du positionnement des plateformes de personnalisation (qui fournissent des produits finis et demandent des composants).

2.2. Dimensionnement des capacités de stockage et de personnalisation

Le dimensionnement des capacités (de stockage et de personnalisation) des réseaux de distribution hybrides, sujet de notre étude, revient à faire un choix discret d'un sous-ensemble de capacités discrètes parmi un ensemble fini de capacités. Cette hypothèse de capacité discrète s'avère être réaliste, étant donné que les équipements de stockage et de production sont conçus selon des configurations discrètes.

Dans ce qui suit, nous entendons par « les capacités de stockage amont », les capacités dédiées au stockage des composants (i.e. intrants de la personnalisation) et par « les capacités de stockage aval », les capacités de stockage des produits finis. Notons que les capacités de stockage des plateformes de personnalisation sont "hybrides" dans le sens où elles permettent le stockage des composants et des produits finis.

2.2.1. Dimensionnement des capacités de stockage amont

Comme les flux de composants sont poussés vers des plateformes logistiques et/ou de personnalisation, les capacités de stockage amont sont conditionnées par les volumes d'approvisionnement des composants et par la capacité de prélèvement et de stockage des plateformes aval (figure 5.2) :

- En présence des économies d'échelle d'approvisionnement, un approvisionnement massif engendre une diminution des coûts d'approvisionnement mais provoque une accumulation des stocks de composants.
- En présence d'économies d'échelle d'investissement en capacité de personnalisation (donc de capacité de personnalisation importante), la ventilation des stocks (i.e. consommation des stocks) sera rapide si le coût unitaire du stockage des produits finis est plus faible que le coût unitaire de stockage des composants. Dans ce cas, il sera économiquement efficient de produire le plus tôt possible (en tenant compte des commandes clients).

Par conséquent, le dimensionnement optimal de la capacité de stockage amont résulte du compromis entre les coûts d'approvisionnement/stockage amont et les coûts d'investissement en personnalisation/stockage aval.

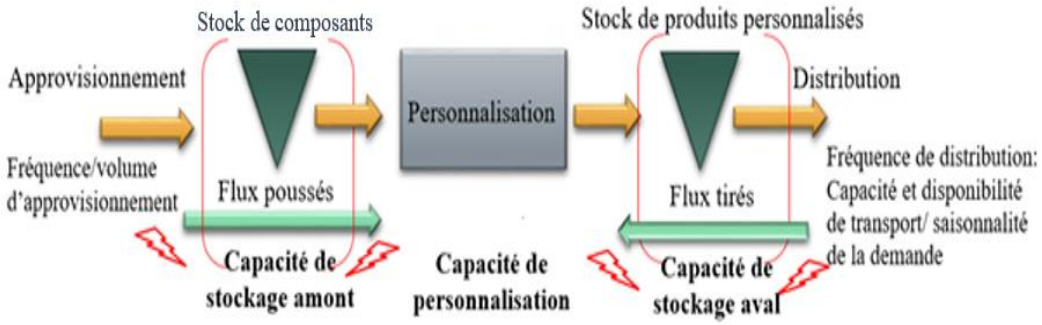

Figure 5.2 – Facteurs impactant les capacités de stockage amont et aval

2.2.2. Dimensionnement des capacités de stockage aval

Comme les flux des produits finis sont tirés par la demande finale, les capacités de stockage aval sont conditionnées par les volumes des demandes (qui dépendent de la localisation des plateformes de stockage) et par la fréquence de distribution des produits finis (qui est implicitement liée à la capacité de stockage des points de ventes).

- Pour tirer bénéfice des économies d'investissement, le stockage des produits finis est centralisé en amont d'un réseau de distribution. La fréquence de distribution aval sera faible en raison de manque d'offres de transport compétitives vers les marchés. Par conséquent, nous aurons une accumulation des stocks de produits finis, juste avant la saison de consommation, si les stocks sont centralisés.

- Pour se rapprocher des marchés et profiter d'économies éventuelles sur le coût de distribution aval, le stockage de produits finis sera décentralisé. Par conséquent, on aura une duplication de plateformes de stockage de faible capacité, ce qui est économiquement inefficient. Les produits personnalisés seront expédiés juste après leur personnalisation vers les marchés, ce qui réduit leurs coûts de stockage.

Le dimensionnement optimal des capacités de stockage aval est donc le fruit d'un compromis entre les économies d'échelle d'investissement en capacité de stockage et les économies du coût de distribution et de stockage permises par une décentralisation des capacités de stockage.

2.2.3. Dimensionnement des capacités de personnalisation

La capacité d'une unité de production peut se définir, en régime de croisière, par la production maximale réalisable par une unité de production pendant une période de référence, en réponse à une demande stationnaire suffisamment importante pour permettre cette production maximale. Selon le contexte industriel (§2.1), le dimensionnement des capacités de personnalisation doit être fait dans une optique d'optimisation globale. Il s'agit de dimensionner la capacité de personnalisation des réseaux de distribution, ce qui relève de deux décisions principales : choisir la capacité à installer dans chaque plateforme de personnalisation et décider de la polyvalence de chaque plateforme (i.e. du portefeuille de produits qui lui est associé). Cette polyvalence dépend de la localisation de la plateforme. Par exemple, une plateforme localisée près d'un marché local sera spécialisée et dédiée à ce marché ; il est donc efficient d'y installer une faible capacité. Par contre, une plateforme centralisée alimentant plusieurs marchés locaux aura une grande capacité et produira une grande diversité. Elle sera donc polyvalente.

Le dimensionnement optimal des capacités de personnalisation résulte d'un arbitrage entre l'efficience, en investissant dans des plateformes capacitaires et polyvalentes, et l'efficacité assurée par l'installation de capacités dédiées aux marchés locaux.

Par ailleurs, les échanges inter-plateformes de personnalisation offrent une possibilité de réduction des coûts d'exploitation (i.e. due à la mutualisation des flux). Ceci peut influencer les arbitrages. Par conséquent, optimiser la capacité de chaque plateforme en négligeant ces interactions inter-plateformes ne conduira guère à un optimum global.

2.3. Complexité décisionnelle du problème

Ce problème décisionnel de planification stratégique-tactique de réseaux de distribution hybrides revêt une complexité décisionnelle originale (figure 5.3). Celle-ci est due à la forte interdépendance entre les décisions sous-jacentes à ce problème (§2.1 et §2.2). Par conséquent, ce problème devient difficile à résoudre. Notons que les hypothèses des décisions de localisation sont basées sur le choix de dimensionnement des capacités et inversement, les décisions stratégiques de localisation reposent sur de fortes hypothèses sur les capacités des réseaux étudiés. De plus, les décisions de dimensionnement des capacités de personnalisation sont implicitement subordonnées à celles prises antérieurement pour le dimensionnement des capacités de stockage aval et d'acheminement des produits finis vers les marchés ; ainsi le dimensionnement obtenu est censé ne pas créer de problèmes en aval.

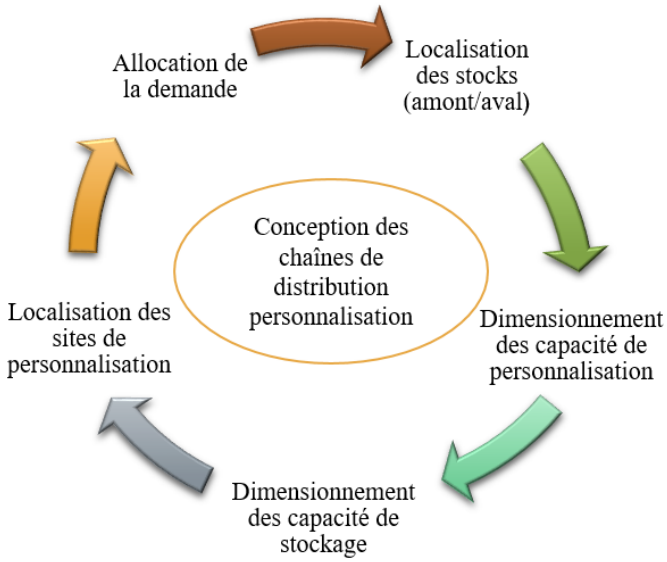

Figure 5.3 – Interdépendance entres les décisions de localisation et dimensionnement

Cette hypothèse de découplage avec l'aval à son pendant en amont : une personnalisation précoce s'accompagne d'une centralisation du stockage de composants tandis qu'une personnalisation retardée engendre forcément une décentralisation du stockage des produits personnalisés. La prise en compte des interactions et interdépendances entre les décisions peut conduire à des décisions plus efficientes, étant donné que l'optimisation faite à l'échelle locale, sans tenir compte des contraintes inhérentes aux autres problèmes décisionnels, conduit à des décisions globales non optimales. Ces implications restent valables lorsqu'il s'agit de dimensionner les capacités de personnalisation et de stockage ; un dimensionnement optimal

aura tendance à prendre en compte les échanges et interactions entre les plateformes, donc à effectuer une optimisation globale des capacités d'un réseau de distribution hybride.

Par ailleurs, les arbitrages conditionnant ces décisions auront tendance à varier en fonction des caractéristiques du marché, notamment la diversité, le volume, la saisonnalité et des spécificités du système de distribution (par exemple, des capacités de transport).

Par rapport à la diversité de produits finis, il semble logique que la production d'un ensemble de produits différents sur une même unité de personnalisation induit une diminution de sa capacité (due aux changements de formules) et par conséquent une augmentation des coûts de production et une diminution des économies d'échelle du coût fixe.

Par analogie, face à une diversité importante des composants, une personnalisation retardée peut engendrer une prolifération des coûts de transport amont et une rupture des stocks, en cas de faible capacité de transport sur long distance.

Les caractéristiques du marché et du réseau de distribution hybride font que les décisions de localisation et de dimensionnement doivent néanmoins être adaptées à chaque marché émergent. Dans ce contexte, une personnalisation précoce est favorisée dans le cas :

- de faible diversité globale des produits finis (portefeuille réduit) et de faible volume de demandes ;
- d'économies d'échelle d'investissement et des charges fixes ;
- d'indisponibilité ou de faible capacité de transport des produits ;
- de diversité importante des produits standards.

Une personnalisation retardée est recommandée dans le cas :

- d'une forte dynamique du marché ;
- de diversité globale importante des produits finis et de demande importante ;
- de faibles coûts de distribution aval (i.e. lors de la distribution des produits finis) ;
- de pics de saisonnalité importants du marché ;
- d'indisponibilité ou de faible capacité de transport des produits finis sur longue distance.

Eu égard aux considérations ci-dessus, les décisions de localisation et de dimensionnement des capacités doivent être prises simultanément avec une vision globale des réseaux logistiques, tenant compte des spécificités des marchés africains cibles et de leur système de distribution.

3. Modélisation du problème

Cette partie s'intéresse à la modélisation du problème de conception de réseaux de distribution hybrides servant les marchés africains. Les parties précédentes ont introduit le contexte du problème décisionnel étudié et expliqué sa complexité. Dans ce qui suit, nous proposons dans un premier temps d'appliquer la méthodologie ASCI (voir chapitre 3) au problème étudié pour élaborer un modèle systémique générique de conception des réseaux de distribution hybrides (§3.1). Ensuite, nous déduirons du modèle systémique un modèle mathématique associé au problème (§3.2).

3.1. Modèle systémique du problème

Dans ce qui suit, nous proposons un modèle systémique générique des réseaux de distribution hybrides dans un contexte de planification stratégique-tactique. En reprenant le principe de décomposition en trois sous-systèmes (physique, logique et décisionnel) de la méthodologie ASCI, nous présentons tour à tour les trois sous-systèmes ainsi que leurs dépendances en utilisant le langage de modélisation UML.

3.1.1. Sous-Système Physique (SSP)

Le sous-système physique correspondant au problème de conception de réseaux de distribution hybrides est défini par les zones de production (fournisseurs de composants), les plateformes de personnalisation, les plateformes de distribution, les ports de transit, les points de ventes, ainsi que les moyens de transport reliant ces entités. La figure 5.4 donne une vision holistique du modèle UML de ce sous-système physique.

- *Les zones de production (fournisseurs) :* les zones de production sont susceptibles d'approvisionner les plateformes de distribution et de personnalisation en composants conditionnés en vrac selon leur capacité de production et leur spécialisation. Les fournisseurs se distinguent par leur proximité aux marchés (fournisseurs locaux, fournisseurs internationaux) et par leur niveau d'intégration dans la chaîne (fournisseurs internes, fournisseurs externes). Les premiers livrent les commandes des plateformes

selon la disponibilité des moyens de transport (trains ou camions) tandis que les seconds livrent via des navires vraquiers. Chaque zone de production est caractérisée par une localisation, une capacité de production périodique, un portefeuille de composants (dénotant la spécialisation ou la polyvalence de l'entité de production). Chaque fournisseur peut approvisionner une ou plusieurs plateformes (de distribution et/ou de personnalisation), soit directement soit via les ports de transit. De même, une plateforme peut être alimentée par un ou plusieurs fournisseurs de composants.

- *Les plateformes de personnalisation* : chaque plateforme de personnalisation se caractérise par un positionnement géographique et comporte une ou plusieurs ressources de production et de stockage des produits finis (conditionnés en sacs) et des composants (conditionnés en vrac). Chaque ressource de production est caractérisée par : une capacité de production périodique (ex : tonnes/heure), un coût d'installation et un coût d'exploitation (fixe et variable). De même, chaque ressource de stockage est dotée d'une capacité de stockage discrète qui peut s'exprimer en tonnes, d'un coût d'installation et d'un coût d'exploitation fixe et variable. Une plateforme de personnalisation peut approvisionner (respect. être approvisionnée par) une ou plusieurs plateformes de distribution (respect. de personnalisation).

- *Les plateformes de distribution (stockage) :* chaque plateforme de distribution se définit par un positionnement géographique et comporte une ou plusieurs ressources de stockage de produits finis (en conteneurs contenant des sacs) et/ou de composants (en vrac). Une plateforme de distribution peut être représentée par une plateforme de personnalisation ayant une capacité de production nulle.

- *Les ports et plateformes de transit :* ils constituent des points de rupture et de transbordement des flux. Les ports consolident les flux depuis les zones de production internationales alors que les plateformes de transit assurent le transit des flux émanant des zones de production régionales ou locales et des plateformes. Chaque port de transit se caractérise par une localisation géographique, une capacité de transit (par exemple en tonnes/jours ou conteneurs/jour) et une modalité (maritime, ferroviaire). Il peut être alloué à une ou plusieurs plateformes de personnalisation ou de distribution.

- *Les points de ventes :* les marchés locaux sont desservis par des points de ventes. Chaque point de vente est caractérisé par un positionnement géographique, une capacité de stockage limitée, une saisonnalité d'approvisionnement et un besoin en produits finis

spécifiques. Chaque point de vente peut être approvisionné par une ou plusieurs plateformes.

- *Les moyens de transport :* ils assurent la liaison entre les différentes entités décrites ci-dessus. Chaque moyen de transport est caractérisé par un mode de transport (routier, ferroviaire, maritime), une capacité maximale de transport, un prix de prestation de transport, un type de conditionnement (vrac, conteneur).

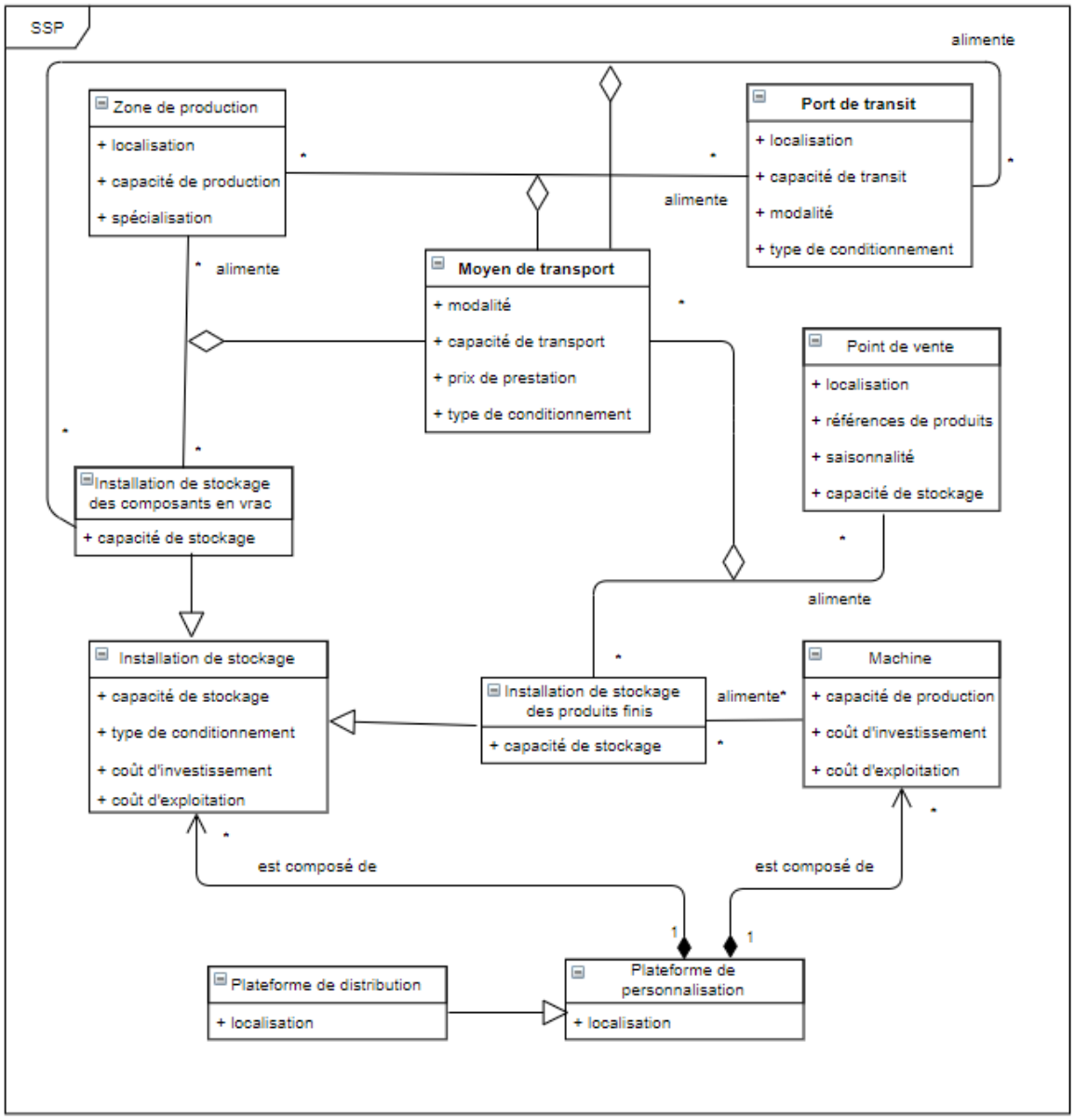

Figure 5.4 – Diagramme de classe du sous-système physique (SSP)

3.1.2. Sous-Système Logique (SSL)

Le sous-système logique est formé de l'ensemble des flux physiques transitant par le réseau de distribution notamment les composants et les produits finis ainsi que les demandes des points de vente. Chaque demande porte sur un ou plusieurs produits finis. Chaque produit se caractérise par une référence, un type de conditionnement, une nomenclature et une gamme opératoire. Un produit nécessite au moins trois composants. Les composants sont caractérisés par une référence et un type de conditionnement. A chaque produit fini, nous associons une ou plusieurs nomenclatures. Chaque composant peut être utilisé pour la production d'un ou plusieurs produits finis. La figure 5.5 donne une vision holistique du modèle UML de ce sous-système logique.

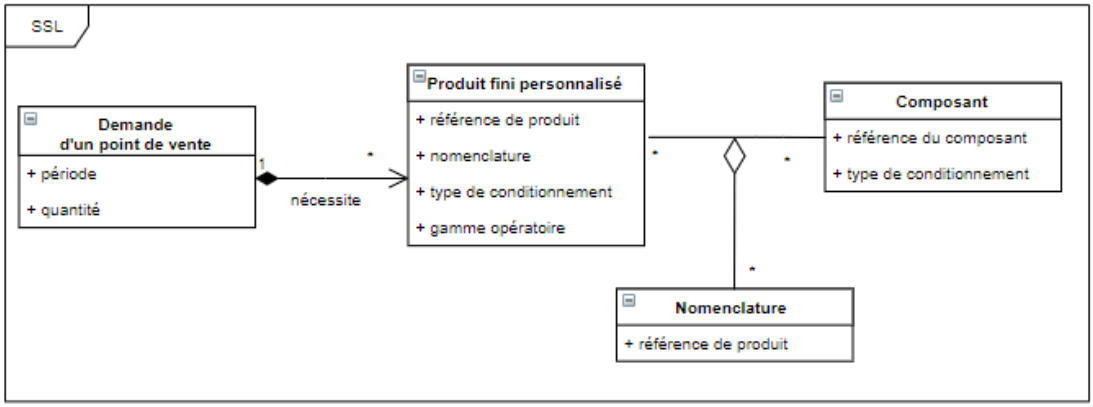

Figure 5.5 – Diagramme de classe du sous-système logique (SSL)

3.1.3. Sous-système décisionnel (SSD)

Le sous-système décisionnel agit sur les deux sous-systèmes précédemment cités (§3.1.1 et §3.1.2). Ce sous-système regroupe les contraintes liées aux réseaux de distribution hybrides ainsi que le modèle de coût décisionnel.

La majorité des contraintes concernent la limite de capacité et son utilisation ; d'autres sont liées au budget d'investissement et à la demande des points de ventes (marchés). Citons :

- *Contrainte de capacité de personnalisation* : chaque installation de personnalisation dispose d'une capacité de production maximale à ne pas dépasser ;
- *Contrainte de capacité de stockage* interne : chaque localisation candidate se caractérise par une superficie maximale offerte. La plateforme installée dans cette localisation aura une capacité de stockage théorique inférieure à la capacité maximale offerte.

- *Contrainte de capacité d'approvisionnement des fournisseurs :* les approvisionnements périodiques auprès fournisseurs ne doivent pas dépasser leur capacité de production maximale offerte.
- *Contrainte de capacité de transport* : les livraisons périodiques par un véhicule (camion, train ou navire) ne doivent pas dépasser sa capacité maximale de transport.
- *Contrainte de capacité de transit :* les flux transitant par un port de transit maritime ou une plateforme de transit ferroviaire ne doivent pas dépasser la capacité de traitement du port ou de la plateforme de transit. Celle-ci dépend de l'état du port ou de la plateforme de transit et de la demande de transit.
- *Contrainte de capacité des points de ventes :* les livraisons périodiques aux points de ventes doivent respecter leur capacité de stockage.
- *Contrainte de satisfaction de la demande* : la demande périodique des marchés locaux doit être totalement satisfaite, en quantité, diversité et qualité (état du produit) requise.
- *Contrainte de proximité aux marchés* : pour garantir une meilleure réactivité aux demandes des marchés locaux, les stocks des produits finis doivent être situés à proximité des marchés locaux.
- *Contrainte d'utilisation des capacités de personnalisation et de stockage* : Pour une meilleure utilisation des ressources de personnalisation et/ou de stockage, la charge périodique de personnalisation et/ou de stockage ne doit pas dépasser une limite d'utilisation maximale définie par le constructeur (en cas d'installation de personnalisation) ou par le gestionnaire de la plateforme de stockage (en cas d'installation de stockage).
- *Contrainte de limite du budget* : l'investissement réalisé pour la mise en œuvre des nouvelles installations de production/stockage, voire l'extension de ces installations, est limité par un budget.
- *Contrainte de conservation des stocks au niveau des plateformes (de distribution et/ou de personnalisation).*
- *Contrainte de conservation des flux de transit au niveau des ports de transit maritime et des plateformes de transit ferroviaire.*

La figure 5.6 illustre le diagramme de classes associé aux contraintes décrites ci-dessus.

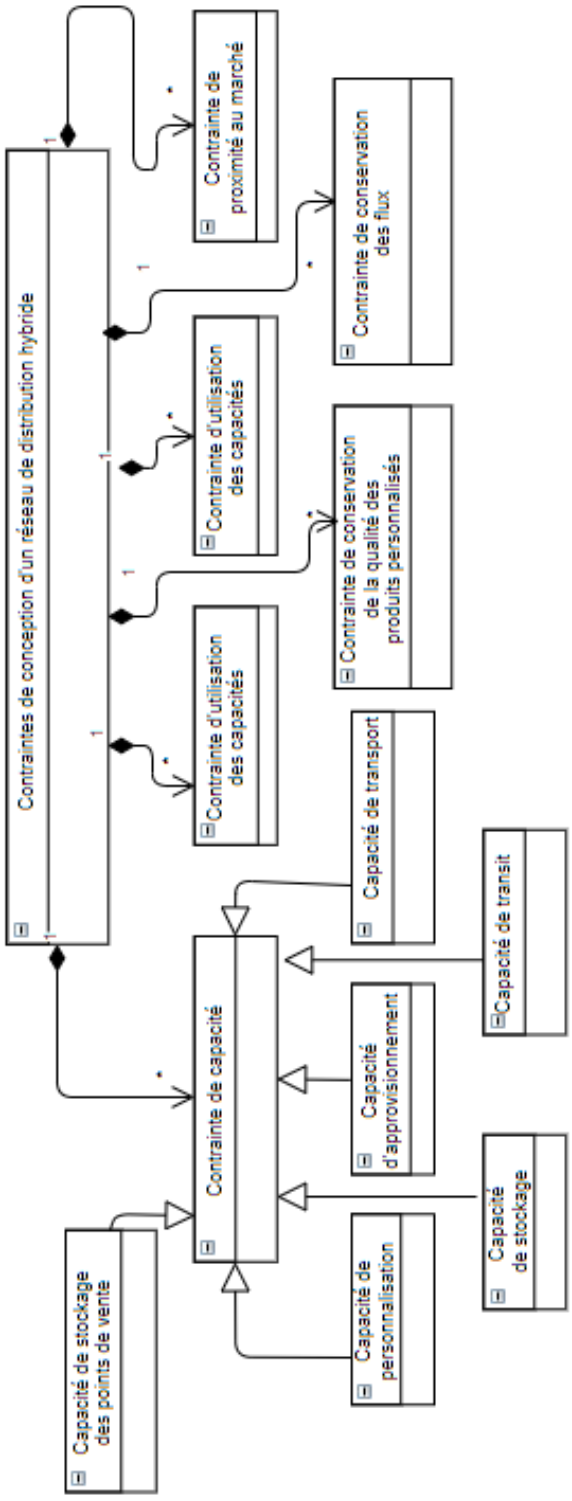

Figure 5.6 – Diagramme de classes des contraintes

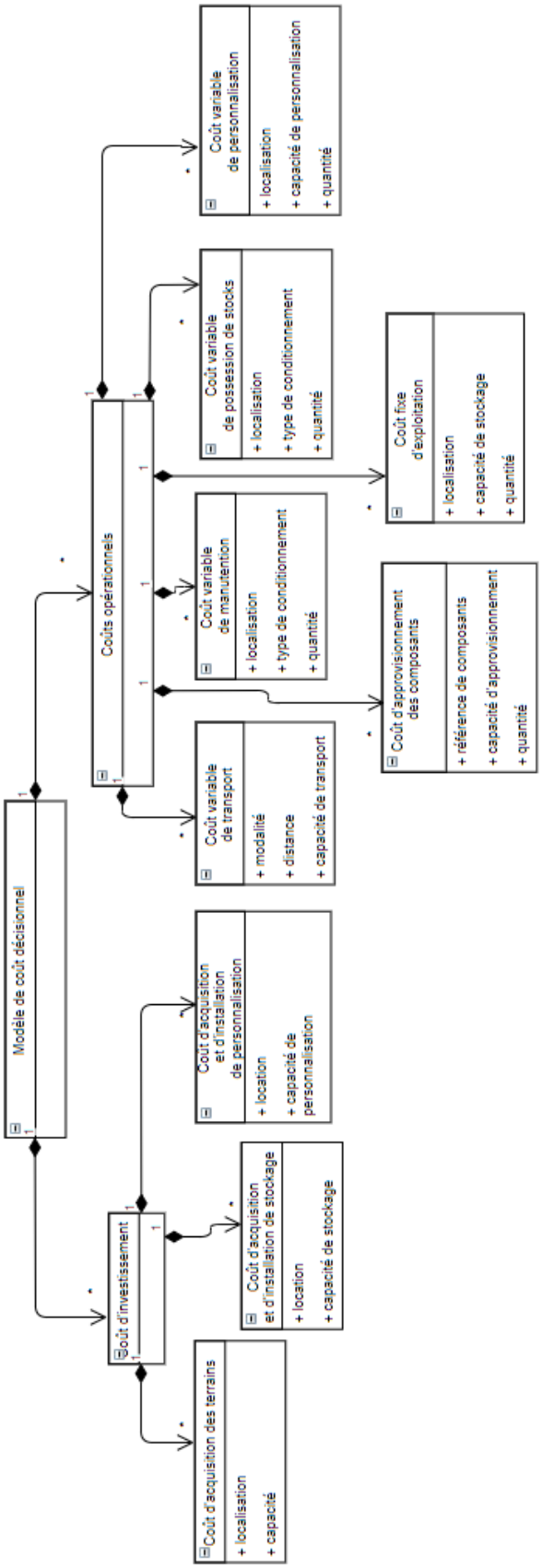

Figure 5.7 – Diagramme de classes du modèle de coûts

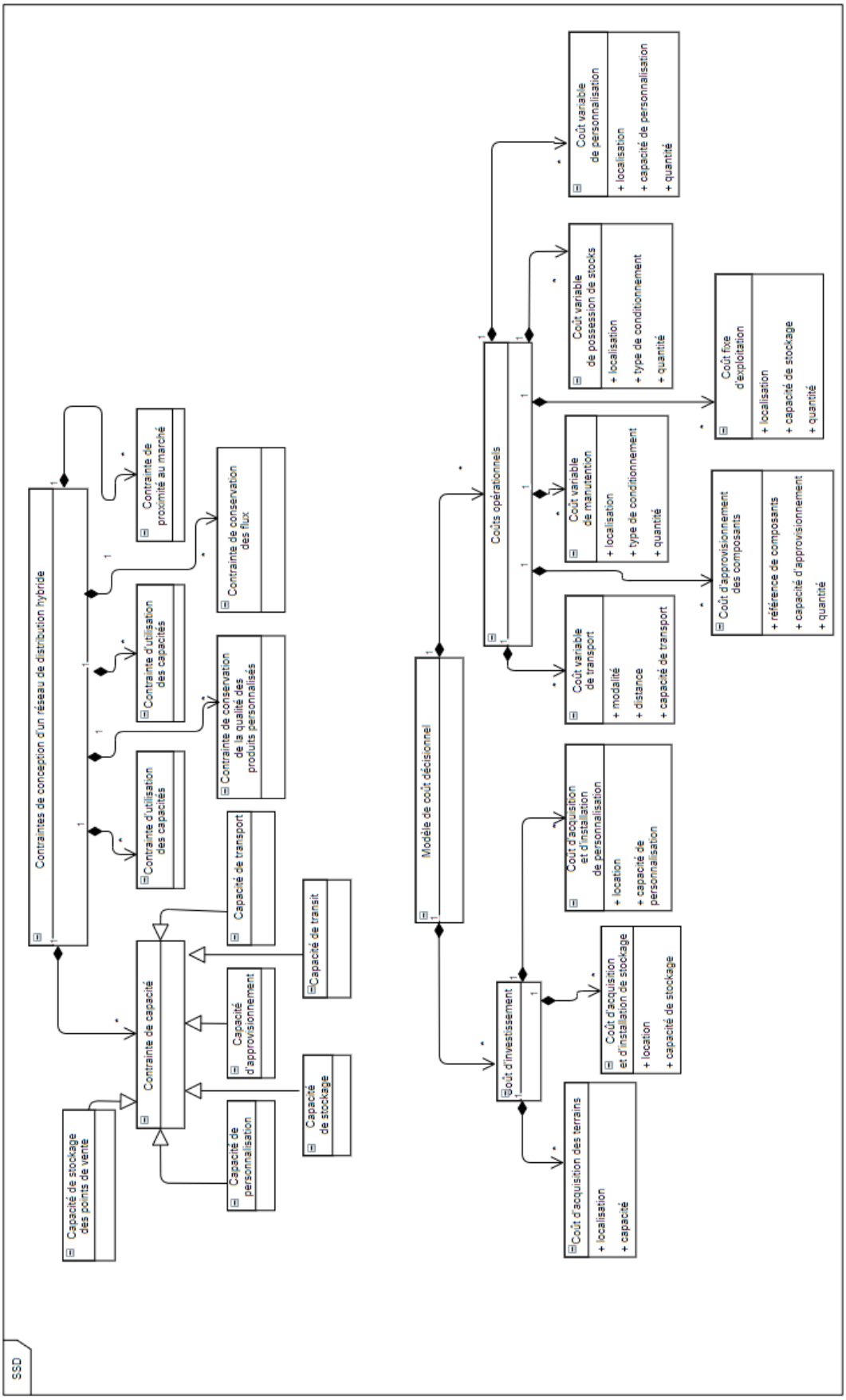

Figure 5.8 – Diagramme de classes UML du sous-système décisionnel (SSD)

Le modèle de coût est constitué de deux grandes catégories de coûts : les coûts stratégiques et les coûts opérationnels d'exploitation. La figure 5.7 décrit le diagramme de classes associé à ce modèle de coûts. La première catégorie comprend l'investissement réalisé pour l'acquisition des terrains, des équipements modulaires de personnalisation et de stockage et les frais d'installation. Ces coûts traduisent des économies d'échelle, varient en fonction des pays (i.e. des marchés régionaux) et restent stables dans le même pays. Ainsi, pour la même capacité totale, il est moins onéreux d'investir dans de grandes plateformes en faible nombre que d'investir dans de petites plateformes à faible capacité. La deuxième catégorie regroupe des coûts récurrents générés par le fonctionnement opérationnel des réseaux de distribution hybrides. Ces coûts varient en fonction des localisations. On peut citer :

- *Le coût variable de transport (routier, ferroviaire et maritime)* : il dépend de la quantité transportée, de la distance et de la capacité de transport offerte ;
- *Le coût variable de manutention* : il dépend des quantités traitées/stockées, de la localisation des plateformes (i.e. de la main d'œuvre dans cette localisation) et du type de conditionnement des marchandises (composants en vrac/produits finis en sac) ;
- *Le coût variable de possession de stocks :* il dépend de la référence du produit et des quantités stockées ;
- *Le coût variable de personnalisation :* il varie en fonction de la référence du produit fini à élaborer, de la capacité de personnalisation de l'installation et de la main d'œuvre, donc de la localisation de la plateforme ;
- *Le coût fixe d'exploitation d'une plateforme* : il varie en fonction de la capacité de stockage d'une plateforme et de sa localisation ;
- *Le coût variable d'approvisionnement d'un composant* : il varie en fonction de la référence des composants achetés et des quantités approvisionnées.

Ainsi, le diagramme de classes global du sous-système décisionnel est représenté sur la figure 5.8.

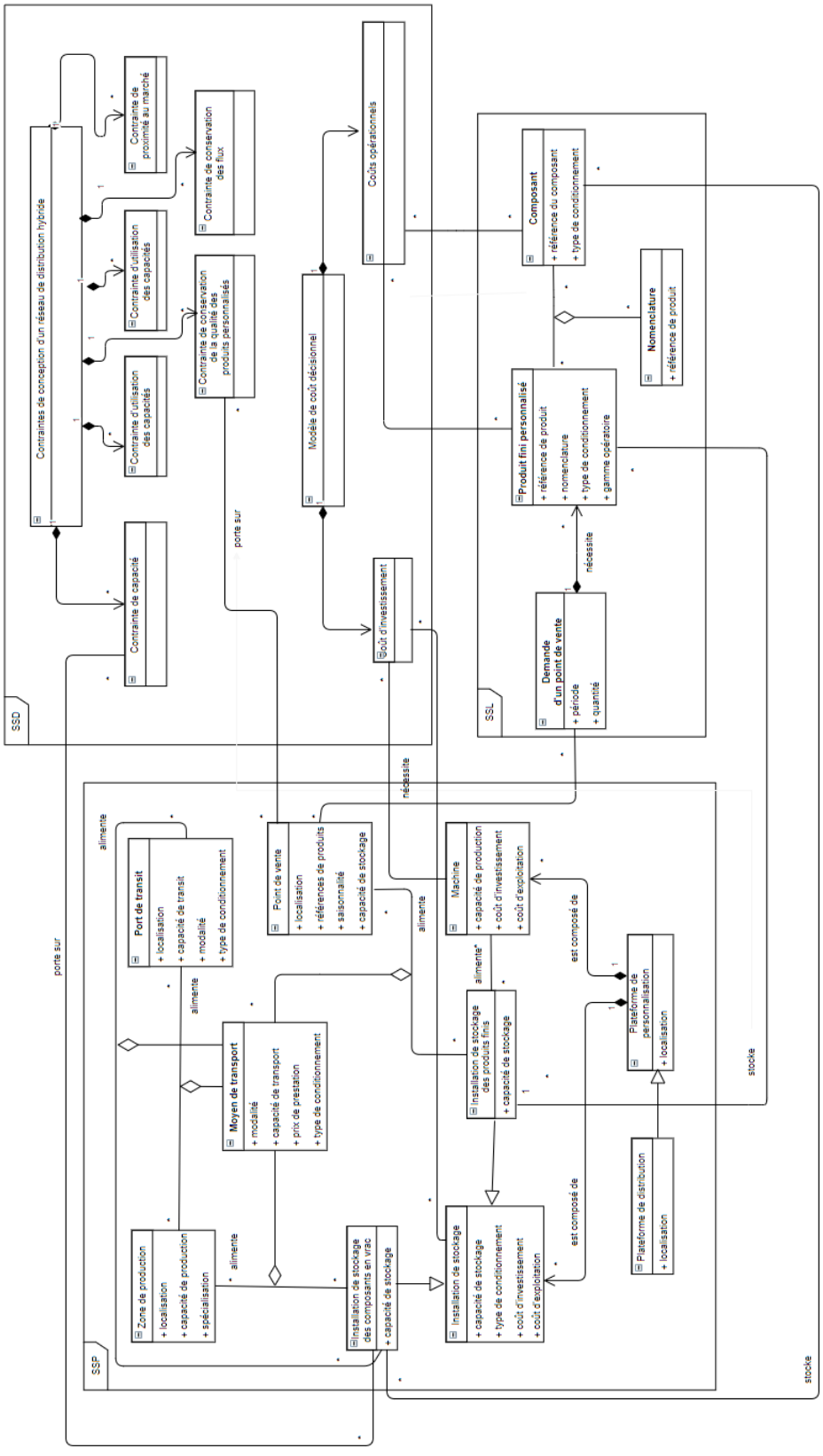

Figure 5.9 – Diagramme de classes global UML du problème de conception de réseaux de distribution hybrides

3.1.4. Modèle systémique global sous UML

Le modèle systémique global du problème de conception de réseaux de distribution hybrides est représenté par le diagramme UML de la figure 5.9. Ce dernier regroupe les trois sous-systèmes décrits précédemment (§3.1.1, §3.1.2 et §3.1.3) ainsi que les liens de dépendances qui les relient deux à deux. Les liens entre le sous-système logique et le sous-système physique se traduisent par les flux de production, stockage et transport, solutions du problème de localisation et de dimensionnement des plateformes de distribution/personnalisation. Les liens entre le sous-système décisionnel et le sous-système physique matérialisent la projection des contraintes de capacités et d'utilisation des capacités sur le sous-système physique. Pour simplifier la lecture de la figure 5.9 et la rendre plus lisible, nous n'avons représenté que quelques connexions.

3.2. Modélisation mathématique du problème

Dans cette partie, nous allons détailler la modélisation mathématique générique du problème de conception d'un réseau de distribution hybride à partir du modèle systémique décrit dans la partie précédente (§3.1). Ce modèle a pour objectif d'identifier les nouvelles plateformes à ouvrir, de décider de leur future activité (personnalisation et/ou distribution), de déterminer leurs capacités de production et/ou de stockage et également de décider de l'allocation des flux dans le réseau dans un contexte déterministe.

3.2.1. Description du problème

Nous considérons un réseau constitué de zones de production de fournisseurs régionaux et internationaux, de marchés de consommation locaux, de localisations potentielles de plateformes de distribution et/ou de personnalisation et de ports de transit (figure 5.1). La diversité des produits augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche des marchés locaux.

Chaque marché local regroupe un ensemble de points de ventes, chacun nécessitant une quantité donnée d'un ou plusieurs produits finis, spécifiques ("*blendés*") ou standards, pendant quelques mois de l'année. Les produits finis spécifiques seront personnalisés au niveau des futures plateformes de personnalisation tandis que les produits finis standards (représentant à peu près 20% des produits finis qui sont communément demandés par les marchés) seront importés directement depuis les fournisseurs.

Le processus de personnalisation consiste à assembler des composants suivant une nomenclature spécifique et à conditionner les produits finaux dans des emballages adaptés. Les produits finis et les composants peuvent avoir des conditionnements différents. Les composants sont fabriqués soit par des fournisseurs internes, soit par des fournisseurs externes ; ils sont ensuite expédiés vers les ports de transit avant d'atteindre les plateformes de distribution et/ou de personnalisation. Les ports de transit peuvent offrir une prestation de stockage de moins d'une journée. Une plateforme de personnalisation assure, en plus de la personnalisation des produits, le stockage et le conditionnement des produits finis. Après la phase de personnalisation, les produits finis spécifiques sont soit stockés au niveau d'une plateforme de personnalisation soit expédiés vers une plateforme de distribution. Ils peuvent être aussi expédiés sur le marché local. Les produits finis standards, fortement demandés, sont soit stockés dans le réseau jusqu'à la réception des commandes des clients soit expédiés directement vers les marchés locaux.

Tableau 5.1 – Notations relatives au système de production

	s	Indice de la zone de production $s \in S$
	gp	Indice de la capacité modulaire de personnalisation $gp \in GP$
	rw	Indice de la référence d'un composant $rw \in Rw$
	ks	Indice de la référence d'un produit fini standard $ks \in Ks$
	kp	Indice de la référence d'un produit fini personnalisé $kp \in Kp$
	k	Indice de la référence d'un produit fini $k \in K$
	q	Indice de la référence des produits/composants $q \in QT$
	a	Indice du type d'une plateforme $a \in \{distribution, personnalisation\}$
Ensembles	S	Ensemble des fournisseurs (internes et externes)
	GP	Ensemble des capacités modulaires de personnalisation
	Rw	Ensemble des références des composants
	Kp	Ensemble des références des produits standards
	Ks	Ensemble des références des produits personnalisés
	K	Ensemble des références des produits finis totaux $K = Ks \cup Kp$
	QT	Ensemble des références produits totaux (composants, produits standards et produits personnalisés) $QT = K \cup Rw$
Paramètres	$PdCp_s^q$	Capacité de production du fournisseur $s \in S$ du composant ou du produit standard de référence $q \in Rw \cup Kp$
	PCp_{gp}	Capacité de personnalisation mensuelle (tonnes/mois) relative à la configuration de capacité $gp \in GP$
	$PCpI_l$	Capacité de personnalisation (tonnes/mois) initialement opérationnelle à la plateforme $l \in LP$
	$\beta_{\max}$	Taux d'utilisation maximum des capacités
	N_{rw}^{kp}	Nomenclature de personnalisation : quantité du composant $rw \in Rw$ nécessaire pour élaborer le produit de référence $kp \in Kp$

Tableau 5.2 – Notations relatives système de distribution

Indices	le	Indice de la localisation d'une plateforme existante $le \in LPe$
	l_n	Indice de la localisation d'une nouvelle plateforme $l_n \in LPn$
	l	Indice de la localisation d'une plateforme $l \in LP = LPn \cup LPe$
	pm	Indice de la localisation d'un port de transit maritime $pm \in Pm$
	ps	Indice de la localisation d'un port de transit ferroviaire $ps \in Ps$
	p	Indice de la localisation d'un port ou plateforme de transit $p \in P = Ps \cup Pm$
	gs	Indice d'une capacité modulaire de stockage $gs \in GS$
	tr	Indice des types des camions $tr \in Tr$
	trl	Indice de type de trains $trl \in Trl$
	ts	Indice de type des navires $ts \in Ts$
Ensembles	LPn	Ensemble des localisations potentielles pour la mise en œuvre des nouvelles plateformes
	LPe	Ensemble de localisations des plateformes existantes
	Pm	Ensemble des localisations des ports de transit maritimes
	Ps	Ensemble des localisations des ports de transit ferroviaires
	GS	Ensemble de capacités modulaires de stockage
	Tr	Ensemble de types de camions
	Trl	Ensemble de types de trains
	Ts	Ensemble de types de navires
Paramètres	$SCp_l^{\max}$	Capacité de stockage maximale (tonnes) offerte par la localisation $l \in LP$
	SCp_{gs}	Capacité de stockage (tonnes) relative à la configuration de capacité $gs \in GS$
	$SCpI_l$	Capacité de stockage (tonnes) initialement disponible à la plateforme située au niveau de la localisation $l \in LP$
	$TRCp_{ps}$	Capacité de transit (tonnes/période) au niveau d'une plateforme de transit ferroviaire $ps \in Ps$
	$TSCp_{pm}$	Capacité de transit (tonnes/période) au niveau d'un port de transit maritime $pm \in Pm$
	$TCpR_n^{tr}$	Capacité de transport (tonnes) d'un camion de type $tr \in Tr$ sous le mode de conditionnement de transport $n \in \{vrac, conteneur\}$
	$TCpF_n$	Capacité de transport (tonnes) d'un wagon sous le mode de conditionnement de transport $n \in \{vrac, conteneur\}$
	$TCpM_n^{ts}$	Capacité de transport (tonnes) d'un navire de type $ts \in Ts$ sous le mode de conditionnement de transport $n \in \{vrac, conteneur\}$
	Nb^{trl}	Nombre de wagons dans un train de type $trl \in Trl$
	$LinkR_{o,d}^n$	Matrice booléenne qui reflète l'existence d'une offre de transport routier entre les nœuds d'origine $o \in O = S \cup P \cup LP$ et de destination $d \in D = LP \cup ZT$ selon le mode de conditionnement de transport $n \in \{vrac, conteneur\}$
	$LinkF_{o,d}^n$	Matrice booléenne qui reflète l'existence d'une offre de transport ferroviaire entre les nœuds d'origine $o \in S \cup P$ et de destination $d \in Ps$ selon le mode de conditionnement de transport $n \in \{vrac, conteneur\}$
	Bin_n^k	Matrice de booléenne qui vaut 1 si le produit $q \in QT$ peut être conditionné selon le mode de conditionnement de transport $n \in \{vrac, conteneur\}$
	$Dist_{o,d}$	Matrice de distance entre le nœud d'origine $o \in O$ et le nœud de destination $d \in D$

Tableau 5.3 – Notations relatives à la demande

Paramètre/indice	Description
z_T	Indice de la localisation d'un marché de consommation local $z_T \in ZT$
ZT	Ensemble des localisations des marchés locaux
$d_{z_T}^{k,t}$	Demande du produit de référence $k \in K$ d'un marché local $z_T \in ZT$ pendant la période $t \in T$
$SCpM_{z_T}$	Capacité de stockage des points de ventes localisés au niveau du marché local $z_T \in ZT$

Les tableaux 5.1, 5.2 et 5.3 regroupent les notations (indices et paramètres) relatives aux systèmes de production, de distribution et à la demande du marché. Nous notons $O = LP \cup P \cup S$ l'ensemble des localisations des nœuds d'origine et $D = LP \cup ZT$ l'ensemble des localisations des nœuds de destination.

Tableau 5.4 – Les variables de décision stratégiques

Variable	Description
$o_{l_n}^{a}$	1 si une nouvelle plateforme est ouverte au niveau la localisation $l_n \in LPn$ au début de l'horizon de planification T et opérant l'activité $a \in \{distribution, personnalisation\}$, 0 sinon
s_l^{gs}	1 si une nouvelle capacité de stockage modulaire $gs \in GS$ est installée au niveau d'une nouvelle ou d'une ancienne plateforme $l \in LP$ au début de l'horizon de planification T, 0 sinon
b_l^{gp}	1 si une nouvelle capacité de personnalisation $gp \in GP$ est installée au niveau d'une nouvelle ou d'une ancienne plateforme $l \in LP$ au début de l'horizon de planification T, 0 sinon
c_{le}	1 si une plateforme existante au niveau de $le \in LPe$ est fermée au début de l'horizon de planification T, 0 sinon

3.2.2. Hypothèses

Comme explicité dans la section §2.2, nous allons nous focaliser sur la modélisation et la résolution du problème en univers certain (i.e. déterministe), en supposant que les décisions stratégiques (localisation et dimensionnement) sont définies au début de l'horizon de planification et restent inchangées. De plus, les décisions tactiques sont prises sur plusieurs périodes identiques (mois, trimestres, etc.) au cours de l'horizon de planification *T*.

Par ailleurs, nous supposons que :

- le nombre de niveaux du réseau de distribution n'est pas prédéterminé et peut varier d'un marché régional à l'autre ;

- les nouvelles et les anciennes plateformes ne peuvent acquérir et installer une nouvelle capacité modulaire qu'à la première période de planification ; une fois installée, cette capacité ne peut pas être modifiée (étendue ou relocalisée) ;
- l'acquisition des capacités se fait par la sélection d'un sous-ensemble de capacités modulaires hétérogènes ;
- une fois une nouvelle plateforme est ouverte, elle ne peut pas être fermée ;
- de même, une fois une plateforme existante est fermée, elle ne peut pas être réouverte ;
- aucune restriction n'est imposée sur le transfert des flux entre les plateformes du réseau de distribution hybride (i.e. la multi-allocation est possible) ;

Tableau 5.5 – Les variables de décision tactiques

Variable	Description
$y_{l_n,d}$	1 s'il existe un flux qui part d'une nouvelle plateforme localisée à la localisation $l_n \in LPn$ vers le nœud de destination $d \in D = LP \cup ZT$; 0 sinon
$fr_{o,d}^{q,t}$	Quantité de flux de composants ou de produits finis $q \in QT$ expédiée par le nœud d'origine $o \in O = LP \cup P \cup S$ vers le nœud de destination $d \in D = LP \cup ZT$ pendant la période $t \in T$ par voie routière
$ff_{o,d}^{q,t}$	Quantité de flux de composants ou de produits finis $q \in QT$ expédiée par le nœud d'origine $o \in P \cup S$ vers le nœud de destination $d \in Ps$ pendant la période $t \in T$ par voie ferroviaire
$fm_{o,d}^{q,t}$	Quantité de flux de composants ou de produits finis $q \in QT$ expédiée par le nœud d'origine $o \in S$ vers le nœud de destination $d \in Pm$ pendant la période $t \in T$ par voie maritime
$I_{l,q}^{t}$	Niveau de stock de composants ou de produits finis de référence $q \in QT$ au niveau de la plateforme $l \in LP$ à la fin de la période $t \in T$
$\mathrm{P}_{l}^{kp,gp,t}$	Quantité des flux des produits personnalisés de référence $kp \in Kp$ par l'installation de capacité $gp \in Gp$ au niveau d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$ pendant la période $t \in T$
$VR_{o,d}^{q,tr,t}$	Le nombre de camions de type $tr \in Tr$ transportant le flux de composants de référence $q \in Rw$ entre le nœud d'origine $o \in O$ et le nœud de destination $d \in D$ pendant la période $t \in T$
$SR_{o,d}^{tr,t}$	Le nombre de camions de type $tr \in Tr$ transportant des produits finis ensachés entre le nœud d'origine $o \in O$ et le nœud de destination $d \in D$ pendant la période $t \in T$
$VF_{o,d}^{q,trl,t}$	Le nombre de wagons vraquiers de type $trl \in Trl$ transportant le flux de composants de référence $q \in Rw$ entre l'origine $o \in S \cup P$ et le nœud de destination $d \in Ps$ pendant la période $t \in T$
$SF_{o,d}^{trl,t}$	Le nombre de wagons-conteneurs de type $trl \in Trl$ transportant les produits finis entre l'origine $o \in S \cup P$ et le nœud de destination $d \in Ps$ pendant la période $t \in T$
$VM_{o,d}^{q,ts,t}$	Le nombre de navires de type $ts \in Ts$ transportant le flux de composants de référence $q \in Rw$ entre l'origine $o \in S$ et le nœud de destination $d \in Pm$ pendant la période $t \in T$
$SM_{o,d}^{ts,t}$	Le nombre de conteneurs de type $ts \in Ts$ transportant les produits finis entre l'origine $o \in S$ et le nœud de destination $d \in Pm$ pendant la période $t \in T$

- la distribution finale du dernier kilomètre n'est pas abordée dans le modèle ci-dessous, nous supposons qu'elle est assurée par des points de ventes ayant une capacité de stockage limitée. Certains de ces marchés sont déjà servis par d'anciennes plateformes ayant des capacités dédiées à ces marchés.

3.2.3. Variables de décision

Les tableaux 5.4 et 5.5 résument les variables de décision respectivement stratégiques et tactiques. Les variables d'allocation des flux routiers (respect. ferroviaires) sont définies selon le prédicat F1 (respect. F2) qui conditionne l'existence d'un flux entre deux nœuds s'il existe une offre de transport routier (respect. ferroviaire) selon au moins un des types de conditionnement.

$$o,d,k \mid o \neq d \wedge \sum_{\substack{n \in \{vrac,\\ conteneur\}}} LinkR_{o,d}^{n,t} \times Bin_n^k \geq 1 \Rightarrow F1 = vrai \tag{5.1}$$

$$o,d,k \mid o \neq d \wedge \sum_{\substack{n \in \{vrac,\\ conteneur\}}} LinkF_{o,d}^{n,t} \times Bin_n^k \geq 1 \Rightarrow F2 = vrai \tag{5.2}$$

3.2.4. Contraintes

- ***Contraintes de limite de budget d'investissement***

L'ouverture des nouvelles plateformes, l'acquisition des capacités modulaires de stockage et de personnalisation et la fermeture des plateformes existantes sont sujettes à une limite de budget d'investissement (5.3). Nous supposons qu'un budget d'investissement ***B*** est disponible pendant tout l'horizon de planification (défini par les décideurs).

$$\sum_{l \in LP, gs \in GS} s_l^{gs} \times OC_l^{gs} + \sum_{l \in LP, gp \in GP} b_l^{gp} \times PSC_l^{gp} + \sum_{le \in LPe} c_{le} \times CC_{le} \leq B \tag{5.3}$$

- ***Contrainte de satisfaction de la demande***

La contrainte (5.4) stipule que la demande globale sur tout l'horizon de planification doit être totalement satisfaite.

$$\forall z_T \in ZT \wedge k \in K \mid \sum_{l \in LP \cup P, t \in T \mid F1 = vrai} fr_{l,z_T}^{k,t} = \sum_{t \in T} d_{z_T}^{k,t} \tag{5.4}$$

- ***Contraintes liées à la capacité de stockage des points de vente***

Les contraintes (5.5, 5.6) concernent le lissage de la charge au niveau des points de vente dans chaque marché local. La contrainte (5.5) stipule qu'à chaque période, le cumul des livraisons périodiques vers chaque marché doit au moins couvrir la demande périodique cumulée. La contrainte (5.6) précise la limite de capacité des points de vente d'un marché local : la livraison périodique vers ces derniers ne doit pas dépasser leur capacité de stockage offerte pendant une période donnée.

$$\forall z_T \in ZT \wedge k \in K \wedge t \in T \mid \sum_{\substack{l \in LP \cup P, p \in T \mid \\ F2 = vrai \wedge p \le t}} fr_{l,z_T}^{k,p} \ge \sum_{p \in T \mid p \le t} d_{z_T}^{k,p} \tag{5.5}$$

$$\forall z_T \in ZT \wedge t \in T \wedge k \in K \mid \sum_{l \in LP \cup P \mid F1 = vrai} fr_{l,z_T}^{k,t} \le SCpM_{z_T} \tag{5.6}$$

- ***Contraintes relatives à la localisation et le dimensionnement des nouvelles plateformes***

La contrainte (5.7) indique que si une nouvelle plateforme est établie dans une localisation candidate, elle assurera soit la personnalisation, le stockage et la distribution soit le stockage et la distribution uniquement. Les contraintes (5.8 - 5.11) stipulent que l'acquisition de nouvelles capacités de production (5.8, 5.9) et de stockage (5.10, 5.11) n'est possible qu'au début de l'horizon de planification. En outre, la capacité de stockage acquise devrait être inférieure à la capacité maximale admissible à installer dans cette localisation (5.11).

$$\forall l_n \in LPn \mid \sum_{\substack{a \in \{distribution, \\ personnalisation\}}} o_{l_n}^{a} \le 1 \tag{5.7}$$

$$\forall l_n \in LPn \mid \sum_{gp \in GP} b_{l_n}^{gp} \ge o_{l_n}^{personnalisation} \tag{5.8}$$

$$\forall l_n \in LPn \mid \sum_{gp \in GP} b_{l_n}^{\mathrm{gp}} \le BigM \times o_{l_n}^{personnalisation} \tag{5.9}$$

$$\forall l_n \in LPn \mid \sum_{gs \in GS} s_{l_n}^{gs} \ge \sum_{\substack{a \in \{distribution, \\ personnalisation\}}} o_{l_n}^{a} \tag{5.10}$$

$$\forall l_n \in LPn \mid \sum_{gs \in GS} s_{l_n}^{gs} \times SCP_{gs} \le SCp_{l_n}^{\max} \times \sum_{\substack{a \in \{distribution, \\ personnalisation\}}} o_{l_n}^{a} \tag{5.11}$$

- ***Contraintes relatives aux plateformes existantes***

Les contraintes (5.12 - 5.14) sont liées à la restructuration des plateformes existantes. Chaque plateforme existante peut soit fermer, ce qui se traduit par une cessation d'activité et au règlement des charges liées à cette décision, soit rester opérationnelle avec la capacité qu'elle dispose, soit faire une acquisition de nouvelles capacités de personnalisation et/ou de stockage.

Dans ce dernier cas, la nouvelle capacité de stockage acquise ne doit pas dépasser la capacité de stockage maximale offerte tenant compte de la capacité de stockage initialement installée (5.14).

$$\forall le \in LPe \,|\, c_{le} + \sum_{gp \in GP} b_l^{gp} \leq 1 \tag{5.12}$$

$$\forall le \in LPe \,|\, c_{le} + \sum_{gs \in GS} s_{le}^{gs} \leq 1 \tag{5.13}$$

$$\forall le \in LPe \,|\, \sum_{gs \in GS} s_{le}^{gs} \times SCP_{gs} + SCpI_l \leq SCp_{le}^{\max} \tag{5.14}$$

- ***Contraintes d'utilisation des capacités de stockage et de personnalisation***

Les relations (5.15, 5.16) définissent respectivement la capacité de stockage et de personnalisation au niveau des plateformes. Pour garantir une exploitation efficiente de ces plateformes, les contraintes (5.17, 5.18) imposent que le taux effectif d'utilisation des capacités de stockage et de personnalisation, doit être en dessous du taux d'utilisation maximal $\beta_{\max}$.

Autrement dit, les capacités ne doivent pas être pas surexploitées (une installation de stockage ne peut être remplie à 100 % de sa capacité et une machine ne fonctionnera pas à 100 % de sa capacité mais à une capacité maximale définie par son constructeur)

$$\forall l \in LP, t \in T$$

$$SCap(l) = \sum_{gs \in GS} s_l^{gs} \times SCp_{gs} + SCpI_l \tag{5.15}$$

$$PCap(l) = \sum_{gp \in GP} b_l^{gp} \times PCp_{gp} + PCpI_l \tag{5.16}$$

$$\left(\sum_{\substack{o \in O, q \in QT \\ |F1=vrai}} fr_{o,l}^{q,t} + \sum_{q \in QT} I_l^{q,t-1} + \sum_{kp \in Kp, gp \in GP} \mathrm{P}_l^{kp,gp,t} + \sum_{q \in QT} I_l^{q,t} \right) / 2 \leq \beta_{\max} \times SCap(l) \tag{5.17}$$

$$\sum_{kp \in Kp} \mathrm{P}_l^{kp,gp,t} \leq \beta_{\max} \times PCap(l) \tag{5.18}$$

- ***Contrainte de capacité d'approvisionnement***

La personnalisation nécessite l'approvisionnement en composants pour satisfaire la diversité requise des marchés locaux à servir. Ces composants sont approvisionnés auprès des fournisseurs internes ou externes, chaque fournisseur (externe ou interne) offrant un portefeuille de composants avec une capacité périodique limitée. Nous devons nous assurer que les flux approvisionnés par toutes les plateformes de personnalisation ne dépassent pas cette capacité limitée (5.19).

$$\forall s \in S \wedge t \in T \wedge q \in Ks \cup Rw \mid \sum_{\substack{d \in Ps \mid \\ F2=vrai}} ff_{o,d}^{q,t} + \sum_{d \in Pm} fm_{o,d}^{q,t} + \sum_{\substack{d \in LP \\ F1=vrai}} fr_{o,d}^{q,t} \leq PdCp_s^{q,t} \tag{5.19}$$

- ***Contraintes de capacité de transit aux ports/plateformes ferroviaires***

Les contraintes (5.20, 5.21) concernent les limites de capacité de traitement périodique des flux approvisionnés transitant respectivement par les plateformes de transit ferroviaire (5.20) et ports de transit maritime (5.21).

$$\forall ps \in Ps \wedge t \in T \mid \sum_{\substack{o \in S \cup Ps, q \in QT \\ \mid F2=vrai}} ff_{o,ps}^{q,t} \leq TRCp_{ps} \tag{5.20}$$

$$\forall pm \in Pm \wedge t \in T \mid \sum_{o \in S, q \in Ks \cup Rw} fm_{o,pm}^{q,t} \leq TSCp_{pm} \tag{5.21}$$

- ***Contrainte de capacité de transport***

Les contraintes (5.22 - 5.27) concernent la limite des capacités de transport offertes par les camions (5.22, 5.25), les trains (5.23, 5.26) et les navires (5.24, 5.27). Les flux de composants étant conditionnés en vrac, les contraintes (5.22, 5.23) portent sur la capacité de transport limite des camions (respectivement des wagons et des navires) transportant des flux de composants homogènes à une période et sur un chemin donné. De même, les flux de produits finis étant ensachés et transportés dans des conteneurs, les contraintes (5.24, 5.25) portent sur la capacité de transport limite des camions (respectivement wagons et navires) transportant des flux de produits finis hétérogènes à une période et sur un chemin donné.

$$\forall o \in O \wedge d \in D \wedge t \in T \wedge tr \in Tr \wedge q \in Rw \wedge n \in \{vrac\} \wedge F1 = vrai \mid \quad (5.22)$$
$$VR_{o,d}^{q,tr,t} \geq \frac{fr_{o,d}^{q,t}}{TCpR_n^{tr}}$$

$$\forall o \in S \cup P \wedge d \in Ps \wedge t \in T \wedge trl \in Trl \wedge q \in Rw \wedge n \in \{vrac\} \wedge F2 = vrai \mid \quad (5.23)$$
$$VF_{o,d}^{q,trl,t} \geq \frac{ff_{o,d}^{q,t}}{TCpF_n} \ avec \ \sum_{q \in SRw} VF_{o,d}^{q,trl,t} \leq Nb^{trl}$$

$$\forall o \in S \wedge d \in Pm \wedge t \in T \wedge ts \in Ts \wedge q \in Rw \wedge n \in \{vrac\} \mid \quad (5.24)$$
$$VM_{o,d}^{q,ts,t} \geq \frac{fm_{o,d}^{q,t}}{TCpM_n^{ts}}$$

$$\forall o \in O \wedge d \in D \wedge t \in T \wedge tr \in Tr \wedge n \in \{conteneur\} \wedge F1 = vrai \mid$$
$$SR_{o,d}^{tr,t} \geq \frac{\sum_{q \in K} fr_{o,d}^{q,t}}{TCpR_n^{tr}} \quad (5.25)$$

$$\forall o \in S \cup P \wedge d \in Ps \wedge t \in T \wedge trl \in Trl \wedge n \in \{conteneur\} \wedge F2 = vrai \mid$$
$$SF_{o,d}^{trl,t} \geq \frac{\sum_{q \in K} ff_{o,d}^{q,t}}{TCpF_n \times Nb^{trl}} \quad (5.26)$$

$$\forall o \in S \wedge d \in Pm \wedge t \in T \wedge ts \in Ts \wedge \wedge n \in \{conteneur\} \mid \quad (5.27)$$
$$SM_{o,d}^{q,ts,t} \geq \frac{\sum_{q \in K} fm_{o,d}^{q,t}}{TCpM_n^{ts}}$$

- ***Contraintes de conservation des flux***

Les contraintes (5.28 - 5.30) concernent la conservation des flux au niveau des plateformes de distribution et de personnalisation. Le niveau des stocks de composants à la fin de chaque période est égal au niveau des stocks de composants à la fin de la période précédente augmenté des flux approvisionnés périodiques et diminué de la consommation périodique des ateliers de personnalisation (5.28). De même, le niveau des stocks de produits personnalisés à la fin de chaque période est égal au niveau des stocks de produits personnalisés à la fin de la période précédente augmenté des flux approvisionnés périodiques depuis d'autres plateformes et de la production périodique des ateliers de personnalisation, diminué de la demande de cette période (5.29). La contrainte (5.30) est liée à la conservation des flux de produits standards. Elle stipule que le niveau des stocks de produits standards à la fin de chaque période est égal au niveau des

stocks de produits standards à la fin de la période précédente augmenté des flux approvisionnés périodiques et diminué de la demande de cette période.

$$\forall l \in LP \wedge t > 1 \wedge rw \in Rw \mid \sum_{\substack{o \in O \\ \mid F1 = vrai}} fr_{o,d}^{rw,t} + I_{l,rw}^{t-1} - \sum_{kp \in Kp, gp \in GP} N_{rw}^{kp} \times \mathrm{P}_{l}^{kp,gp,t} - \sum_{d \in D \mid F1 = vrai} fr_{o,d}^{rw,t} = I_{l,rw}^{t-1} \quad (5.28)$$

$$\forall l \in LP \wedge t > 1 \wedge q \in Kp \mid \sum_{o \in O \mid F1 = vrai} fr_{o,d}^{q,t} + I_{l,q}^{t-1} + \sum_{gp \in GP} \mathrm{P}_{l}^{kp,gp,t} - \sum_{d \in D \mid F1 = vrai} fr_{o,d}^{q,t} = I_{l,q}^{t} \quad (5.29)$$

$$\forall l \in LP \wedge t > 1 \wedge q \in Ks \mid \sum_{o \in O \mid F1 = vrai} fr_{o,d}^{q,t} + I_{l,q}^{t-1} - \sum_{d \in D \mid F1 = vrai} fr_{o,d}^{q,t} = I_{l,q}^{t} \quad (5.30)$$

Les contraintes (5.31, 5.32) concernent la conservation des flux au niveau des ports de transit maritime et des plateformes de transit ferroviaire. Selon la contrainte (5.31), les flux de composants et produits standards approvisionnés par voie maritime (donc provenant des fournisseurs internationaux) sont totalement réorientés vers les plateformes après transit par un port, par voie routière ou vers une plateforme de transit ferroviaire par voie ferroviaire. De même, selon la contrainte (5.32), les flux de composants et de produits standards approvisionnés par voie ferroviaires sont totalement réorientés vers les plateformes par voie routière ou vers une plateforme de transit ferroviaire.

$$\forall t \in T \wedge pm \in Pm \wedge q \in Rw \cup Ks \mid \sum_{s \in S} fm_{s,pm}^{q,t} = \sum_{d \in Ps \mid F2 = vrai} ff_{pm,d}^{q,t} + \sum_{d \in D \mid F1 = vrai} fr_{pm,d}^{q,t} \quad (5.31)$$

$$\forall t \in T \wedge p \in Ps \wedge q \in QT \mid \sum_{\substack{o \in S \cup P \\ \mid F2 = vrai}} ff_{o,p}^{q,t} + \sum_{o \in O \mid F1 = vrai} fr_{o,p}^{q,t} = \sum_{d \in Ps \mid F2 = vrai} ff_{p,d}^{q,t} + \sum_{d \in D \mid F1 = vrai} fr_{p,d}^{q,t} \quad (5.32)$$

- ***Contrainte logique***

La contrainte (5.33) définit l'existence d'un lien entre une plateforme et un nœud du réseau. Ce lien existe s'il y un flux qui est expédié entre ces deux nœuds.

$$\forall t \in T \wedge l_n \in LPn \wedge d \in D \mid \sum_{k \in K \mid F1=vrai} fr_{l_n,d}^{q,t} \leq BigM \times y_{l_n,d} \quad (5.33)$$

- ***Contraintes de non-négativité des variables***

Les contraintes (5.33 - 5.46) définissent le domaine de définition des variables de décision.

$$\forall l_n \in LPn \wedge a \in \{distribution, personnalisation\} \mid o_{l_n}^{a} \in \{0,1\} \quad (5.34)$$

$$\forall l \in LP \wedge gs \in GS \mid s_l^{gs} \in \{0,1\} \quad (5.35)$$

$$\forall l \in LP \wedge gp \in GP \mid b_l^{gp} \in \{0,1\} \quad (5.36)$$

$$\forall l_n \in LPn \wedge d \in D \mid y_{l_n,d} \in \{0,1\} \quad (5.37)$$

$$\forall o \in O \wedge d \in D \wedge q \in QT \wedge tr \in Tr \wedge t \in T \mid fr_{o,d}^{q,tr,t} \geq 0 \quad (5.38)$$

$$\forall o \in P \cup S \wedge d \in Ps \wedge q \in QT \wedge trl \in Trl \wedge t \in T \mid ff_{o,d}^{q,trl,t} \geq 0 \quad (5.39)$$

$$\forall o \in P \wedge d \in Pm \wedge q \in QT \wedge ts \in Ts \wedge t \in T \mid fm_{o,d}^{q,ts,t} \geq 0 \quad (5.40)$$

$$\forall l \in LP \wedge q \in QT \wedge ts \in Ts \wedge t \in T \mid I_{l,q}^{t} \geq 0 \quad (5.41)$$

$$\forall l \in LP \wedge kp \in Kp \wedge gp \in GP \wedge t \in T \mid \mathrm{P}_l^{kp,gp,t} \geq 0 \quad (5.42)$$

$$\forall o \in O \wedge d \in D \wedge q \in Rw \wedge tr \in Tr \wedge t \in T \mid VR_{o,d}^{q,tr,t} \geq 0 \quad (5.43)$$

$$\forall o \in O \wedge d \in D \wedge tr \in Tr \wedge t \in T \mid SR_{o,d}^{tr,t} \geq 0 \quad (5.44)$$

$$\forall o \in P \cup S \wedge d \in Ps \wedge q \in QT \wedge trl \in Trl \wedge t \in T \mid VF_{o,d}^{q,trl,t} \geq 0 \quad (5.45)$$

$$\forall o \in P \cup S \wedge d \in Ps \wedge trl \in Trl \wedge t \in T \mid SF_{o,d}^{trl,t} \geq 0 \quad (5.46)$$

$$\forall o \in P \wedge d \in Pm \wedge q \in QT \wedge ts \in Ts \wedge t \in T \mid VM_{o,d}^{q,ts,t} \geq 0 \quad (5.47)$$

$$\forall o \in P \wedge d \in Pm \wedge ts \in Ts \wedge t \in T \mid SM_{o,d}^{ts,t} \geq 0 \quad (5.48)$$

3.2.5. Modèle de coût et critères d'optimisation

- ***Modèle de coûts***

Comme mentionné dans §3.1.3, le modèle d'évaluation économique de la conception ou de la reconfiguration de réseaux de distribution hybrides comprend deux catégories de coûts : le coût opérationnel et le coût stratégique d'investissement, ce dernier étant limité par un budget d'investissement **B**. Notons que comme la planification de ce réseau s'étale sur le moyen terme,

ces coûts sont supposés constants par rapport au temps. Les coûts stratégiques (5.49) comprennent les coûts d'achat des terrains, d'acquisition et d'installation des capacités de stockage et de personnalisation. Notons que ces coûts reflètent des économies d'échelle et varient donc selon les capacités installées.

$$Coût_{stratégique} = \sum_{l \in LP, gs \in GS} s_l^{gs} \times OC_l^{SCp_{gs}} + \sum_{l \in LP, gp \in GP} b_l^{gp} \times PSC_l^{PCp_{gp}} + \sum_{le \in LPe} c_{le} \times CC_{le} \quad (5.49)$$

Le coût opérationnel total ($Coût_{operationnel_total}$) comprend des coûts récurrents résultant de l'exploitation du réseau de distribution, notamment.

- Le coût fixe total d'exploitation de plateformes nouvelles et anciennes sur l'horizon de planification est défini par l'équation (5.50). Le coût fixe unitaire varie en fonction des capacités disponibles.

$$Coût_{fixe} = \sum_{l \in LP, gs \in GS} s_l^{gs} \times FOC_l^{SCp_{gs}} + \sum_{l \in LP} FOC\,\mathrm{int}_l \quad (5.50)$$

- Le coût total de possession des stocks au niveau des nouvelles et anciennes plateformes sur l'horizon de planification est fonction du stock moyen périodique et du coût unitaire de possession du stock. Ce dernier varie en fonction de la référence de la marchandise (composant ou produit fini) à stocker.

$$Coût_{possession_stocks} = \sum_{l \in LP, gs \in GS} \frac{I_{l,q}^{t} + I_{l,q}^{t-1}}{2} \times IC_{l,q} \quad (5.51)$$

- Le coût total de manutention des nouvelles et anciennes plateformes sur l'horizon de planification est fonction des flux de marchandises réceptionnées et expédiées et du coût unitaire de manutention. Ce dernier dépend du type de conditionnement (vrac vs. conteneurs) des marchandises réceptionnées et expédiées.

$$Coût_{manutention} = \sum_{\substack{l \in LP, q \in QT \\ o \in O, d \in D | F2 = vrai}} (fr_{o,l}^{q,t} + fr_{l,d}^{q,t}) \times HC_{l,q} \quad (5.52)$$

- Le coût total de personnalisation au niveau des nouvelles et anciennes plateformes sur l'horizon de planification est fonction de la quantité produite par période et du coût de personnalisation unitaire. Ce dernier dépend de la référence du produit finis k_p à élaborer et de la capacité de personnalisation de l'installation de configuration g_p.

$$Coût_{personnalisation} = \sum_{l \in LP, gp \in GP, kp \in KP, t \in T} P_l^{kp,gp,t} \times OPC_{l,PCp_{gp}}^{kp} \quad (5.53)$$

- Le coût total de transport routier (respect. ferroviaire et maritime) sur l'horizon de planification, en vrac et en conteneur, est fonction des quantités de livraison et du coût unitaire de transport. Ce dernier dépend du type de conditionnement des flux de marchandises (en vrac ou en conteneur de sacs), de la capacité des camions (respect. trains et navires) et de la distance parcourue.

$$Coût_{transport_routier} = \sum_{\substack{o \in O, d \in D, t \in T \\ tr \in Tr | F1 = vrai}} [\sum_{\substack{n \in \{vrac\}, \\ q \in Rw}} VR_{o,d}^{q,tr,t} \times TCpR_n^{tr} \times TCR_{o,d}^{tr,n} + \sum_{n \in \{conteneur\}} SR_{o,d}^{tr,t} \times TCpR_n^{tr} \times TCR_{o,d}^{tr,n}] \quad (5.54)$$

$$Coût_{transport_ferroviaire} = \sum_{\substack{o \in O, d \in D, \\ t \in T, trl \in Trl \\ | F2 = vrai}} [\sum_{\substack{n \in \{vrac\}, \\ q \in Rw}} VF_{o,d}^{q,tr,t} \times TCpF_n^{trl} \times TCF_{o,d}^{trl,n} + \sum_{n \in \{conteneur\}} SF_{o,d}^{trl,t} \times TCpF_n^{trl} \times TCF_{o,d}^{trl,n}] \quad (5.55)$$

$$Coût_{transport_maritime} = \sum_{\substack{o \in O, d \in D, \\ t \in T, ts \in TS}} [\sum_{\substack{n \in \{vrac\}, \\ q \in Rw}} VM_{o,d}^{q,ts,t} \times TCpM_n^{ts} \times TCM_{o,d}^{ts,n} + \sum_{n \in \{conteneur\}} SM_{o,d}^{ts,t} \times TCpM_n^{ts} \times TCM_{o,d}^{ts,n}] \quad (5.56)$$

- Le coût total d'acquisition des composants et produits standards sur l'horizon de planification est fonction des quantités approvisionnées et du coût unitaire d'approvisionnement. Ce dernier dépend de la référence des composants ou produits et du fournisseur.

$$Coût_{achat_composant} = \sum_{s \in S, pm \in Pm, t \in T | q \in Rw \cup Ks} fs_{s,pm}^{q,t} \times PC_{q,s} \quad (5.57)$$

Les tableaux 5.6 et 5.7 regroupent les paramètres des coûts unitaires respectivement stratégiques et opérationnels.

Tableau 5.6 – Coûts stratégiques unitaires

Symbole	Description
$OC_{l_n}^{SCp_{gs}}$	Coût fixe unitaire ($/module) d'acquisition et d'installation de la capacité de stockage modulaire SCp_{gs} au niveau d'une nouvelle plateforme de localisation $l_n \in LPn$
$PSC_{l_n}^{PCp_{gp}}$	Coût fixe d'acquisition unitaire ($/module) et d'installation de la capacité de personnalisation modulaire PCp_{gp} au niveau d'une nouvelle plateforme de localisation $l_n \in LPn$
CC_{le}	Coût fixe de fermeture d'une plateforme existante localisée à $le \in LPe$

Tableau 5.7 – Coûts opérationnels unitaires

Symbole	Description
$PC_{q,s}$	Coût variable unitaire (\$/tonnes) d'acquisition d'un composant ou d'un produit standard ayant la référence $q \in RW \cup Ks$ depuis le fournisseur $s \in S$
$FOC_l^{SCp_{gs}}$	Coût fixe (\$) d'exploitation d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$ ayant la capacité de stockage modulaire SCp_{gs}
$FOC\,\mathrm{int}_l$	Coût fixe (\$) d'exploitation de la plateforme installée au niveau de la localisation $l \in LP$
$OPC_{l,PCp_{gp}}^{kp}$	Coût variable unitaire (\$/tonnes) de personnalisation du produit $kp \in KP$ par l'unité de personnalisation ayant la capacité de personnalisation PCp_{gp} au niveau d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$
$IC_{l,q}$	Coût variable unitaire (\$/tonnes) de possession de stock de composants ou de produits finis de référence $q \in QT$ au niveau d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$
$HC_{l,q}$	Coût variable unitaire (\$/tonnes) de manutention de composants ou de produits finis de référence $q \in QT$ au niveau d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$
$TCR_{o,d}^{tr,n}$	Coût variable unitaire de transport depuis le nœud d'origine $o \in LP \cup P \cup S$ vers le nœud de destination $d \in LP \cup ZT$ moyennant un camion de type $tr \in Tr$
$TCF_{o,d}^{trl,n}$	Coût variable unitaire (\$/tonnes) de transport depuis le nœud d'origine $o \in P \cup S$ vers le nœud de destination $d \in Ps$ moyennant un train de type $trl \in Trl$
$TCM_{o,d}^{ts,n}$	Coût variable unitaire (\$/tonnes) de transport depuis le nœud d'origine d $o \in S$ vers le nœud de destination $d \in Pm$ moyennant un navire de type $ts \in Ts$

- ***Critères d'optimisation***

Le futur réseau de distribution hybride devra être à la fois économiquement efficient (i.e. générant de faibles coûts d'exploitation et profitant le mieux possible des économies d'échelle d'investissement), assurant une meilleure proximité et disponibilité des produits aux marchés locaux) et préservant la qualité des produits personnalisés (i.e. minimisant les dommages qui peuvent impacter les produits finis pendant leur transport). Ces exigences peuvent être exprimées par le biais de trois critères d'optimisation :

- Le premier critère concerne la minimisation du coût total (5.58). Ce dernier est égal à la somme du coût opérationnel total et du coût stratégique d'investissement.

$$Min\ f_1 = Coût_{operationnel_total} + Coût_{stratégique} \tag{5.58}$$

- La deuxième fonction objectif (5.59) concerne la maximisation de la proximité des produits du marché. Cet objectif se traduit par le stockage les produits finaux le plus près possible des marchés de consommation, ce qui revient à mettre en place des plateformes de distribution tout près de ces marchés.

$$\forall z_T \in ZT \mid Min\ f_2 = \sum_{l_n \in LPn} Dist_{l_n, z_T} \times y_{l_n, z_T} \times \sum_{\substack{a \in \{distribution \\ personnalisation\}}} o_{l_n}^{a} \tag{5.59}$$

- La troisième fonction objectif est liée à la maximisation de la proximité de la personnalisation par rapport au marché, i.e. à la minimisation de la distance entre les marchés et les plateformes de personnalisation (5.60), ce qui permet de réduire les dommages aux produits pendant la distribution.

$$\forall l_n \in LPn \mid Min\ f_3 = \sum_{d \in D} Dist_{l_n, d} \times y_{l_n, d} \times o_{l_n}^{personnalisation} \tag{5.60}$$

4. Approche de résolution du problème

Après avoir explicité notre modélisation du problème de conception de réseaux de distribution hybrides (§3), nous nous intéressons dans cette partie à sa résolution. Avant tout, nous allons présenter les règles de génération des données du modèle (§4.1), puis expliquer l'implémentation de l'approche d'optimisation que nous avons choisie (§4.2) (voir chapitre 3).

4.1. Règles de génération des données de base du modèle

Nous allons présenter des règles de génération génériques de données sur lesquelles nous allons nous baser pour élaborer des jeux de données réalistes. L'intérêt et d'éviter de présenter les données réelles, qui sont confidentielles, tout en assurant des résultats réalistes.

4.1.1. Coûts fixes d'investissement et d'exploitation des plateformes

Les coûts d'investissement en plateformes de distribution et de personnalisation sont modélisés comme fonction des capacités à installer et afin de générer des économies d'échelle.

- Le coût fixe d'installation d'une capacité de stockage modulaire SCp_{gs} correspondante à la configuration gs peut être déduit du coût fixe d'installation d'une capacité de référence SCp_{gs_0} moyennant un taux $\beta < 1$ qui reflète le ratio des économies d'échelle comme suit :

$$\forall gs \in GS, l \in LP \mid OC_l^{SCp_{gs}} = OC_l^{SCp_{gs_0}} \times \left(\frac{SCp_{gs}}{SCp_{gs_0}}\right)^{\beta} \tag{5.61}$$

Avec : $OC_l^{SCp_{gs_0}} \sim \mathrm{U}\left[Min_{l \in LP}(OC_l^{SCp_{gs_0}}), Max_{l \in LP}(OC_l^{SCp_{gs_0}})\right]$

- Le coût fixe d'installation d'une capacité de personnalisation modulaire PCp_{gp} correspondante à la configuration g_p peut être déduit du coût fixe d'installation d'une capacité de référence PCp_{gp_0} moyennant un coefficient des économies d'échelle $\beta < 1$, comme suit :

$$\forall gp \in GP, l \in LP | PSC_l^{PCp_{gp}} = PSC_l^{PCp_{gp_0}} \times (\frac{PCp_{gp}}{PCp_{gp_0}})^{\beta} \quad (5.62)$$

Avec : $PSC_l^{PCp_{gp_0}} \sim U[Min_{l \in LP}(PSC_l^{PCp_{gp_0}}), Max_{l \in LP}(PSC_l^{PCp_{gp_0}})]$

- Le coût fixe d'exploitation d'une plateforme disposant des capacités de stockage modulaires SCp_{gs} peut être déduit du coût fixe d'installation d'une capacité de référence SCp_{gs_0} moyennant un taux $\beta < 1$ qui reflète le ratio des économies d'échelle comme suit :

$$\forall gs \in GS, l \in LP | FOC_l^{SCp_{gs}} = FOC_l^{SCp_{gs_0}} \times (\frac{SCp_{gs}}{SCp_{gs_0}})^{\beta} \quad (5.63)$$

Avec :

$FOC_l^{SCp_{gs_0}} \sim$ U $[\text{Min}_{l \in LP}(FOC_l^{SCp_{gs_0}}), \text{Max}_{l \in LP}(FOC_l^{SCp_{gs_0}})]$.

4.1.2. Coûts variables unitaires d'exploitation des plateformes

Ces coûts concernent principalement les coûts variables unitaires de personnalisation, de manutention et de stockage :

- Le coût variable unitaire de personnalisation varie en fonction de la référence du produit fini kp à élaborer, de la capacité de personnalisation de l'installation de gp et de la main d'œuvre, donc de la localisation de la l. Notons que plus l'installation a une capacité importante, plus le coût de personnalisation est faible. Pour cela, ce coût peut être déduit de la formule (5.64) comme suit :

$$\forall gp \in GP, kp \in KP, l \in LP | OPC_{l,PCp_{gp}}^{kp} = OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp} \times (\frac{PCp_{gp}}{PCp_{gp_0}})^{\beta} \quad (5.64)$$

Avec :

- $OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp} \sim U[\rho_{kp} \times Min_{l \in LP}(OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp0}), \rho_{kp} \times Max_{l \in LP}(OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp0})]$;
- $\rho_{kp} \sim$ U$[Min_{kp \in Kp}(\rho_{kp}), Max_{kp \in Kp}(\rho_{kp})]$.

- Le coût variable unitaire de manutention varie en fonction du type de conditionnement (vrac ou conteneur « *cont* ») de la marchandise réceptionnée ou expédiée et de la localisation de la plateforme. Notons que la manutention des flux en vrac coûte plus cher que la manutention des flux ensachés car par nature, les flux en vrac nécessitent des équipements coûteux pour pousser les flux vers les zones de stockage (convoyeurs, chariots verseurs, etc.…).

$$\forall l \in LP |\ HC_l^{vrac} = \vartheta \times HC_l^{cont} \tag{5.65}$$

Avec :

- $\vartheta \geq 2$;
- $HC_l^{cont} \sim$ U $[Min_{l\in LP}(HC_l^{cont}), Max_{l\in LP}(HC_l^{cont})]$.

- Le coût unitaire de possession des stocks varie en fonction de la valeur des marchandises à stocker. Pour les produits finis, ce coût peut être généré suivant la loi uniforme $U\left[Min_{k\in K}(IC_k), Max_{k\in K}(IC_k)\right]$ sachant le coût unitaire de stockage de la référence de produits finis la plus (respect. la moins) onéreuse. De même, le coût unitaire de stockage des composants peut être généré suivant la loi uniforme $U[Min_{rw\in Rw}(IC_{rw}), Max_{rw\in Rw}(IC_{rw})]$.

4.1.3. Coût variable unitaire de transport

Ces coûts sont relatifs au transport routier, ferroviaire et maritime selon que les flux de marchandises soient en vrac ou en conteneur (de sacs).

- Le coût variable unitaire de transport routier varie en fonction de la distance parcourue, de la capacité des camions (qui sont hétérogènes) et selon le type de conditionnement des flux de marchandises (vrac ou conteneur). Notons que, par effet des économies d'échelle, le coût unitaire de transport est inversement proportionnel à la capacité de transport. Par exemple, le coût unitaire de transport avec un camion de 60 tonnes complet sera faible par rapport au coût de transport avec un camion de 30 tonnes. Pour modéliser ces économies d'échelle, le coût unitaire de transport sera représenté en fonction de la capacité de transport, d'un coût unitaire de transport $TCR_{o,d}^{tr0,n}$ par un véhicule de capacité de référence (correspondant à la capacité dont on connaît le coût de transport) $TCpR_n^{tr0}$ et d'un coefficient d'économies d'échelle) $\beta < 1$ comme suit :

$$\forall o \in O, d \in D, n \in N, tr \in Tr | TCR_{o,d}^{tr,n} = TCR_{o,d}^{tr0,n} \times (\frac{TCpR_n^{tr}}{TCpR_n^{tr0}})^{\beta} \quad (5.66)$$

De plus, par rapport à la distance, nous pouvons avoir un coût de transport variant par couple (origine, destination) où variable par palier de kilomètres parcourus. Dans ce dernier cas, il faut générer des coûts unitaires de transport pour chaque palier de distance $TCR_{\varepsilon(o,d)}^{tr0,n}$.

$$TCR_{o,d}^{tr0,n} = TCR_{\varepsilon(o,d)}^{tr0,n} \times Dist_{o,d} \quad (5.67)$$

- De même, le coût variable unitaire de transport ferroviaire varie comme le coût de transport et de distribution routier. Nous pouvons donc le générer comme suit :

$$\forall o \in O, d \in D, n \in N, trl \in Trl | TCF_{o,d}^{trl,n} = TCF_{o,d}^{trl0,n} \times (\frac{Nb^{trl}}{Nb^{trl0}})^{\beta} \quad (5.68)$$

Avec :

- $TCF_{o,d}^{trl0,n}$, Nb^{trl0} qui sont respectivement le coût de transport ferroviaire relatif à une capacité de transport de référence et le nombre de wagons d'un train ayant cette capacité.

- $TCF_{o,d}^{trl0,n} = TCR_{\varepsilon(o,d)}^{trl0,n} \times Dist_{o,d}$

- $TCR_{\varepsilon(o,d)}^{trl0,n}$ est le coût de transport ferroviaire relatif à une capacité de référence selon le palier de distance $\varepsilon(o,d)$

- Le coût variable unitaire de transport maritime varie en fonction de la capacité de transport du navire, du type de conditionnement des flux de marchandises (vrac ou en conteneur) et du couple (nœud d'origine, nœud destination). De même que pour les coûts de transport routiers et ferroviaires, le coût unitaire de transport maritime est plus faible quand la capacité du navire est importante. Il peut être généré comme suit :

$$\forall o \in S, d \in Pm, n \in N, ts \in Ts | TCM_{o,d}^{ts,n} = TCM_{o,d}^{ts0,n} \times (\frac{TCpM_n^{ts}}{TCpM_n^{ts0}})^{\beta} \quad (5.69)$$

Avec :

- $TCpM_n^{ts0}$ capacité de transport maritime de référence ;

- $TCM_{o,d}^{ts0,n}$ coût de transport maritime relatif à une capacité de transport de référence entre le nœud d'origine o et de destination d ;

Tableau 5.8 – Exemple de génération des capacités de transport (routier, ferroviaire et maritime)

Symbole	Valeur
$\boldsymbol{TCpR_n^{tr}}$	$TCpR_{vrac}^{tr} = U[20,45]$
	$TCpR_{cont}^{tr} = U[20,30]$
$\boldsymbol{TCpF_n^{trl}}$	$TCpF_{vrac}^{trl} = U[400,1000]$
$= \boldsymbol{TCpF_n \times Nb^{trl}}$	$TCpF_{cont}^{trl} = U[100,400]$
$\boldsymbol{TCpM_n^{ts}}$	$TCpM_{vrac}^{ts} = U[15000,200000]$
	$TCpM_{cont}^{ts} = U[20,30]$

4.1.4. Capacités logistiques

Ces capacités concernent principalement les capacités de transport maritime, ferroviaire et routier, les capacités de transit au port et les capacités de stockage des points de vente.

- La capacité de transport routier (respect. ferroviaire ou maritime) varie en fonction du type de conditionnement et du type du camion (respect. train ou navire). Elle peut être générée selon une loi uniforme comme le montre l'exemple du tableau 5.8 pour le cas du transport des engrais en Afrique.
- La capacité de stockage des points de vente (resp. la capacité maximale offerte par les plateformes et la capacité de transit) dépend de la localisation des points de vente (resp. des plateformes et des ports). Elle peut être générée suivant la loi uniforme.

4.1.5. Demande périodique d'un marché local

La demande varie de façon saisonnière durant une même année. Elle dépend de la localisation des marchés à servir et des références de produits finis. Connaissant la demande prévisionnelle globale (tous les marchés sur une période) par rapport à une référence d'un produit fini D_k , nous déduirons la demande prévisionnelle de chaque marché local durant une période y (par exemple : un mois) moyennant un taux $w_{z_T}^{k,t}$ comme suit : $d_{z_T}^{k,t} = D_k \times w_{z_T}^{k,t}$. Ce taux représente la part de la demande d'un marché local z_T de la demande globale d'un produit de référence k pendant une période y. Cette part varie suivant la loi de distribution uniforme $U[Min_{z_T \in ZT}(w_{z_T}^{k_0,t_0}) \times \vartheta_k \times \gamma_t ; Max_{z_T \in ZT}(w_{z_T}^{k_0,t_0}) \times \vartheta_k \times \gamma_t)$ avec ϑ_k varie en fonction des produits finis suivant la loi uniforme $U[Min_{k \in K}(\vartheta_k) ; Max_{k \in K}(\vartheta_k)$ et γ_t représente un taux de varie en fonction de la période y selon la loi de distribution uniforme $U[Min_{t \in T}(\gamma_t) ; Max_{t \in T}(\gamma_t)$.

4.2. Description de l'approche d'optimisation : méthode *ε-constraint*

Comme explicité dans le chapitre 3, nous allons utiliser la méthode de *ε-constraint* pour résoudre le problème de conception multi-objectifs de réseaux de distribution hybrides. Nous rappelons que cette méthode optimise l'une des fonctions objectifs, tout en utilisant les autres comme contraintes à respecter avec un niveau minimal (voir chapitre 3). Pour mettre en œuvre cette méthode, nous sélectionnons la première fonction objectif (5.58) comme critère d'optimisation principal et transformons les autres critères d'optimisation (5.59, 5.60) en contraintes respectivement de proximité des stocks (5.70) et proximité de la personnalisation (5.71). Ce choix de fonction objectif principale a été effectué par notre partenaire industriel.

Notons que $D_{z_T}^{max}$ délimite la zone de chalandise d'une plateforme de distribution ; plus cette distance est grande plus cette plateforme n'arrosera que le marché local le plus proche. De même, D_{CP}^{max} délimite la zone de chalandise d'une plateforme de personnalisation ; plus cette distance est grande plus la personnalisation sera locale. Ces distances représentent selon la méthode *ε -constraint* les seuils ε_1 et ε_2 pour chaque fonction (5.59) et (5.60).

$$\forall z_T \in ZT \mid f_2 = \sum_{l_n \in LPn} Dist_{l_n,z_T} \times y_{l_n,z_T} \leq D_{z_T}^{\max} \times \sum_{\substack{a \in \{distribution \\ personnalisation\}}} o_{l_n}^{a} \tag{5.70}$$

$$\forall l_n \in LPn \mid f_3 = \sum_{d \in D} Dist_{l_n,d} \times y_{l_n,d} \leq D_{CP}^{\max} \times o_{l_n}^{personnalisation} \tag{5.71}$$

Ensuite, comme expliqué dans le chapitre 3, nous élaborons la table de gains, ou « *payoff table* », des optimisations lexicographiques pour déterminer les plages de variation des distances, c'est-à-dire les bornes supérieures et inférieures de l'intervalle de définition de chacune de $D_{z_T}^{max}$ et D_{CP}^{max}. La borne inférieure (pour une fonction de minimisation) correspond à la solution idéale obtenue, c'est-à-dire la solution optimale de l'optimisation individuelle de chaque fonction objectif quand la borne supérieure correspond à la solution anti-idéale ou Nadir obtenue (le maximum de la colonne correspondant à la fonction objectif en question).

Le tableau 5.9 explique le principe d'élaboration de la table de gain obtenue par l'optimisation lexicographique des trois fonctions f_1, f_2 et f_3. Par exemple, pour élaborer la première ligne, on résout le problème en minimisant le coût puis on inscrit la valeur optimale f^*_1 dans la première case, puis on résout le problème en minimisant la distance des stocks aux marchés sachant que le coût total correspond au coût total optimal f_1^* ; on inscrit la solution obtenue f'_2 dans deuxième case. Enfin, la troisième case de cette première ligne correspond à la solution du

problème minimisant la distance des plateformes de personnalisation aux marchés sachant que le coût est égal à f^*_1 et la deuxième fonction égale à f'_2.

Tableau 5.9 – Table des gains obtenue par l'optimisation lexicographique de f_1, f_2 et f_3

	f_1	f_2	f_3
Min f_1	$f^*_1 = \text{Min } f_1$	$f'_2 = \text{Min } f_2$ avec $f_1 = f^*_1$	$f'_3 = \text{Min } f_3$ avec $f_1 = f^*_1$ et $f_2 = f'_2$
Min f_2	$f'_1 = \text{Max } f_1$ avec $f_2 = f^*_2$ et $f_3 = f''_3$	$f^*_2 = \text{Min } f_2$	$f''_3 = \text{Min } f_3$ avec $f_2 = f^*_2$
Min f_3	$f''_1 = \text{Min } f_1$ avec $f_3 = f^*_3$	$f''_2 = Min\ f_2$ avec $f_3 = f^*_3$ et $f_1 = f''_1$	$f^*_3 = \text{Min } f_3$
Solution idéale	f^*_1	f^*_2	f^*_3
Solution Nadir	$Max\ (f'_1 ; f''_1)$	$Max\ (f'_2 ; f''_2)$	$Max\ (f'_3 ; f''_3)$

Tableau 5.10 – Données de base

Symbole	Description	Valeur
T	Horizon de planification (années)	3
NL	Nombre de localisation candidates	5
NM	Nombre de marchés locaux	5
PCp_{gs0}	Capacité de *blending* de référence (en tonnes/année)	252000
$PSC_l^{gp_0}$	Coût fixe d'acquisition et d'installation de la capacité de *blending* de référence (en $)	U [700000 ; 900000]
$OPC_{kp,gp0}$	Coût unitaire de *blending* (en $/tonnes)	U [30 ; 45]
SCp_{gs_0}	Capacité de stockage de référence (en tonnes)	20000
$OC_{l_n}^{gs0}$	Coût fixe d'acquisition et d'installation de la capacité de stockage de référence (en $)	1000000
FOC_l^{gs0}	Coût fixe d'exploitation de la capacité de stockage de référence (en $)	1000
$HC_{l,rw}$	Coût unitaire de manutention des flux de composants conditionnés en vrac (en $/tonnes)	U [10 ; 20]
$HC_{l,k}$	Coût unitaire de manutention des conteneurs de produits finis (en $/tonnes)	U [2 ; 6]
$TCM_{o,d}^{ts,vrac}$	Coût unitaire de transport maritime en vrac (en $/tonnes)	U [30 ; 50]
$TCM_{o,d}^{ts,cont}$	Coût unitaire de transport maritime en conteneur (en $/tonnes)	U [1000 ; 5000]
SCp_{gs}	Capacité de stockage modulaire (en tonnes)	U [1000 ; 1000000]
PCp_{gp}	Capacité de *blending* modulaire (en tonnes/heure)	(50, 80, 120, 200)

5. Etude de cas

Cette étude de cas vise à valider l'applicabilité du modèle mathématique proposé (§3) qui sera proposé à notre deuxième partenaire pour la conception de réseaux de *blending* et de distribution d'engrais dans de nombreux pays africains. Cette validation peut être faite en analysant la réponse du modèle face à des situations réalistes dont la réponse est évidente et/ou connue. Plus précisément, nous effectuons une analyse de quelques scénarios réalistes (« *what-if analysis* ») pour étudier l'impact des caractéristiques du marché sur la conception d'un réseau de *blending* et de distribution d'engrais en Côte d'Ivoire. La génération de ces scénarios sera expliquée dans la sous-section 5.1, puis nous commenterons les principaux résultats dans la sous-section 5.2.

Tableau 5.11 – Description des scénarios étudiés

Scénario	Diversité des composants	Taille et diversité des marchés	Scénarios de la demande
Scénario 1	Faible	Importante	- De : Avril à : Juillet : $\forall k,t,z_T \mid d_{z_T}^{k,t} \sim U[5000\times\omega_{z_T}^{k,t};\ 20000\times\omega_{z_T}^{k,t}]$ avec : $\forall k,t,z_T \mid \omega_{z_T}^{k,t} \sim U[0.8\times\nu_k\times\gamma_t;2\times\nu_k\times\gamma_t]$ $\forall k \mid \nu_k \sim U[0.5;\ 1.5]$ et $\gamma_t = 15\%$ - De : Août à Mars : $\forall k,t,z_T \mid d_{z_T}^{k,t} \sim U[500\times\omega_{z_T}^{k,t};\ 1500\times\omega_{z_T}^{k,t}]$ Avec : $\forall k,t,z_T \mid \omega_{z_T}^{k,t} \sim U[0.8\times\nu_k\times\gamma_t;2\times\nu_k\times\gamma_t]$ $\forall k \mid \nu_k \sim U[0.5;\ 1.5]$ et $\gamma_t = 2\%$
Scénario 2	Faible	Faible	- De : Avril à : Juillet : $\forall k,t,z_T \mid d_{z_T}^{k_0,t} \sim U[1000\times\omega_{z_T}^{k_0,t};\ 2000\times\omega_{z_T}^{k_0,t}]$ avec : $\forall t,z_T \mid \omega_{z_T}^{k_0,t} \sim U[0.8\times\gamma_t;2\times\gamma_t]$ et $\gamma_t = 15\%$ - De : Août à Mars : $\forall k,t,z_T \mid d_{z_T}^{k_0,t} \sim U[100\times\omega_{z_T}^{k_0,t};\ 500\times\omega_{z_T}^{k_0,t}]$ avec : $\forall t,z_T \mid \omega_{z_T}^{k_0,t} \sim U[0.8\times\gamma_t;2\times\gamma_t]$ et $\gamma_t = 2\%$
Scénario 3	Importante	Faible	

Nous rappelons que le problème que nous avons modélisé n'a jamais été abordé auparavant de manière complète en littérature. Il n'existe donc pas de modèle existant auquel nous pouvons comparer l'efficacité de notre modélisation.

5.1. Scénarios et hypothèses d'étude

Afin de préserver la confidentialité des informations tout en générant des données réalistes, les données du problème ont été conçues sur la base des règles de génération de données décrites dans la sous-section 4.1. Ces règles impliquent les données de base décrites dans le tableau 5.10. Les données générées ont été adaptées à chacun des scénarios étudiés en fonction des hypothèses spécifiques (tableau 5.11).

Les scénarios 1 et 2 sont utilisés pour analyser l'impact de la taille et la diversité des marchés sur la localisation du *blending*, en supposant une faible diversité des composants (§5.1.1) tandis que les scénarios 2 et 3 sont utilisés pour analyser l'impact de la diversité des composants sur la localisation du *blending*, en supposant une faible taille et diversité des marchés (§5.1.2). Les figures 5.11 et 5.12 illustrent la distribution saisonnière de la demande des cinq marchés ciblés selon que la diversité et la taille des marchés est importante ou faible.

De plus, nous supposons que :

- tous les marchés locaux ont le même potentiel de consommation ;
- toutes les références des produits finis demandées par ces marchés ont la même saisonnalité ;
- aucune plateforme de personnalisation ou de distribution n'est opérationnelle avant le début de la planification ;
- la distance entre les nouvelles plateformes de distribution et les marchés qu'elles desservent ne doit pas dépasser 100 km (ce qui traduit un degré de réactivité élevé).

Nous souhaitons donc concevoir un nouveau réseau de distribution et de *blending* d'engrais en variant la diversité des composants et des marchés ciblés selon trois scénarios (tableau 5.11).

Le réseau optimal devra minimiser à la fois les coûts d'investissement et d'exploitation du réseau et les dommages sur les produits personnalisés tout en maintenant un niveau de réactivité élevé (ce dernier est supposé fixe).

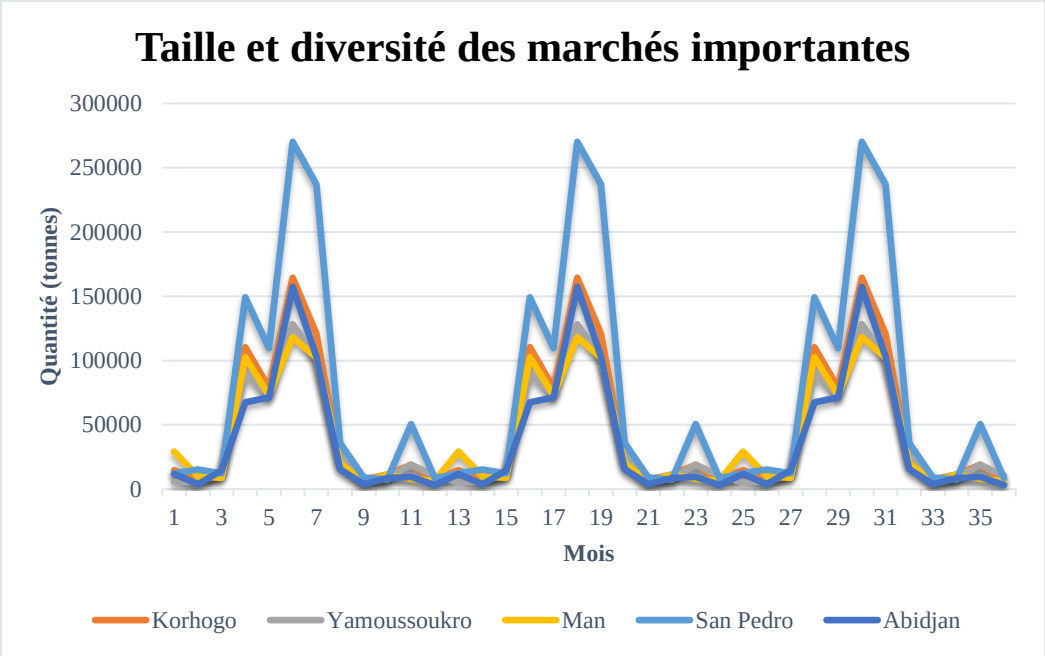

Figure 5.10 – Distribution saisonnière de la demande (scénario 1)

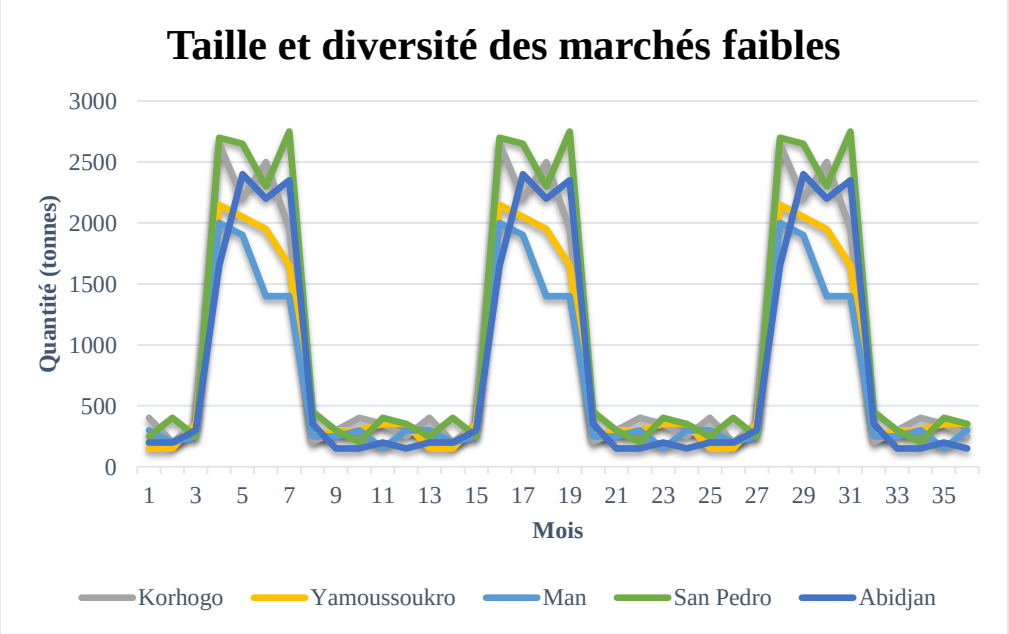

Figure 5.11 – Distribution saisonnière de la demande (scénario 2 et 3)

Pour résoudre ce problème bi-objectif, nous nous sommes basés sur l'approche proposée dans la sous-section (§4.2), pour le transformer en un problème à objectif unique. À la suite de cela, nous avons obtenu le tableau des gains de chaque scénario qui donne la plage de D_{CP}^{max} (tableau 5.12). La borne inférieure (respect. supérieure) de la borne agrégée correspond au minimum des meilleures (respect. au maximum des mauvaises) solutions. Ensuite, nous divisons la plage agrégée en 3 intervalles égaux et les points de grille correspondants sont (100 ; 350 ; 600 ; 950) km. Enfin, nous avons implémenté le modèle obtenu et résolu le problème sur le

modeleur/solveur commercial Xpress IVE et ce en variant les distances D_{CP}^{max} sous chacun des trois scénarios (tableau 5.11).

Tableau 5.12 – Table de gain obtenue par l'optimisation lexicographique de f1 et f3

	Scénario 1		**Scénario 2**		**Scénario 3**	
	f_1 (M$)	*f_3 (Km)*	*f_1 (M$)*	*f_3 (Km)*	*f_1 (M$)*	*f_3 (Km)*
Min f_1	4390	600	402	800	922	950
Min f_3	4410	100	818	100	3860	100
Solution idéale	4390	100	402	100	922	100
Solution anti-idéale	4410	600	818	800	3860	950

5.2. Analyse des résultats

La figure 5.12 résume la localisation optimale des plateformes de *blending* (carrés oranges) et des plateformes de distribution (triangles inversés en rouge) ainsi que l'allocation optimale des flux dans le réseau, et ce selon chaque scénario (en colonne) et chaque distance, D_{CP}^{max} (en ligne) (figure 5.13). Les flux de produits finis (respect. de composants) sont représentés par des flèches noires (respect. vertes). Les flux de composants transitent le port d'Abidjan qui est représenté par un cercle vert.

Au premier abord, nous constatons que plus la distance, D_{CP}^{max} se réduit (i.e. des conditions de distribution deviennent difficiles), plus la zone chalandise des plateformes de *blending* se serre davantage (scénario 1) et plus le *blending* se décentralise (scénario 2 et 3). Ce résultat semble être assez logique. En effet, pour préserver la qualité des engrais *blendés*, transportés sur dans des routes difficiles, le *blending* doit être effectué près des fermiers. Par conséquent, la réduction de cette distance s'accompagne d'une augmentation du coût global (comme le montre la figure 5.14).

Figure 5.12 – Solutions de localisation des plateformes de blending et de distribution sous chaque scénario

Figure 5.13 – Légende de la figure 5.12

En cas de forte diversité des marchés (scénario 1), cette réduction de coût s'explique par la réduction du coût total de distribution des engrais *blendés* (i.e. coût de distribution en aval), comme les plateformes de *blending* n'auront plus à servir des marchés très distants (comme le montre la figure 5.12, à partir d'une distance de 350 Km). En cas de faible diversité et faible taille des marchés, la réduction du coût global peut être expliquée par l'augmentation du coût d'investissement et d'exploitation des plateformes sous-jacents à la duplication des installations de faible capacité, donc absence des économies d'échelle.

Le tableau 5.13 illustre le dimensionnement optimal des capacités de stockage et de *blending* selon chaque scénario, en supposant que, D_{CP}^{max} = 950 Km. Nous remarquons que l'augmentation de la diversité des composants, en cas de faible diversité et de taille du marché, (scénario 2 => scénario 3) s'accompagne d'un dimensionnement de grandes capacités globales de stockage et de *blending*. En effet, lorsque la diversité des composants augmente, le *blending* sera effectué sur de grandes quantités, ce qui nécessitera l'installation d'une grande capacité de stockage et de *blending*.

Dans ce qui suit, nous analyserons en détail ces résultats en supposant de bonnes conditions de distribution (i.e. = 950 Km).

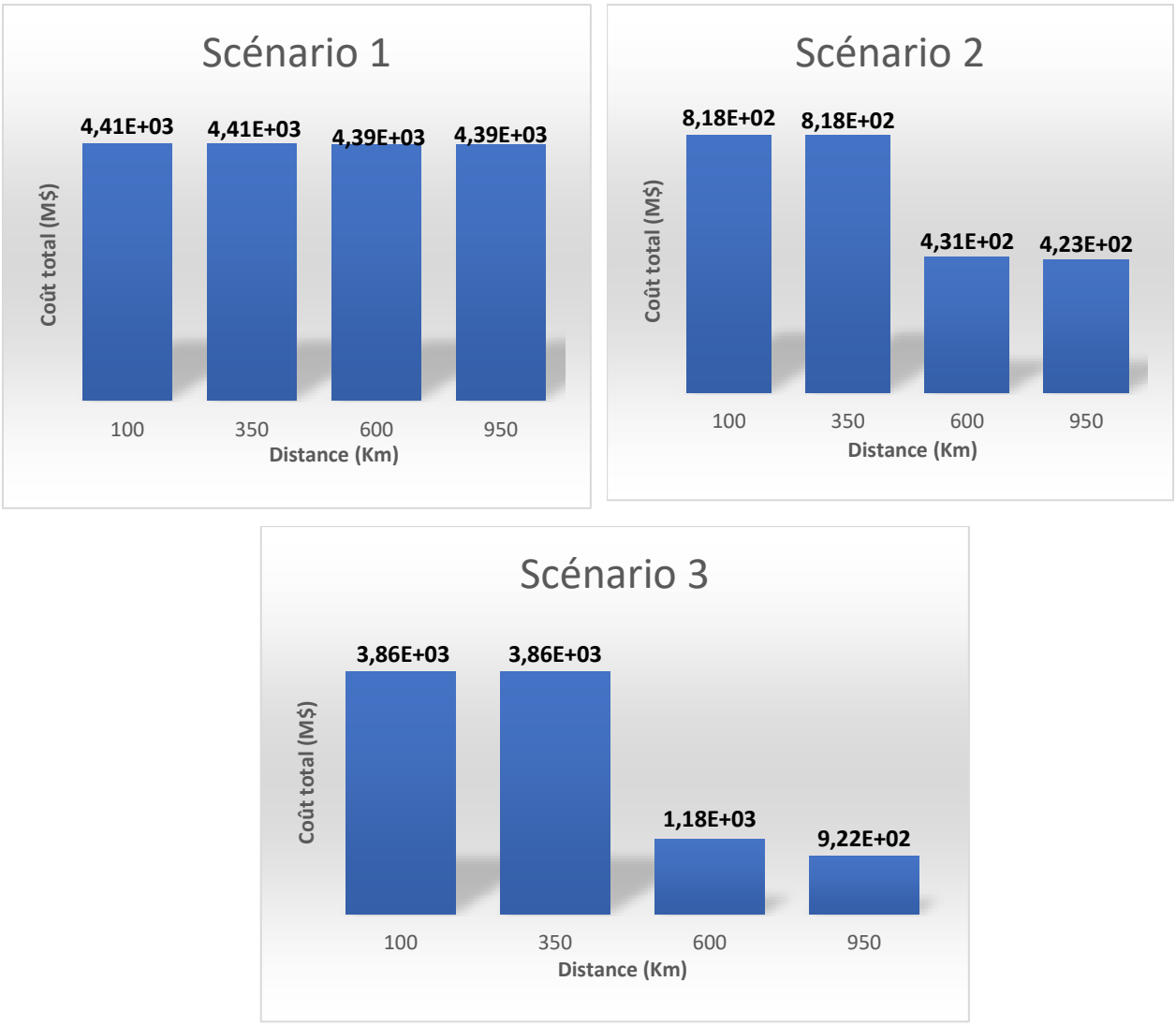

Figure 5.14 – Distribution du coût total sous chaque scénario

5.3. Impact de la diversité et la taille des marchés sur la localisation du blending

La figure 5.15 montre la distribution du coût global (coût d'investissement et les coûts opérationnels) en fonction la taille et la diversité des marchés et de la localisation du *blending*.

Nous constatons qu'en cas de faible diversité des composants, lorsque la diversité et la taille des marchés diminuent, la décision optimale tend à centraliser le *blending* (deux sites de *blending* desservant cinq marchés), alors que lorsque la diversité et la taille des marchés augmentent, la décision optimale tend à décentraliser le *blending* (cinq sites de *blending* desservant cinq marchés).

Tableau 5.13 Solutions de dimensionnement des capacités de stockage et de blending (avec = 950 Km)

	Scénario 1	**Scénario 2**	**Scénario 3**
	Capacité de stockage (tonnes)		
Korhogo	90000	10000	10000
Yamoussoukro	160000	10000	10000
Man	110000	10000	10000
San Pedro	140000	10000	10000
Abidjan	130000	10000	60000
Capacité de stockage totale	630000	50000	100000
	Capacité de *blending* (tonnes/mois)		
Korhogo	75600	0	0
Yamoussoukro	142800	0	0
Man	92400	0	0
San Pedro	117600	8300	0
Abidjan	109100	8300	25200
Capacité de blending totale	537500	16600	16800

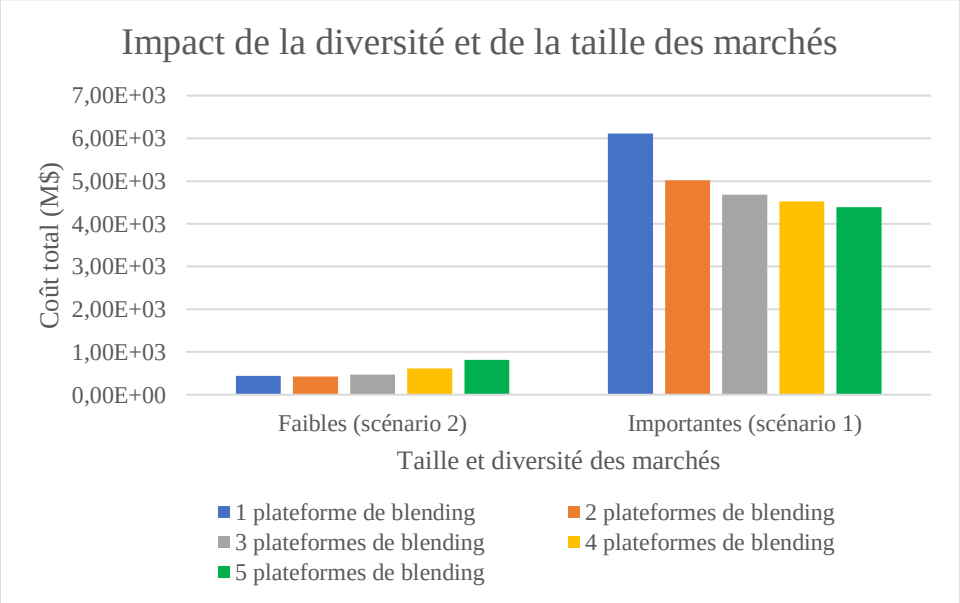

Figure 5.15 – Distribution du coût total en fonction de la diversité et la taille des marchés et de la localisation du blending

En effet, nous remarquons que plus le nombre de plateformes de *blending* augmente (i.e. décentralisation du *blending*), plus le coût global augmente dans le scénario 2 et diminue dans le scénario 1. Cette différence de distribution du coût global est due à la diversité et la taille des marchés. Celle-ci influence les arbitrages sous-jacents à la localisation du *blending* (comme expliqué dans la sous-section 2.1.2).

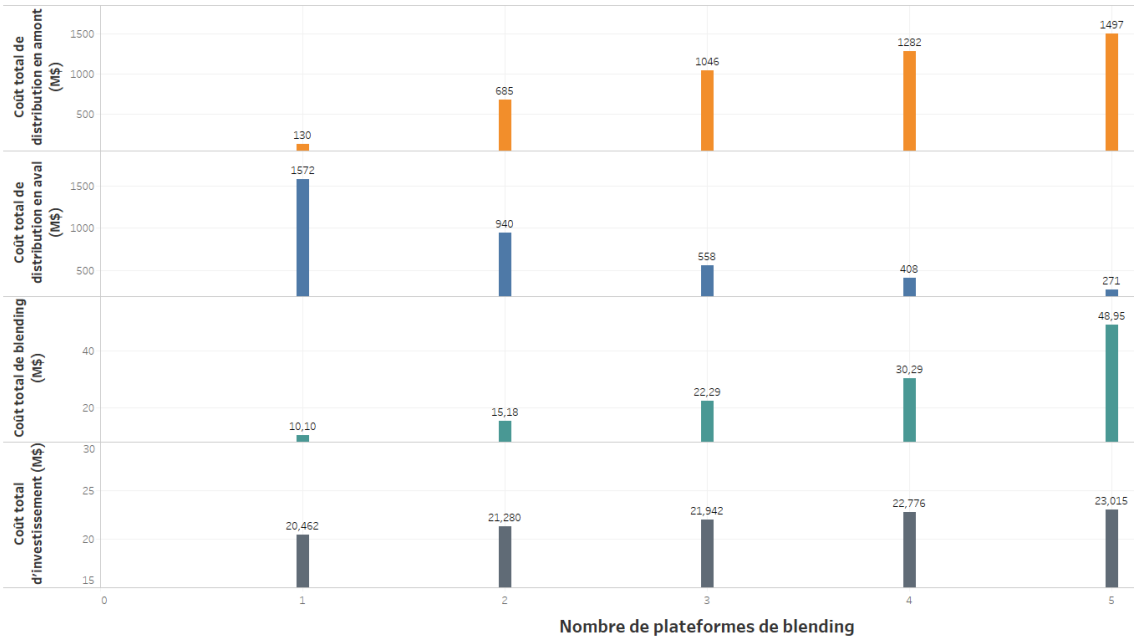

Figure 5.16 – Distribution des coûts d'investissement, de blending et de distribution en fonction de la localisation du blending (scénario 1)[17]

En effet pour comprendre l'impact de la diversité et taille des marchés sur ces arbitrages, nous avons élaboré les figures 5.16 et 5.17. Celles-ci mettent en évidence la distribution du coût d'exploitation et d'investissement en fonction de la localisation de *blending* selon les scénarios 1 et 2, respectivement. En analysant ces figures, nous constatons que la décentralisation du *blending* entraîne une diminution des coûts de distribution des engrais *blendés* et une augmentation du coûts total d'investissement, du coût total de *blending* et du coût total de distribution des composants (i.e. coûts de distribution en amont), transportés en vrac. En cas d'importante diversité et d'importante taille des marchés, les économies du coût de distribution en aval permises par cette décentralisation permet de compenser l'augmentation du coût total d'investissement et d'exploitation des plateformes. Or, en cas de faible diversité et faible taille

[17] Il est à noter que ces coûts n'ont pas la même échelle graphique mais ils sont tous rapportés à 1.000.000 de dollars. Par ailleurs, cette figure correspond à la distribution de quelques coûts (investissement, blending et distribution), ce qui signifie que leur somme est différente du coût total. Cette remarque est valable également pour les figures 5.17 et 5.18.

de marché, cette compensation n'est plus permise, par conséquent, la solution optimale sera de centraliser le *blending*.

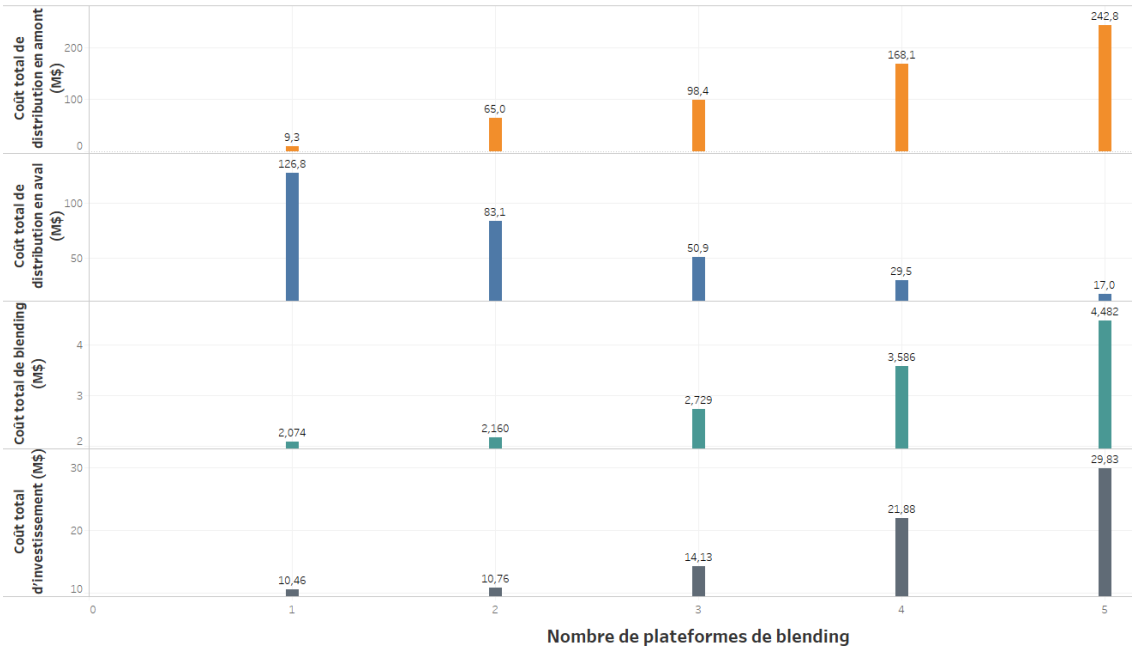

Figure 5.17 - Distribution des coûts d'investissement, de blending et de distribution en fonction de la localisation du blending (scénario 2)

5.4. Impact de la diversité des composants sur la localisation du blending

La figure 5.18 met en évidence la variation du coût global en fonction de la diversité des composants et de la localisation du *blending*. Compte tenu de la faible taille et diversité des marchés, le *blending* est centralisé, indépendamment de la diversité des composantes. En effet, comme expliqué (§5.2.1), les économies d'investissement et d'exploitation du *blending* permises par la centralisation du *blending* sont plus élevées que les économies du coût de distribution en aval permises par la décentralisation du *blending* (figures 5.17 et 5.19).

En diminuant la diversité des composants (scénario 3 => scénario 2), le *blending* reste toujours centralisé mais avec deux plateformes de *blending* (dans ce cas d'étude). De plus, comme le montre la figure 5.18, le coût total du scénario 3 est supérieur à celui du scénario 2. En effet, le coût total de distribution en amont augmente lorsque la diversité des composants augmente (scénario 2 => scénario 3). Donc, la diversité des composants, influence sur les coûts mais impacte légèrement la localisation du *blending*, ce qui semble logique à la suite des échanges avec notre partenaire.

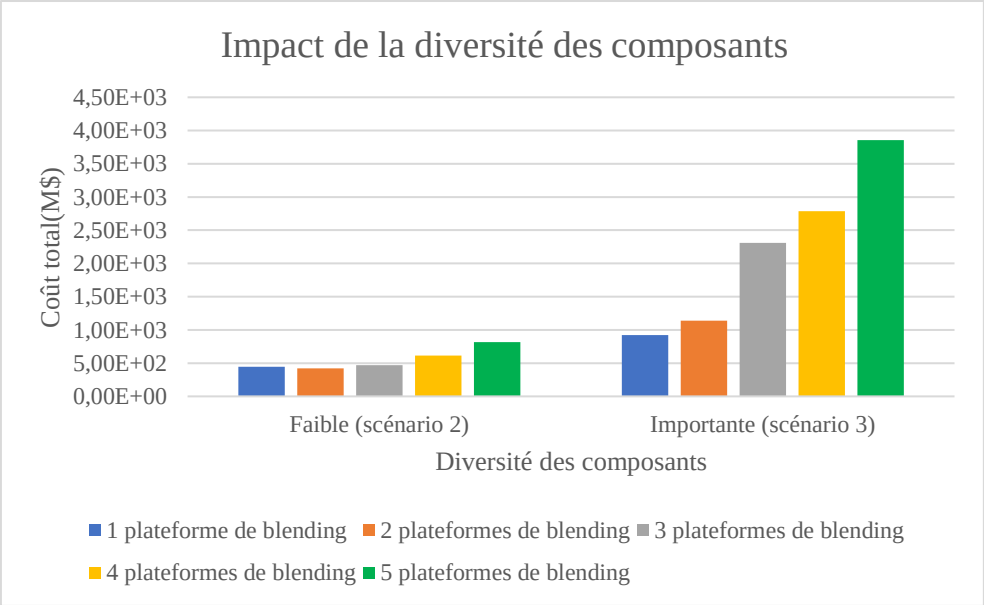

Figure 5.18 – Distribution du coût total en fonction de la diversité des composants et de la localisation du blending

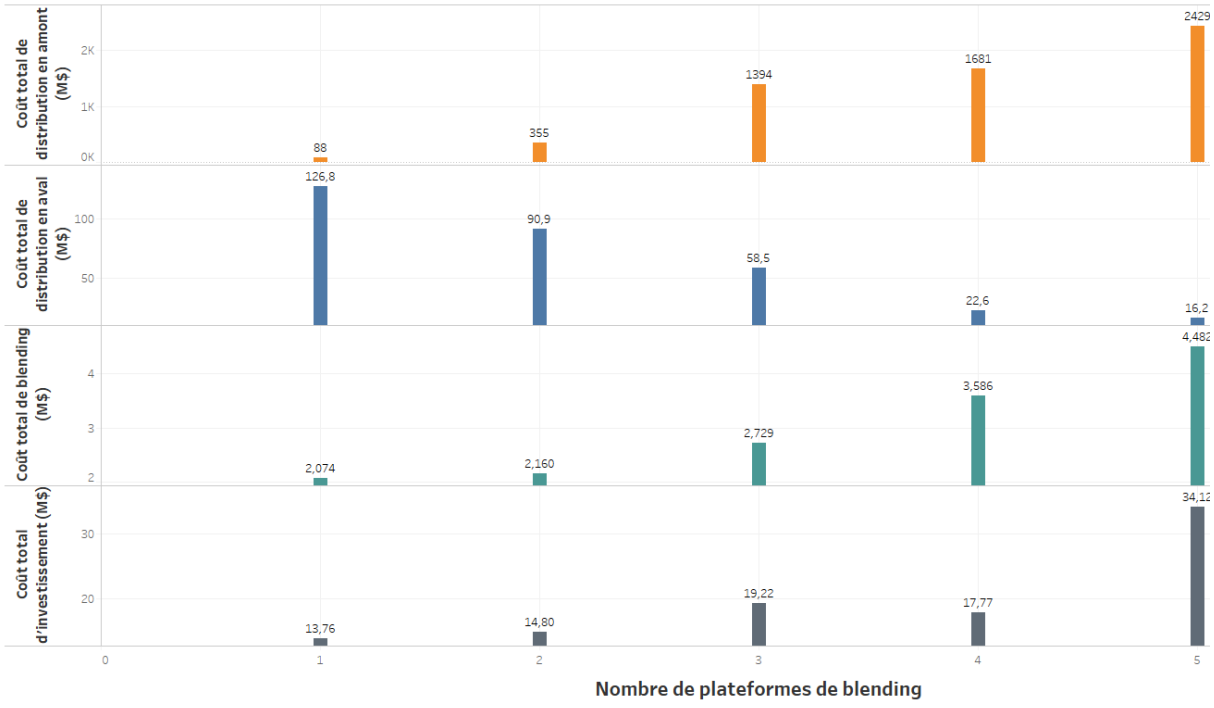

Figure 5.19 – Distribution des coûts d'investissement, de blending et de distribution en fonction de la localisation du blending (scénario 3)

6. Conclusion du chapitre 5

Ce chapitre s'est intéressé à la modélisation mathématique du problème de conception multi-objectifs de réseaux hybrides en Afrique. Ce modèle vise à apporter une aide à la décision aux industriels souhaitant approcher la demande des marchés africains par des produits fortement diversifiés. Par rapport aux pays développés, la particularité des pays africains est qu'ils manquent d'infrastructures et d'offres logistiques compétitives, ce qui complexifie la prise de décision. Cette difficulté se conjugue à celle, plus générale, du besoin croissant en personnalisation finale des produits finis. Pour assurer une grande diversification des produits finis tout en gardant des économies d'échelle, la différenciation des produits doit être retardée.

De plus, pour avoir une forte réactivité et une bonne proximité des produits finis aux marchés, une idée émergente est la personnalisation pendant la distribution. Enfin, l'organisation logistique (transport et stockage) sera plus compliquée si les composants (intrant à la personnalisation) sont conditionnés en vrac. De plus, la préservation de la qualité des produits personnalisés pendant leur distribution représente un grand enjeu pour les industriels, surtout pour ceux actifs dans l'industrie des engrais.

Compte tenu de ces spécificités, l'objectif du modèle est d'identifier la localisation et le dimensionnement des plateformes de distribution et de personnalisation en minimisant le coût livré aux consommateurs, en maximisant la réactivité à leurs demandes et en minimisant les dommages affectant les produits finis pendant la distribution. Ce modèle intègre des enjeux industriels réels rarement abordés simultanément dans la littérature sur la conception de réseaux logistiques : réseau hybride, différenciation retardée délocalisée, prise en compte des contraintes de distribution en Afrique en relation avec la qualité des produits personnalisés, distribution multimodale, prise en compte des économies d'échelle dans la modélisation des coûts.

Le chapitre suivant (chapitre 6) présentera une extension de ce modèle permettant de lever certaines de ses limites. Celles-ci concernent principalement : 1) la non prise en compte de l'aspect dynamique et incertain de l'évolution des marchés (infrastructures logistiques, offres logistiques). 2) La localisation et le dimensionnement des plateformes, qui sont décidés à la première période de l'horizon de planification et restent inchangées sur l'horizon de planification. 2) La non prise en compte de la possibilité de location (temporaire) des plateformes externes (i.e. sous-traitance du stockage).

Chapitre 6

Conception flexible et robuste de réseaux de distribution hybrides :

Application à la distribution et au blending d'engrais

1. Introduction du chapitre 6

Dans le chapitre 5, nous avons abordé le problème de conception multi-objectifs de réseaux de distribution hybrides en Afrique en univers déterministe et stable (à l'exception de la saisonnalité de la demande à court terme). Or, les conditions de distribution (infrastructures, offres logistiques, coûts de distribution et de transport) et le potentiel de consommation des marchés africains sont en constante évolution. L'évolution de la demande dans ces marchés se matérialise par une dynamique temporelle, entraînée par l'évolution des besoins et des préférences de consommation et par une dynamique spatiale, liée à l'apparition de nouveaux marchés et à la disparition des marchés existants (suite à une instabilité politique, par exemple).

La volatilité de ces marchés, à terme, laisse à penser qu'investir en Afrique n'est pas sans risque. En effet, la dynamique de ces marchés est entachée d'incertitude. Celle-ci se matérialise entre autres par : 1) un manque de visibilité sur les préférences des consommateurs à terme. 2) un manque de visibilité sur l'évolution des conditions de distribution. Cette évolution incertaine des marchés est souvent conjuguée à une pression accrue sur les coûts et sur les exigences des niveaux de service. Face à ce constat, les industriels se trouvent confrontés à un dilemme, celui de réduire leurs coûts tout en maintenant une meilleure réactivité à ces marchés.

L'objectif de ce chapitre est de corriger les limites du modèle présenté dans le chapitre 5 en intégrant la flexibilité dans la prise de décision. Cette flexibilité se matérialise par l'ouverture et la fermeture multi-périodes des plateformes durant l'horizon de planification, la sous-traitance temporaire du stockage et l'extension et la relocalisation des capacités (personnalisation ou stockage).

La planification qui en résulte devrait permettre de prendre les décisions suivantes :

- Où et quand ouvrir une nouvelle installation (plateforme de distribution, site de personnalisation) ou fermer une installation existante afin de maximiser la couverture du marché de façon rentable ?
- Où placer les plateformes de personnalisation pour atteindre à la fois l'efficacité et la réactivité aux demandes des marchés ?
- Quelle capacité doit-on externaliser et quand faut-il le faire pour répondre à la saisonnalité de la demande ?

- Quelle diversité devrait être offerte par chaque plateforme de personnalisation et quel marché local devrait être couvert ?

Ce chapitre est organisé comme suit : dans la section 2, nous allons décrire plus explicitement la flexibilité de la conception et/ou de la restructuration d'un réseau de distribution hybride pour mieux appréhender la problématique et la complexité décisionnelle. Ensuite, la section 3 s'intéressera à la modélisation systémique et mathématique du problème dont l'approche de résolution étant présentée dans la section 4. Cette approche sera illustrée et validée dans la section 5 par une étude de conception d'un réseau de distribution et de *blending* d'engrais en Côte d'Ivoire. Cette étude sert également à justifier la contribution industrielle du modèle en analysant les gains économiques provoqués par la gestion optimale des degrés de flexibilité. Finalement, le chapitre se conclut par un rappel des principales contributions scientifiques et industrielles du chapitre ainsi que par des perspectives de recherche futures.

2. Description du problème décisionnel

Pour fournir une description du problème de conception flexible de réseaux de distribution hybrides, nous considérons le futur réseau décrit sur la figure 6.1. Ce réseau devra servir un marché régional, sera constitué des zones de production par des fournisseurs régionaux et internationaux, des marchés de consommation locaux, des localisations potentielles des nouvelles plateformes, des plateformes de stockage externes, des ports de transit et des marchés locaux (appartenant à un même marché régional).

La demande de chaque marché local est une agrégation des besoins de points de vente situés dans ce marché, chacun nécessitant une certaine quantité d'un ou plusieurs produits finis, spécifiques ou standards. La demande de chaque marché local par rapport à chaque produit fini subit des variations saisonnières au cours d'une même année. Elle correspond au potentiel de consommation qui est en constante évolution. Le taux d'évolution de cette consommation n'est connu avec certitude que durant les premières années de l'horizon de planification, et présente une incertitude grandissante à terme.

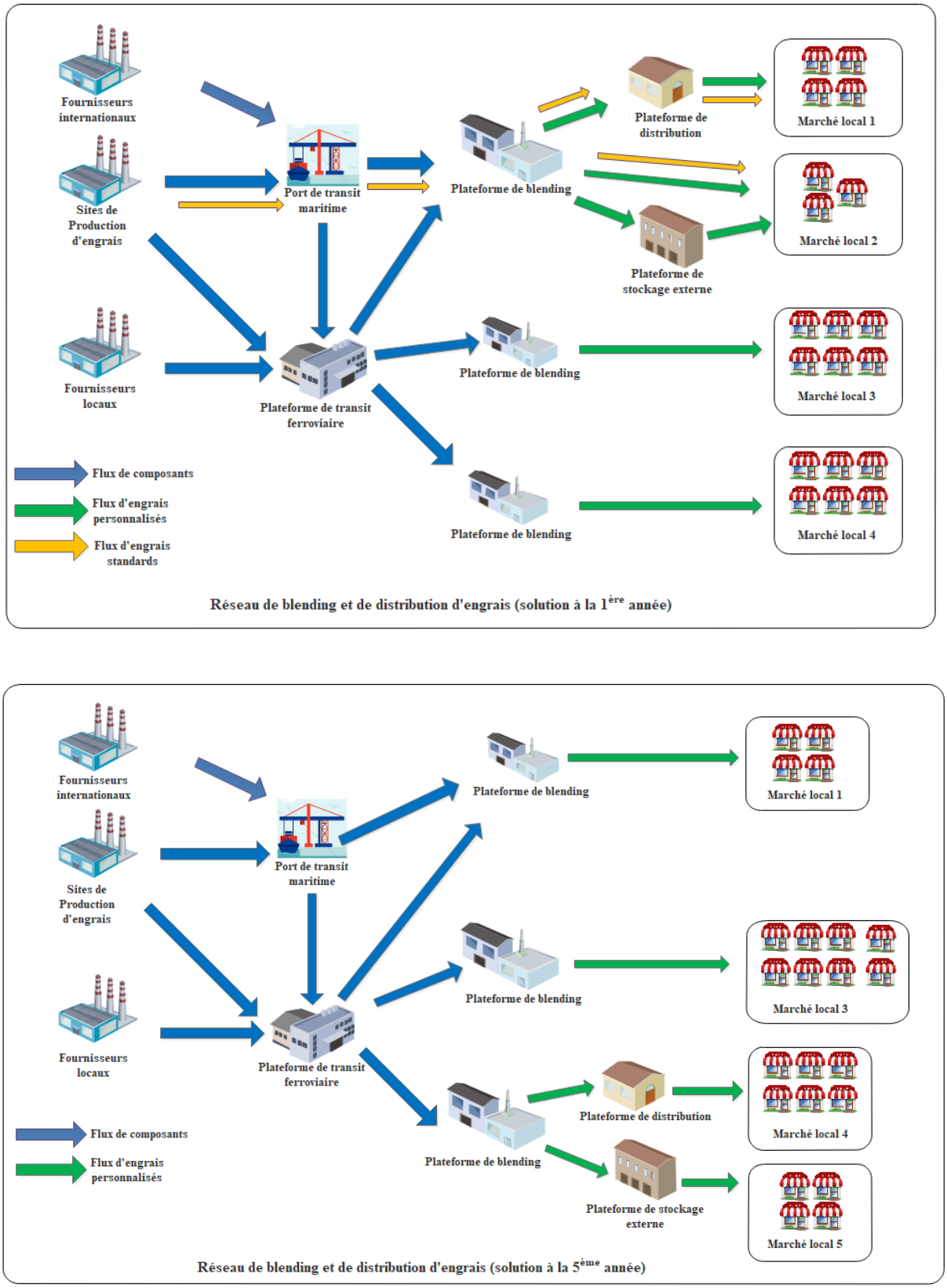

Figure 6.1 – Exemple de configuration type d'un futur réseau de distribution hybride

Les produits finis spécifiques seront personnalisés au niveau des futures plateformes de personnalisation tandis que les produits finis standards (représentant 20% des produits finis qui sont communément demandés par les marchés) seront importés directement depuis les fournisseurs. Le processus de personnalisation consiste à assembler des composants suivant une nomenclature spécifique et à conditionner les produits finis dans des emballages adaptés. Les produits finis et les composants peuvent avoir des conditionnements différents. Les composants sont fabriqués soit par des fournisseurs internes, soit par des fournisseurs externes. Ils sont ensuite expédiés vers les ports de transit avant d'atteindre les plateformes de distribution et/ou de personnalisation ou les plateformes de stockage externe. En plus des activités d'assemblage et d'emballage, une plateforme de personnalisation devra assurer le stockage des composants et de produits finis. Après la phase de personnalisation, les produits finis spécifiques seront stockés au niveau d'une plateforme de personnalisation, expédiés vers une autre plateforme de stockage interne ou externe ou expédiés vers les marchés locaux. Les produits finis standards seront soit stockés dans le réseau jusqu'à la réception des commandes des clients soit expédiés directement vers les marchés locaux.

Nous supposons que l'industriel souhaite créer de nouveaux débouchés en s'adaptant le mieux possible aux besoins des marchés locaux en produits spécifiques. Selon son positionnement initial dans le marché régional, l'industriel souhaitera soit restructurer son réseau de distribution et de personnalisation existant, soit concevoir un nouveau réseau pour intégrer la distribution et la personnalisation dans sa chaîne de valeur, pour se rapprocher des marchés africains. Or, comme explicité précédemment, les marchés africains sont en pleine émergence, et sont donc peu prévisibles. Face à cet environnement changeant, le défis de cet industriel est d'identifier et d'implémenter une stratégie de développement industriel et commercial à long terme qui soit flexible, dans un marché de plus en plus compétitif et complexe. Cette flexibilité décisionnelle se traduira par une localisation et un dimensionnement flexibles des plateformes de distribution et/ou de personnalisation (figure 6.1).

2.1. Localisation flexible des plateformes de distribution et de personnalisation

Par localisation flexible des plateformes, nous entendons que le planning d'ouverture des nouvelles plateformes potentielles est aligné sur les variations de la demande. Ainsi, l'ouverture d'une plateforme n'est pas effectuée seulement durant la 1ère période de l'horizon de

planification. En effet, si la zone de chalandise d'une localisation n'est attractive qu'à partir d'une certaine période (nouveau marché), il sera judicieux de retarder l'ouverture d'une plateforme à cette localisation jusqu'à cette période. De plus, une fois la plateforme ouverte, elle pourra être fermée en raison de déclin de la demande de sa zone de chalandise.

Pour illustrer cette flexibilité plus concrètement, nous considérons la situation représentée dans la figure 6.2. A la période t-1, l'industriel a mis en œuvre trois nouvelles plateformes aux locations respectives L_1, L_2 et L_3. Chacune dessert un marché local M_1, M_2 et M_3. A la fin de t-1, la demande du marché M_3 décline, tandis qu'un nouveau marché potentiel M_4 apparait plus loin des plateformes précédemment établies. L'industriel devra donc ouvrir une nouvelle plateforme dans une localisation L_4 à proximité de ce nouveau marché et fermer la plateforme localisée dans L_3.

Par ailleurs, et à l'opposé de ce qui est classiquement admis, nous supposons que la structure du réseau de distribution hybride n'est ni prédéterminée ni figée ; le nombre de niveaux du réseau, depuis les fournisseurs jusqu'au marchés locaux, n'est pas prédéterminé et peut varier d'un marché local à un autre. En effet, les marchés les plus diversifiés et ayant des demandes importantes auront des plateformes de personnalisation dédiées tandis que les marchés de faible diversité et de faibles demandes seront servis par des plateformes centrales, moyennant des plateformes de stockage à proximité.

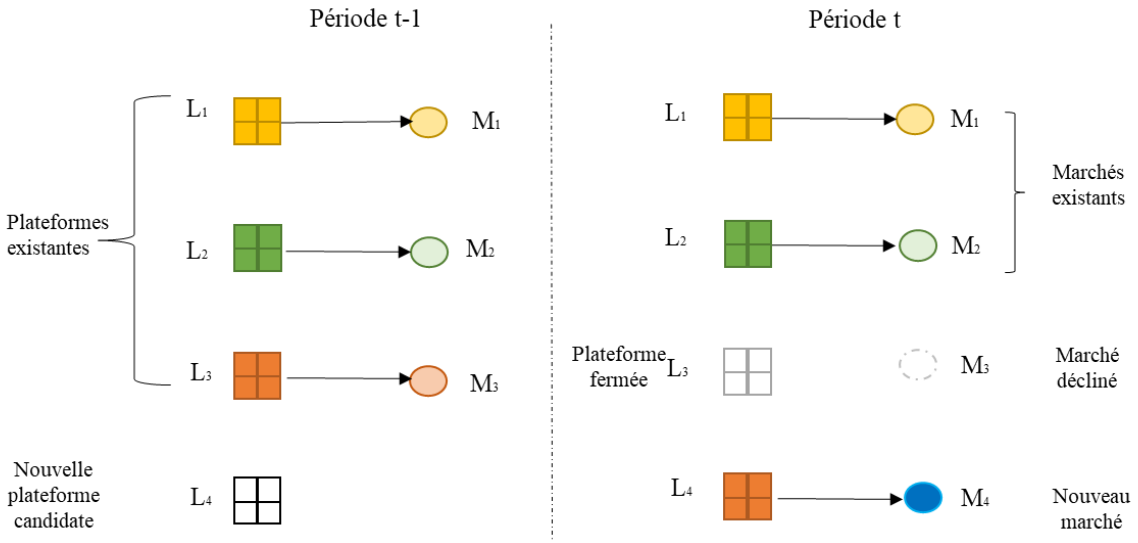

Figure 6.2 – Illustration de la localisation flexible des plateformes

2.2. Dimensionnement flexible des plateformes

Dans le chapitre 5, nous avons supposé que le dimensionnement des nouvelles plateformes est décidé à la première période et reste figé sur l'horizon de planification. Certes, cette hypothèse simplifie la complexité du problème décisionnel, mais elle conduit à des sous-optimums car les capacités ne seront efficacement utilisées qu'à terme. Pour faire face à l'évolution de la demande, le dimensionnement doit plutôt être flexible, en permettant d'étendre ou de relocaliser les capacités.

2.2.1. Extension des capacités modulaires

Pour faire face à une éventuelle croissance de la demande des marchés (i.e. apparition de nouveaux marchés, augmentation de la consommation des marchés), les industriels devront avoir la flexibilité d'effectuer des reconfigurations des capacités initialement installées, par l'acquisition des capacités additionnelles modulaires et/ou l'établissement de nouvelles installations (i.e. ouverture de nouvelles plateformes). L'acquisition de capacités modulaires se traduit par la sélection d'un sous-ensemble de capacités parmi un ensemble discret de capacités modulaires hétérogènes. Une extension optimale doit résulter d'un meilleur compromis entre la flexibilité et l'efficience.

2.2.2. Relocalisation des capacités modulaires

Dans le cas le plus général, la demande des marchés peut subir une croissance ou un déclin (i.e. apparition de nouveaux marchés et disparition des marchés existants). Ainsi, les industriels devront avoir la flexibilité de redéployer les capacités existantes. Une installation d'une plateforme existante peut être partiellement ou totalement déplacée vers un ou plusieurs nouvelles plateformes.

Pour illustrer plus concrètement la relocalisation des capacités modulaires, nous nous appuyons sur l'exemple de la figure 6.3. Nous supposons qu'à la fin d'une période donnée t-1, l'industriel exploite les plateformes localisées à E_1, E_2 et E_3. Les localisations potentielles pour la mise en place de nouvelles plateformes sont indiquées par N_1, N_2 et N_3. Nous supposons que la durée de la relocalisation d'une capacité modulaire donnée, au début d'une période t, est relativement courte par rapport à la durée de la période. Comme le montre la figure 6.3, après le transfert des capacités à la période t, la capacité de la plateforme localisée à E_1 est répartie entre les nouvelles plateformes localisées en N_1, N_2 et N_3. Par conséquent, la plateforme localisée à E_1 ne

fonctionnera ni au cours de la période t ni au cours d'une période ultérieure (étant donné qu'elle est fermée). Une partie de la capacité de la plateforme existante localisée à E_2, non utilisée, est transférée vers la nouvelle plateforme localisée à N_2. La plateforme localisée à E_2 demeure en exploitation, mais avec une capacité réduite jusqu'à la période t+1 où elle récupère une partie de sa capacité à partir de la plateforme localisée à E_3. Enfin, la plateforme localisée à E_3 conserve toute sa capacité jusqu'à la période t+1.

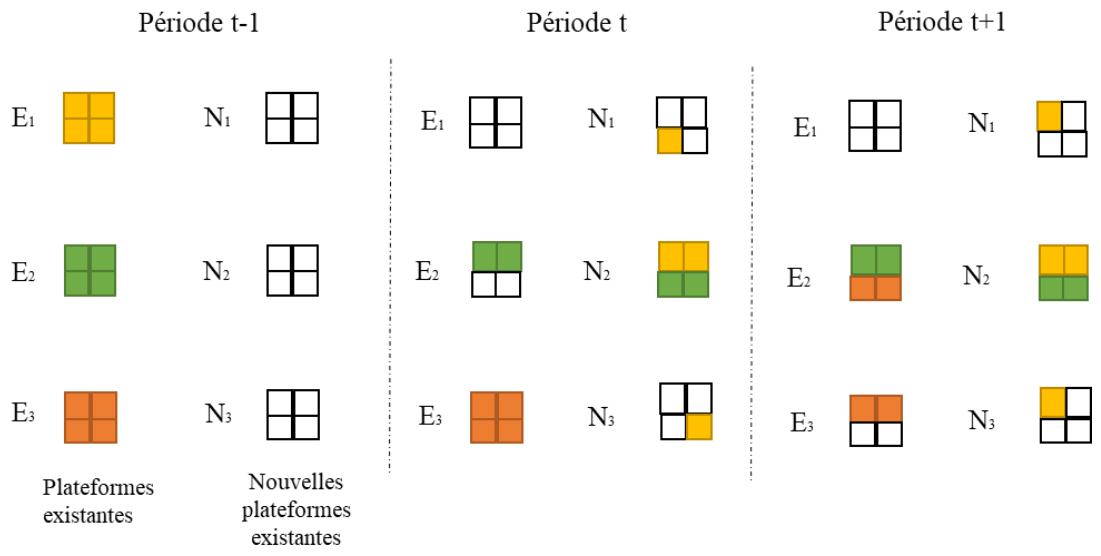

Figure 6.3 – Illustration de la relocalisation des capacités modulaires

3. Modélisation de la conception flexible de réseaux de distribution hybrides

Cette partie s'intéresse à la modélisation du problème. Les parties précédentes ont introduit le contexte du problème étudié et expliqué la problématique décisionnelle. Dans ce qui suit, nous allons présenter le modèle systémique associé au problème (§3.1) pour en déduire le modèle mathématique associé (§3.2). Comme explicité, cette modélisation constitue une extension de celle présentée dans le chapitre 5. Nous n'allons présenter dans ce qui suit que les ajustements réalisés (le lecteur est invité à revoir le modèle de base décrit dans le chapitre 5).

3.1. Modèle systémique du problème

En reprenant le principe de décomposition en trois sous-systèmes (physique, logique et décisionnel) de la méthodologie ASCI (chapitre 3), nous présentons tour à tour chaque sous-système ainsi que leurs dépendances, en utilisant le langage de modélisation UML.

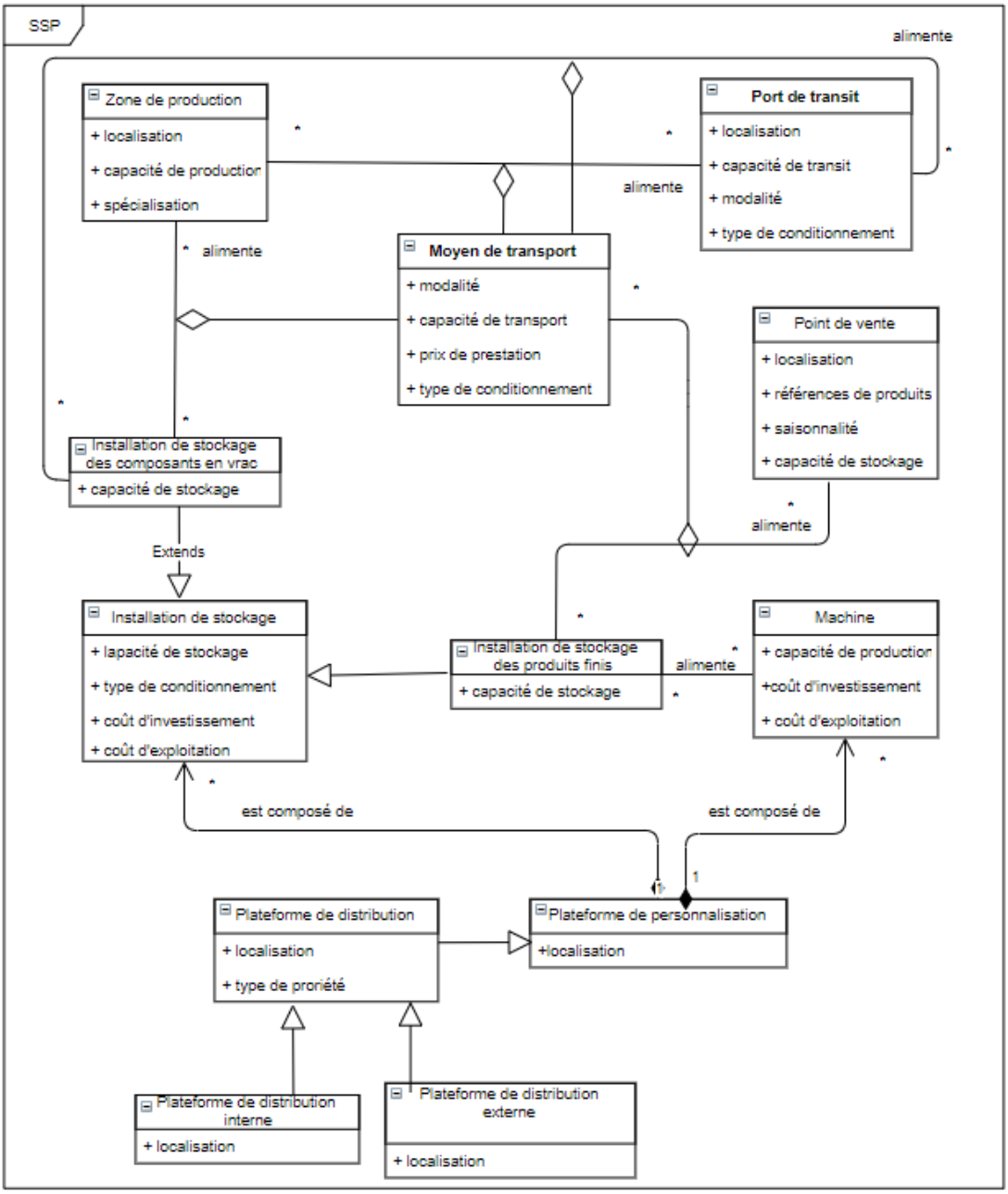

Figure 6.4 – Diagramme de classe UML du sous-système physique (SSP)

3.1.1. Sous-Système Physique (SSP)

Le sous-système physique correspondant au problème de conception flexible de réseaux de distribution hybrides est défini par les zones de production (fournisseurs de composants), les plateformes de personnalisation, les plateformes de distribution, les ports de transit, les points de ventes, les plateformes de stockage externes ainsi que les moyens de transport reliant ces entités entre elles. La figure 6.4 donne une vision holistique du modèle UML de ce sous-système physique. Toutes ces entités ont été décrites dans la partie §3.1.1 du chapitre 5, à l'exception de la plateforme de stockage externe. Celle-ci permet de stocker temporairement les flux de composants (conditionnés en vrac) et/ou de produits finis (conditionnés en conteneurs transportant des sacs). Elle se caractérise par sa localisation et inclut des installations de stockage dotées d'une capacité limitée. Une plateforme de stockage externe est donc un cas particulier d'une plateforme de distribution. Une plateforme de distribution conçue est appelée « interne » ; celle, qui sera louée, est appelée « externe ».

3.1.2. Sous-système logique (SSL)

Le sous-système logique est identique à celui présenté dans la section §3.2.1 du chapitre 5. Il est illustré sur la figure 6.5.

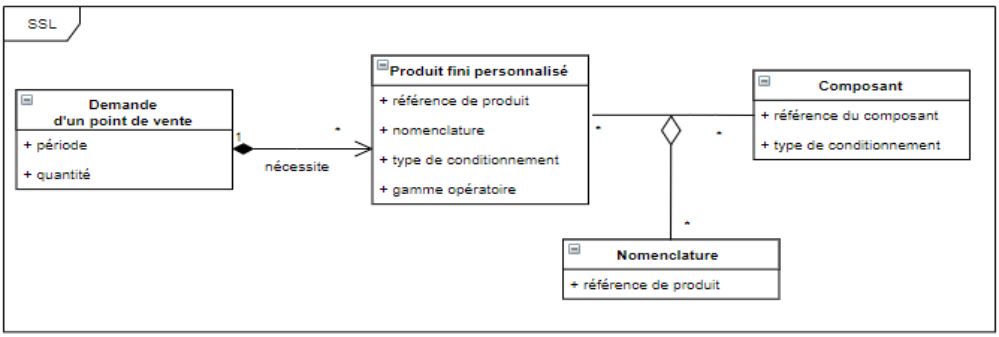

Figure 6.5 – Diagramme de classe UML du sous-système logique (SSL)

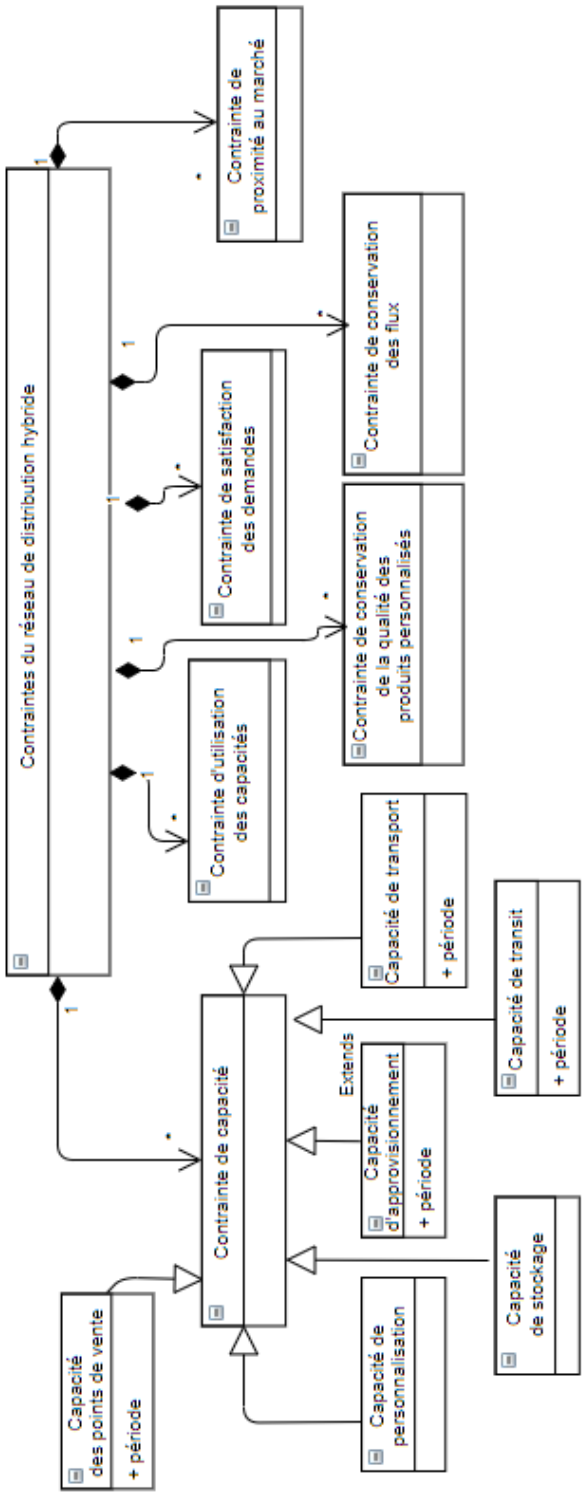

Figure 6.6 – Diagramme de classe UML des contraintes du réseau de distribution hybride

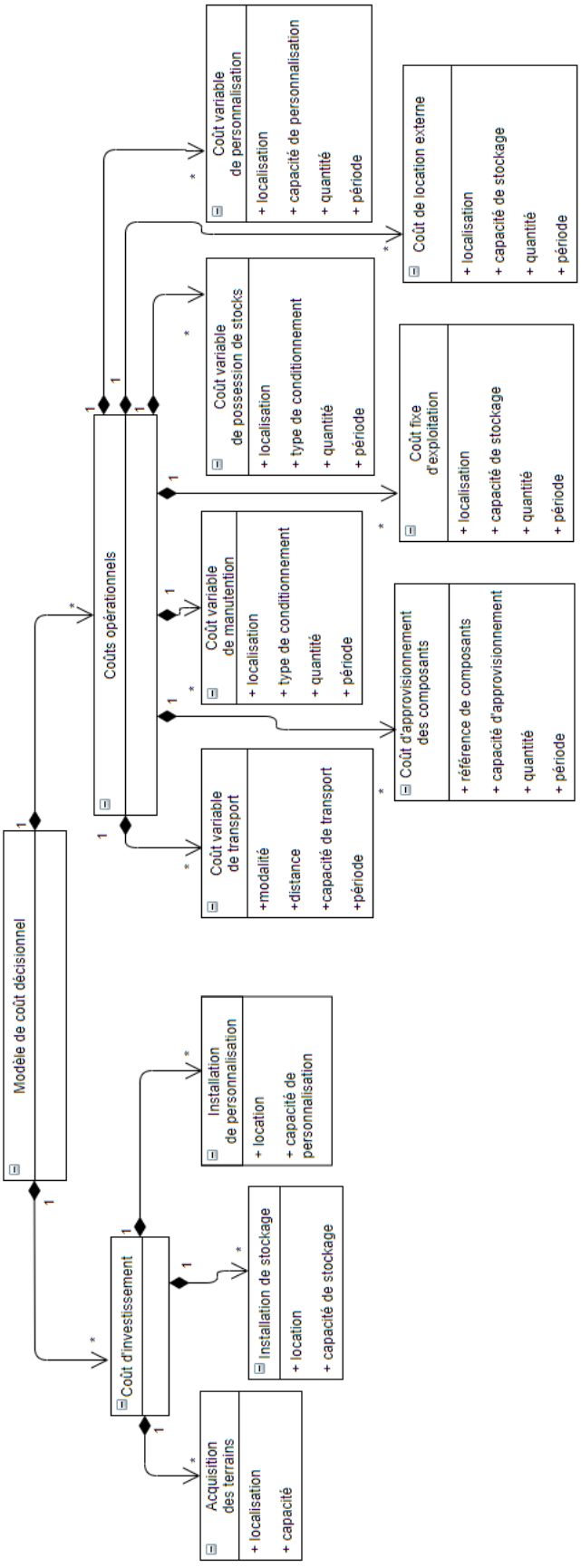

Figure 6.7 – Diagramme de classe UML du modèle de coûts

Figure 6.7 – Diagramme de classe UML du modèle de coûts

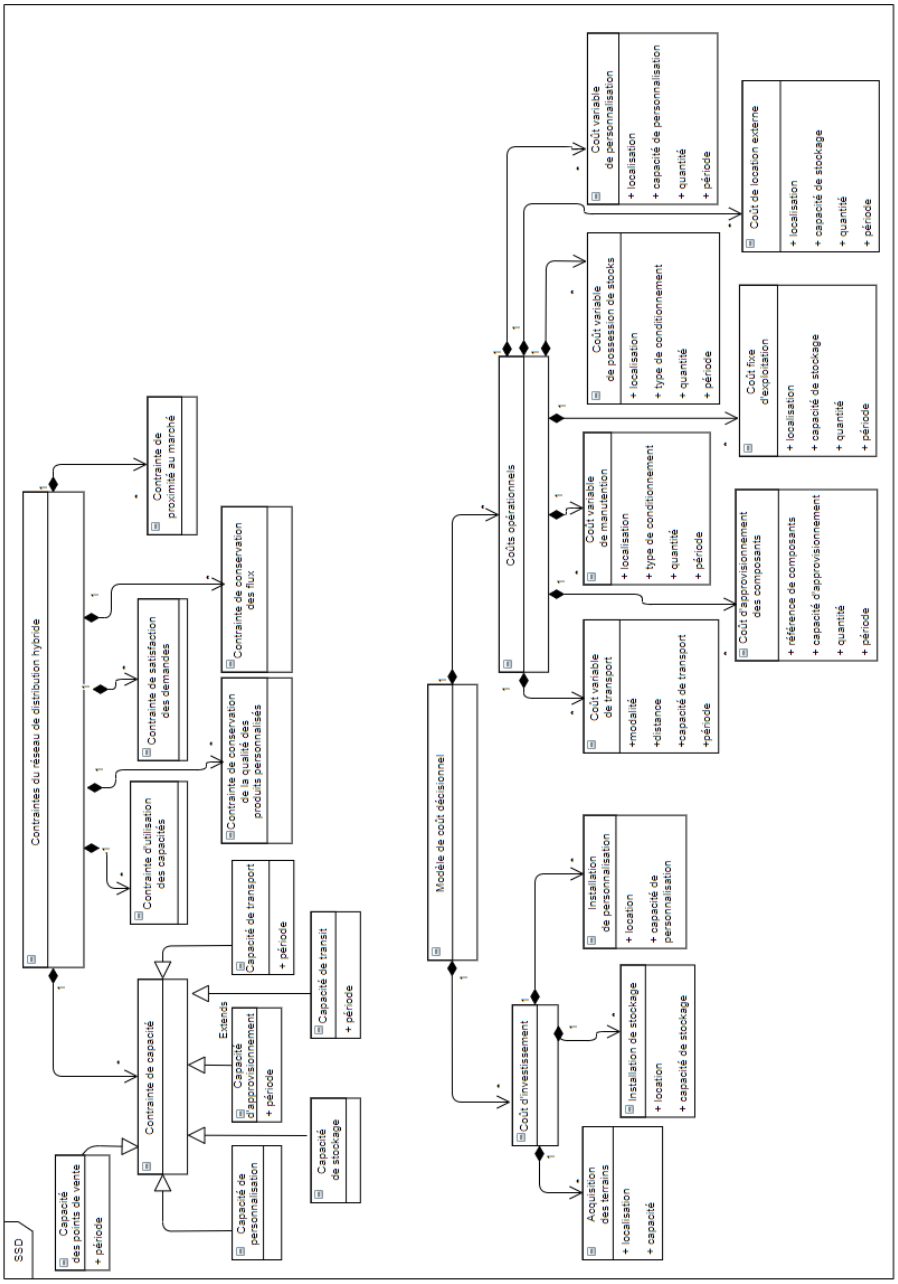

Figure 6.8 – Diagramme de classe UML du sous-système décisionnel (SSD)

3.1.3. Sous-système décisionnel

Le sous-système décisionnel agit sur les deux sous-systèmes précédemment cités (§3.1.1, §3.1.2). Ce sous-système regroupe les contraintes liées au réseau de distribution hybride et au modèle de coûts. Les contraintes du réseau comprennent à la base des contraintes de limites des capacités (transport, transit, stockage, personnalisation) et d'utilisation de capacité (stockage, personnalisation), la limite du budget d'investissement et la satisfaction de la demande des

points de ventes (marchés) (comme explicité dans la section §3.1.3 du chapitre 5). De plus, nous considérons des contraintes additionnelles qui accompagnent cette extension du modèle statique.

- *Contraintes d'extension des capacités* : chaque ancienne et nouvelle plateforme peut acquérir de nouvelles ou d'anciennes (relocalisées) capacités de personnalisation et de stockage, à condition que sa capacité maximale de stockage ne soit pas dépassée ;
- *Contrainte de relocalisation des capacités* : les capacités relocalisées doivent être inférieures ou égales à celles disponibles au moment de la relocalisation. De plus, une relocalisation totale des capacités de stockage entraîne la fermeture de la plateforme et donc la relocalisation de ses capacités de personnalisation ;
- *Contrainte de location des plateformes externes :* chaque plateforme externe peut être louée en fonction de sa capacité de stockage offerte à une période donnée ;
- *Contrainte de la limite du budget d'investissement et de relocalisation* : le coût d'acquisition, d'extension et de relocalisation des capacités ainsi que les coûts de cession d'activité (i.e. fermeture des plateformes) sont sujets à un budget limite.

La figure 6.6 montre le diagramme de classes associé à l'ensemble des contraintes du système de production-distribution. La figure 6.7 décrit le diagramme de classe associé à ce modèle de coûts, qui comprend deux catégories de coûts, comme indiqué dans le chapitre 5. Le coût stratégique comprend les coûts d'investissement liés à l'acquisition des terrains, l'achat des équipements modulaires de personnalisation et de stockage, les frais d'installation et les coûts de cession d'activité et de fermeture des plateformes. Ces coûts affichent des économies d'échelles et varient en fonction des pays (i.e. des marchés régionaux). Ainsi, pour la même capacité totale, il devient moins onéreux d'investir dans de grandes plateformes en faible nombre que d'investir dans de petites plateformes à faible capacité.

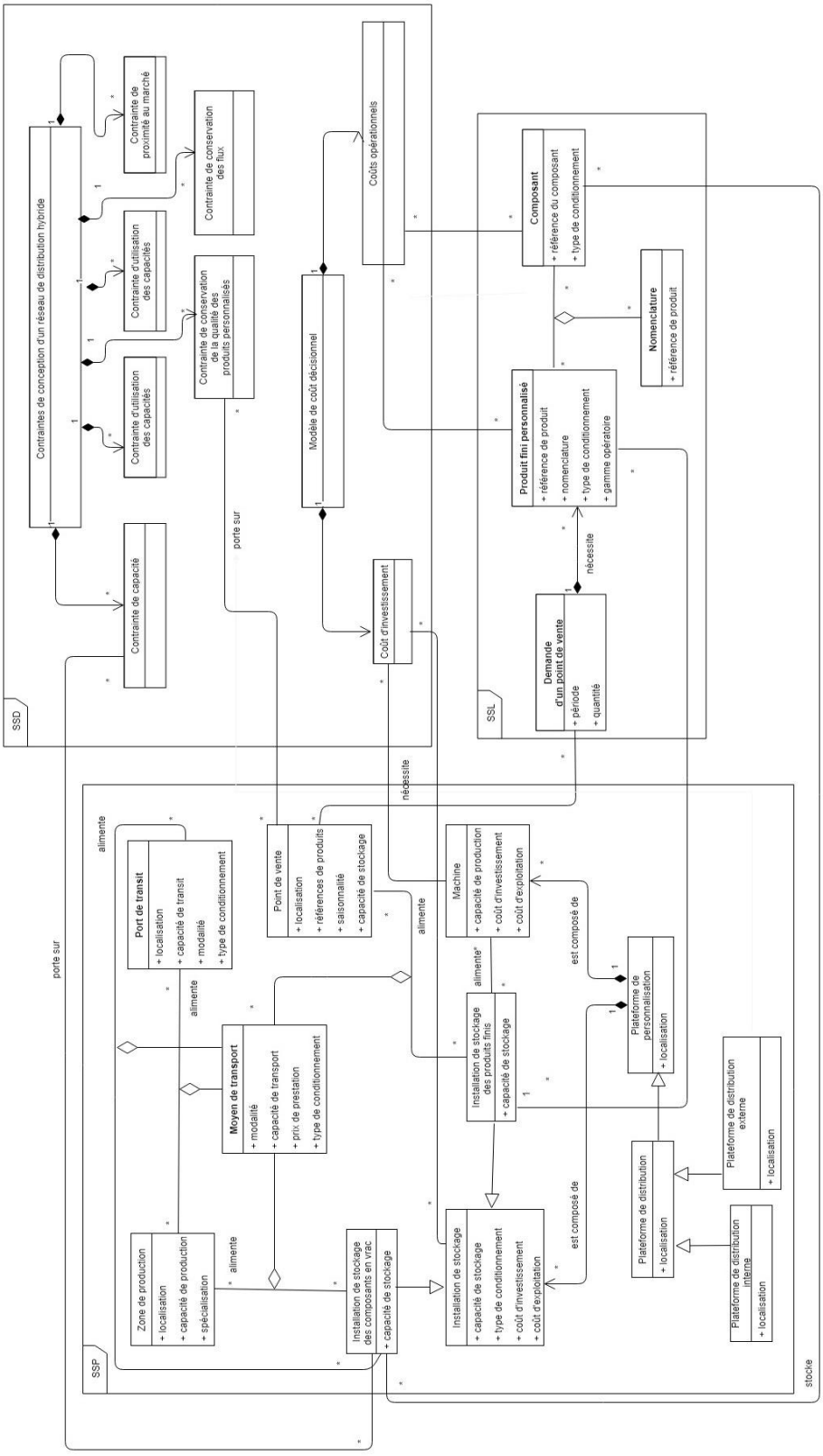

Figure 6.9 – Diagramme de classe UML du problème de conception flexible de réseaux de distribution des flux hybrides

Figure 6.9 – Diagramme de classe UML du problème de conception flexible de réseaux de distribution des flux hybrides

Le coût opérationnel regroupe des coûts récurrents générés par le fonctionnement opérationnel du réseau de distribution hybride. En plus des coûts décrits dans le modèle décisionnel du chapitre 5, citons également le coût de relocalisation des capacités, le coût d'expansion des capacités et le coût de location des plateformes de stockage externes. Ainsi, le diagramme de classes globale du sous-système décisionnel est représenté sur la figure 6.8.

3.1.4. Modèle systémique global sous UML

Le modèle systémique du problème de conception flexible de réseaux de distribution hybrides est représenté par le diagramme UML de la figure 6.9.

3.2. Modélisation mathématique du problème

Dans cette partie, nous allons expliciter la modélisation mathématique générique du problème de conception flexible de réseaux de distribution hybrides, à partir du modèle de connaissances systémique présenté dans la partie précédente (§3.1).

3.2.1. Hypothèses et paramètres

Comme explicité, ce modèle a pour objectif de corriger les limites du modèle présenté dans le chapitre 5 en intégrant de nouveaux degrés de liberté. Nous supposons donc que :

- une nouvelle plateforme peut être établie à n'importe quelle période durant l'horizon de planification. De même, une plateforme existante peut être fermée à n'importe quelle période ;
- une plateforme récemment établie peut être fermée par la suite ;
- les nouvelles et anciennes plateformes peuvent acquérir soit de nouvelles capacités soit des capacités existantes et ce à n'importe quelle période durant l'horizon de planification ;
- les capacités des anciennes et nouvelles plateformes peuvent être étendues ou contractées (par relocalisation) ; le nombre d'extensions ou de relocalisations possibles n'est pas limité ;

- la relocalisation des capacités s'effectue à partir des anciennes et nouvelles plateformes vers les anciennes et nouvelles plateformes ;
- quand une plateforme ne dispose plus de capacité de stockage, elle est fermée ;
- la relocalisation de toute la capacité de production d'une plateforme n'entraîne pas sa fermeture ; celle-ci peut fonctionner comme une plateforme de stockage.

Nous allons reprendre les paramètres du problème présentés dans la section §3.2 du chapitre 5 et les compléter par des paramètres additionnels, notamment :

- ensemble de plateformes de stockage externes
- capacité de stockage disponible à la période au niveau par une plateforme de stockage externe.

3.2.2. Variables de décision

La conception (ou la restructuration) flexible de réseaux de distribution hybrides se traduit par la sélection des localisations potentielles des nouvelles plateformes, l'identification des plateformes existantes à fermer, l'acquisition des nouvelles capacités modulaires (stockage et production), l'extension et la relocalisation des capacités modulaires et l'allocation des flux entre les différents nœuds du réseau.

Tableau 6.1 – Les variables de décision stratégiques

Variable	Description
$o_{ln}^{a,t}$	1 si une nouvelle plateforme est ouverte au niveau la localisation $ln \in LPn \cup LL$ opérant l'activité $a \in \{distribution, personnalisation\}$au début de la période $t \in T$, 0 sinon
$s_l^{gs,t}$	1 si une nouvelle capacité de stockage modulaire ayant la configuration $gs \in GS$ est installée au niveau d'une nouvelle ou ancienne plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début de la période $t \in T$, 0 sinon
$b_l^{gp,t}$	1 si une nouvelle capacité de personnalisation ayant la configuration $gp \in GP$ est installée au niveau d'une nouvelle ou ancienne plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début de la période $t \in T$, 0 sinon
$rs_{l,l'}^{gs,t}$	1 si une capacité modulaire $gs \in GS$ est transférée depuis une plateforme située à la localisation $l \in LP$ vers une nouvelle ou ancienne plateforme située à la localisation $l' \in LP$ au début de la période $t \in T$, 0 sinon
$rb_{l,l'}^{gp,t}$	1 si une capacité modulaire de personnalisation $gp \in GP$ est transférée depuis une plateforme située à la localisation $l \in LP$ vers une nouvelle ou ancienne plateforme située à la localisation $l' \in LP$au début de la période $t \in T$, 0 sinon
c_l^t	1 si une plateforme localisée à la localisation $l \in LP$ à se ferme au début de la période $t \in T$, 0 sinon

Cette relocalisation n'est admise que si la plateforme est candidate pour relocaliser sa capacité. Cette spécification est traduite par le prédicat F1 suivant :

$$\forall\, l \in LP | BinR(l) = 1 => F1 = vrai \tag{6.1}$$

$$\forall\, o, d, k | o \neq \sum_{n} LinkR_{o,d}^{n,t} \times Bin_{n}^{k} \geq 1 => F2 = vrai \tag{6.2}$$

$$\forall\, o, d, k | o \neq \sum_{n} LinkF_{o,d}^{n,t} \times Bin_{n}^{k} \geq 1 => F3 = vrai \tag{6.3}$$

Tableau 6.2 – Les variables de décision tactiques

Variable	Description
$\boldsymbol{fr_{o,d}^{q,t}}$	Quantité de flux de composants/produits finis de la référence $q \in QT$ expédiée depuis le nœud d'origine $o \in O = LP \cup P \cup S$ vers le nœud de destination $d \in D = LP \cup ZT$ pendant la période $t \in T$ par voie routière
$\boldsymbol{ff_{o,d}^{q,t}}$	Quantité de flux de composants/produits finis de la référence $q \in QT$ expédiée depuis le nœud d'origine $o \in P \cup S$ vers le nœud de destination $d \in Ps$ pendant la période $t \in T$ par voie ferroviaire
$\boldsymbol{fm_{o,d}^{q,t}}$	Quantité de flux de composants/produits finis de la référence $q \in QT$ expédiés depuis le nœud d'origine $o \in S$ vers le nœud de destination $d \in Pm$ pendant la période $t \in T$ par voie maritime
$\boldsymbol{I_{l,q}^{t}}$	Niveau de stock de la marchandise de la référence $q \in QT$ au niveau d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$ à la fin de la période $t \in T$
$\boldsymbol{P_{l}^{kp,gp,t}}$	Quantité des flux des produits personnalisés de la référence $kp \in Kp$ produits par l'installation de de personnalisation ayant la configuration $gp \in GP$ au niveau d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$ pendant la période $t \in T$
$\boldsymbol{VR_{o,d}^{q,tr,t}}$	Le nombre de camions de type $tr \in Tr$ transportant le flux de composants de la référence $q \in Rw$ entre le nœud d'origine $o \in O$ et le nœud de destination $d \in D$ pendant la période $t \in T$
$\boldsymbol{SR_{o,d}^{tr,t}}$	Le nombre de camions de type $tr \in Tr$ transportant des produits finis entre le nœud d'origine $o \in S \cup P$ et le nœud de destination $d \in Ps$ pendant la période $t \in T$
$\boldsymbol{VF_{o,d}^{q,trl,t}}$	Le nombre de wagons de type $trl \in Trl$ transportant le flux de composants de la référence $q \in Rw$ entre le nœud d'origine $o \in P \cup S$ et le nœud de destination $d \in Ps$ pendant la période $t \in T$
$\boldsymbol{SF_{o,d}^{trl,t}}$	Le nombre de wagons de type $trl \in Trl$ transportant les produits finis entre le nœud d'origine $o \in P \cup S$ et le nœud de destination $d \in Ps$ pendant la période $t \in T$
$\boldsymbol{VM_{o,d}^{q,ts,t}}$	Le nombre de navires de type $ts \in Ts$ transportant le flux de composants de la référence $q \in Rw$ entre le nœud d'origine $o \in S$ et le nœud de destination $d \in Pm$ pendant la période $t \in T$
$\boldsymbol{SM_{o,d}^{ts,t}}$	Le nombre de wagons de type $ts \in Ts$ transportant les produits finis entre le nœud d'origine $o \in S$ et le nœud de destination $d \in Pm$ pendant la période $t \in T$
$\boldsymbol{y_{ln,d}}$	1 s'il existe un flux qui part d'une nouvelle plateforme localisée à $ln \in LPn$ vers le nœud de destination $d \in D = LP \cup ZT$; 0 sinon

Les variables d'allocation des flux routiers (respectivement ferroviaires) sont définies selon le prédicat F2 (respectivement F3) qui conditionne l'existence d'un flux entre deux nœuds s'il y existe une offre de transport routier (respectivement, ferroviaire) selon au moins un des types de conditionnement.

3.2.3. Contraintes

- ***Contraintes sur les nouvelles plateformes : ouverture, acquisition et extension des capacités***

La contrainte (6.4) indique que si une nouvelle plateforme est mise en œuvre dans une localisation candidate, elle sera soit une plateforme de personnalisation soit une plateforme de distribution. Les contraintes (6.5 - 6.8) stipulent que l'acquisition de nouvelles capacités de personnalisation (6.5, 6.6) et de stockage (6.7, 6.8) n'est possible qu'une fois ces plateformes établies. En outre, la capacité de stockage installée dans une nouvelle plateforme ne peut pas dépasser la capacité maximale offerte par cette localisation (6.8).

$$\forall\, ln \in LPn, t \in T| \sum_{a\in\{distribution,\ personnalisation\}} o_{ln}^{a,t} \leq 1 \tag{6.4}$$

$$\forall\, ln \in LPn, t \in T|$$

$$\sum_{gp\in GP} b_{ln}^{gp,t} + \sum_{l\in LP, gp\in GP|F1=vrai} rb_{l,ln}^{gp,t} \geq o_{ln}^{personnalisation,t} \tag{6.5}$$

$$\forall\, ln \in LPn, t \in T|$$

$$\sum_{gp\in GP} b_{ln}^{gp,t} + \sum_{l\in LP, gp\in GP|F1=vrai} rb_{l,ln}^{gp,t} \leq \sum_{\tau\leq t} BigM \times o_{ln}^{personnalisation,\tau} \tag{6.6}$$

$$\forall\, ln \in LPn, t \in T| \sum_{a\in A} s_{ln}^{gs,t} + \sum_{l\in LP, gs\in GS|F1=vrai} rs_{l,ln}^{gs,t} \geq \sum_{a\in A} o_{ln}^{a,t} \tag{6.7}$$

$$\forall\, ln \in LPn, t \in T|$$

$$\sum_{gs\in GS} s_{ln}^{gs,t} \times SCp_{gs} + \sum_{l\in LP, gs\in GS|F1=vrai} rs_{l,ln}^{gs,t} \times SCp_{gs} \leq \sum_{a\in\{distribution,personnalisation\},\tau\leq t} SCp_{ln}^{max} \times o_{ln}^{a,\tau} \tag{6.8}$$

- ***Contraintes relatives aux anciennes plateformes : extension des capacités existantes***

L'extension de la capacité de stockage d'une plateforme existante est possible tant que la capacité maximale de la plateforme n'est pas encore atteinte.

$$\forall\, le \in LPe, t \in T| \tag{6.9}$$

$$SCpI_l + \sum_{\substack{gs\in GS, l\in LP \\ |F1=vrai}} rs_{l,le}^{gs,t} \times SCp_{gs} + \sum_{gs\in GS} s_{le}^{gs,t} \times SCp_{gs} \leq SCp_{le}^{max}$$

- ***Contraintes relatives à l'utilisation des capacités des plateformes nouvelles et anciennes***

Les relations (6.10, 6.11) définissent respectivement la capacité périodique de stockage et de personnalisation disponible au niveau des nouvelles plateformes. Celles-ci ne doivent pas être utilisées au-delà d'un certain seuil défini par le constructeur ou le gestionnaire de la plateforme (6.12, 6.13).

$$\forall\, l \in LP, t \in T$$

$$\begin{aligned} SCap(l,t) = {} & SCpI_l + \sum_{gs\in GS, \tau\leq t} s_l^{gs,\tau} \times SCp_{gs} \\ & + \sum_{\substack{gs\in GS, l'\in LP \\ \tau\leq t|F1=vrai}} rs_{l',l}^{gs,\tau} \times SCp_{gs} - \sum_{\substack{gs\in GS, l"\in LP \\ \tau\leq t|F1=vrai}} rs_{l,l"}^{gs,\tau} \times SCp_{gs} \end{aligned} \tag{6.10}$$

$$\begin{aligned} PCap(l,t) = {} & PCpI_l + \sum_{gp\in GP, \tau\leq t} b_l^{gp,\tau} \times PCp_{gp} \\ & + \sum_{\substack{gp\in GP, l'\in LP \\ \tau\leq t|F1=vrai}} rb_{l',l}^{gp,\tau} \times PCp_{gp} - \sum_{\substack{gp\in GP, l"\in LP \\ \tau\leq t|F1=vrai}} rs_{l,l"}^{gp,\tau} \times PCp_{gp} \end{aligned} \tag{6.11}$$

$$\begin{aligned} & \Big(\sum_{\substack{o\in O, q\in QT \\ |F2=vrai}} fr_{o,l}^{q,t} + \sum_{q\in QT} I_l^{q,t-1} + \sum_{kp\in Kp, gp\in GP} P_l^{kp,gp,t} + \sum_{q\in QT} I_l^{q,t-1}\Big)/2 \\ & \leq \beta_{max} \times SCap(l,t) \end{aligned} \tag{6.12}$$

$$\sum_{kp\in Kp, gp\in GP} P_l^{kp,gp,t} \leq \beta_{max} \times PCap(l,t) \tag{6.13}$$

- ***Contraintes de relocalisation des capacités des plateformes anciennes et nouvelles***

Les contraintes (6.14, 6.15) indiquent que nous ne pouvons pas transférer des capacités de stockage (6.14) et de personnalisation (6.15) au-delà des capacités disponibles. De plus, nous ne pouvons pas relocaliser ces capacités pendant la première période les capacités des nouvelles plateformes qui sont établies à la première période (6.16). Une fois que toutes les capacités de stockage d'une plateforme seront relocalisées, la plateforme sera fermée (6.17). Par conséquent, toutes les capacités de personnalisation seront relocalisées une fois la plateforme fermée (6.18).

$$\forall l \in LP, t \in T, F1 = vrai| \sum_{l \in LP, gs \in GS} rs_{l,l'}^{gs,t} \times SCp_{gs} \leq SCap(l,t) \quad (6.14)$$

$$\forall l \in LP, t \in T, F1 = vrai| \sum_{l \in LP, gp \in GP} rb_{l,l'}^{gp,t} \times PCp_{gp} \leq PCap(l,t) \quad (6.15)$$

$$\forall l \in LP_n, t \in \{1\}, F1 = vrai| \sum_{l \in LP, gp \in GP} rb_{l,l'}^{gp,t} = \sum_{l \in LP, gs \in GS} rs_{l,l'}^{gs,t} = 0 \quad (6.16)$$

$$\forall l \in LP, t \in T, F1 = vrai|\ c_l^t \leq SCap(l,t) \quad (6.17)$$

$$\forall l \in LP, t \in T, F1 = vrai|\ PCap(l,t) \leq BigM \times (1 - c_l^t) \quad (6.18)$$

- ***Contraintes liées à la location des plateformes de stockage externes***

La contrainte (6.19) indique l'équilibre des flux transitant par une plateforme de stockage externe. Bien évidemment, les flux sont expédiés uniquement vers les plateformes louées (6.20). Les flux réceptionnés en plus des flux temporairement stockés ne doivent pas dépasser la capacité louée à un période donnée (6.21).

$$\forall\ l \in LL, t \in T, q \in QT| \sum_{\substack{o \in O \\ |F2=vrai}} fr_{o,l}^{q,t} + Inv_{l,q}^{t-1} = \sum_{\substack{d \in D \\ |F2=vrai}} fr_{l,d}^{q,t} + Inv_{l,q}^{t} \quad (6.19)$$

$$\forall\ l \in LL, t \in T| \sum_{\substack{d \in D, q \in QT \\ |F2=vrai}} fr_{l,d}^{q,t} \geq o_l^{distribution,t} \quad (6.20)$$

$$\forall\ l \in LL, t \in T| \sum_{\substack{d \in D, q \in QT \\ |F2=vrai}} fr_{l,d}^{q,t} + +Inv_{l,q}^{t-1} \leq SCP_{out_l}{}^{t} \times o_l^{distribution,t} \quad (6.21)$$

- ***Contraintes de limite du budget d'investissement***

L'ouverture des nouvelles plateformes, l'acquisition, l'installation et la relocalisation des capacités modulaires de stockage et de personnalisation sont sujets à une limite de budget d'investissement (6.22). Nous supposons qu'un budget d'investissement est disponible pendant tout l'horizon de planification.

$$\forall t \in T| \sum_{l\in LP, a\in A, gs\in GS} s_l^{gs,t} \times OC_l^{gs,t} + \sum_{l\in LP, a\in A, gp\in GP} b_l^{gp,t} \times PSC_l^{gp,t} + \sum_{l\in LP, a\in A, gp\in GP} c_l^t \times CC_l^t + \sum_{l,l'\in LP, gp\in GP} rb_{l,l'}^{gp,t} \times MPC_{l,l'}^{PCp_{gp},t} + \sum_{l,l'\in LP, gs\in GS} rs_{l,l'}^{gs,t} \times MSC_{l,l'}^{SCp_{gs},t} \leq B \quad (6.22)$$

3.2.4. Extension du modèle

Comme explicité précédemment, les capacités de stockage et de personnalisation peuvent être échangées entres les plateformes nouvelles et anciennes. Nous avons modélisé la relocalisation de ces capacités par des arcs entre chaque paire de localisation. Ceci entraîne donc Θ (m^2) variables de relocalisation avec m le nombre de localisations candidates. Dans de nombreux cas industriels, la part du coût total de relocalisation dépendant de la distance contribue marginalement au coût total de relocalisation. Ainsi, nous proposons une modélisation alternative de la relocalisation adaptée à cette hypothèse (figure 6.10). Nous considérons que les capacités sont transférées d'abord vers un hub fictif puis redistribuées vers d'autres localisations. Ceci permet donc de réduire considérablement le nombre des variables de relocalisation qui devient Θ (m).

La figure 6.10 montre un exemple des deux modélisations, celle de gauche correspond à la relocalisation directe entre chaque pair de nœud et celle de droite la relocalisation indirecte moyennant un hub fictif.

Pour intégrer cette nouvelle alternative de relocalisation, nous remplaçons les anciennes variables de relocalisation par les variables décrites sur le tableau 6.3. Le hub fictif est considéré

implicite dans ces nouvelles variables. Ainsi, certaines contraintes du modèle (6.5 - 6.11 ; 6.14-6.16 ; 6.22) seront modifiées en utilisant les relations suivantes (6.23 - 6.26).

$$\forall gp \in GP, l \in LP, t \in T | \sum_{l' \in LP} rb_{l,l'}^{gp,t} = rb_{out_l}^{gp,t} \quad (6.23)$$

$$\forall gp \in GP, l \in LP, t \in T | \sum_{l,l' \in LP} rb_{l',l}^{gp,t} = rb_{in_l}^{gp,t} \quad (6.24)$$

$$\forall gs \in GS, l \in LP, t \in T | \sum_{l,l' \in LP} rs_{l,l'}^{gs,t} = rs_{out_l}^{gs,t} \quad (6.25)$$

$$\forall gs \in GS, l \in LP, t \in T | \sum_{l,l' \in LP} rs_{l',l}^{gs,t} = rs_{in_l}^{gs,t} \quad (6.26)$$

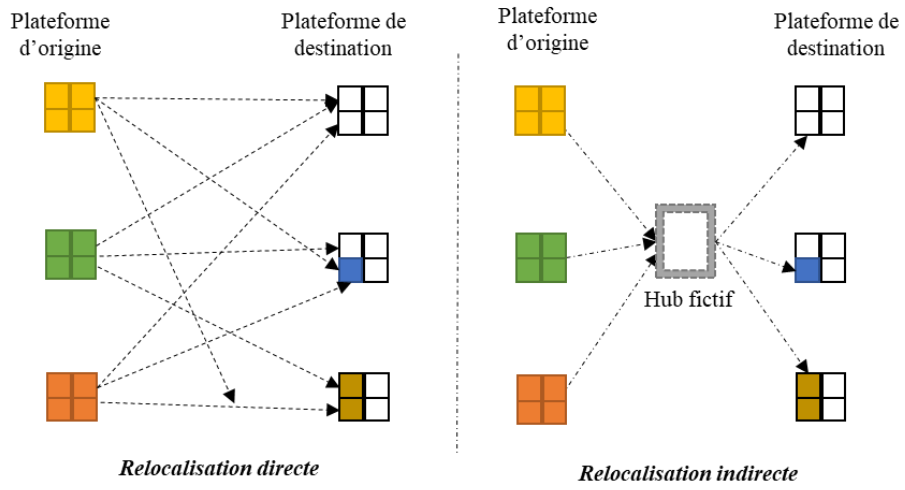

Figure 6.10 – Exemple de relocalisation des capacités directe vs indirecte

De plus nous considérons deux nouvelles contraintes (6.27, 6.28). Celles-ci concernent l'équilibre de transfert des capacités entres les plateformes. À tout moment, toutes les capacités transférées par des plateformes seront acquises par d'autres plateformes.

$$\forall gp \in GP, t \in T | \sum_{l \in LP} rb_{in_l}^{gp,t} \times PCp_{gp} = \sum_{l \in LP} rb_{out_l}^{gp,t} \times PCp_{gp} \quad (6.27)$$

$$\forall gs \in GS, t \in T | \sum_{l \in LP} rs_{in_l}^{gs,t} \times SCp_{gs} = \sum_{l \in LP} rs_{out_l}^{gs,t} \times SCp_{gs} \quad (6.28)$$

$$Coût_{stratégique_{investissement}} = \sum_{\substack{l\in LP,\\ t\in T,\\ gs\in GS,\tau\leq t}} s_l^{gs,\tau} \times OC_l^{SCp_{gs},t} + \sum_{\substack{l\in LP,\\ t\in T,\\ gp\in GP,\tau\leq t}} b_l^{gp,\tau} \times PSC_l^{PCp_{gp},t} + \sum_{\substack{l\in LP,\\ gp\in GP,t\in T}} c_l^t \times CC_l^t \quad (6.29)$$

3.2.5. Modèle de coût et critères d'optimisation

- ***Modèle de coûts***

Comme explicité dans la partie (§3.1.3) de ce chapitre, le modèle d'évaluation économique de la conception (ou de restructuration) flexible de réseaux de distribution hybrides comprend deux catégories de coûts : le coût stratégique d'investissement (6.29) et le coût opérationnel (ou d'exploitation). Ce dernier comprend des coûts récurrents, résultant de l'exploitation du réseau de distribution, notamment :

- Le coût fixe total d'exploitation des nouvelles et anciennes plateformes sur l'horizon de planification. Le coût fixe périodique unitaire varie en fonction du temps et de la capacité effectivement disponible à cette période.

$$Coût_{fixe} = \sum_{t\in T} \sum_{l\in LP, gs\in GS,\tau\leq t} s_l^{gs,\tau} \times FOC_l^{SCp_{gs},t} + \sum_{\substack{l\in LP, gs\in GS\\ l'\in LP,\tau\leq t}} rs_{l',l}^{gs,\tau} \times FOC_l^{SCp_{gs},t} - \sum_{\substack{l\in LP, gs\in GS\\ l"\in LP,\tau\leq t}} rs_{l,l"}^{gs,\tau} \times FOC_l^{SCp_{gs},t} + \sum_{l\in LP} FOCint_l^t \quad (6.30)$$

- Le coût total de possession des stocks au niveau des nouvelles et anciennes plateformes sur l'horizon de planification est fonction du stock moyen périodique et du coût unitaire de possession du stock. Ce dernier varie en fonction de la référence de la marchandise (composant ou produit fini) à stocker.

$$Coût_{possession_{stocks}} = \sum_{l\in LP, q\in QT} \frac{I_{l,q}^t + I_{l,q}^{t-1}}{2} \times IC_{l,q}^t \quad (6.31)$$

- Le coût total de manutention des nouvelles et anciennes plateformes sur l'horizon de planification est fonction des flux de marchandises réceptionnées et expédiées et du coût unitaire de manutention. Ce dernier dépend du type de conditionnement (vrac vs. conteneur de sacs) des marchandises réceptionnées ou expédiées.

$$Coût_{manutention} = \sum_{\substack{l\in LP, q\in QT,\\ o\in O, d\in D|F2=vrai}} \left(fr_{o,l}^{q,t} + fr_{l,d}^{q,t}\right) \times HC_{l,q}^{t} \tag{6.32}$$

- Le coût total de personnalisation au niveau des nouvelles et anciennes plateformes sur l'horizon de planification est fonction de la production périodique et du coût de personnalisation unitaire. Ce dernier varie en fonction de la qualité du produit finis k_p à élaborer et de la capacité de personnalisation de l'installation de configuration g_p.

$$Coût_{personnalisation} = \sum_{l\in LP, gp\in GP, kp\in KP, t\in T} P_{l}^{kp,gp,t} \times OPC_{l,PCp_{gp}}^{kp,t} \tag{6.33}$$

- Le coût total de transport routier (6.34) (respect ferroviaire (6.35) ou maritime (6.36)) en vrac et en conteneur sur l'horizon de planification est fonction des quantités de livraison et du coût unitaire de transport. Ce dernier dépend du type de conditionnement des flux de marchandises (composants ou produits finis), de la capacité des camions (respect trains ou navires) et de la distance parcourue.

$$Coût_{transport_{routier}} \tag{6.34}$$
$$= \sum_{\substack{o\in O, d\in D, t\in T\\ tr\in Tr|F2=vrai}} \sum_{\substack{n\in\{vrac\}\\ q\in Rw}} VR_{o,d}^{q,tr,t} \times TCpR_{n}^{tr} \times TCR_{o,d}^{tr,n,t}$$
$$+ \sum_{n\in\{conteneur\}} SR_{o,d}^{tr,t} \times TCpR_{n}^{tr} \times TCR_{o,d}^{tr,n,t}$$

$$Coût_{transport_{ferroviaire}} \tag{6.35}$$
$$= \sum_{\substack{o\in O, d\in D, t\in T\\ trl\in Trl|F3=vrai}} \sum_{\substack{n\in\{vrac\}\\ q\in Rw}} VF_{o,d}^{q,trl,t} \times TCpF_{n}^{trl} \times TCF_{o,d}^{trl,n}$$
$$+ \sum_{n\in\{conteneur\}} SF_{o,d}^{trl,t} \times TCpF_{n} \times N_{n}^{trl} \times TCR_{o,d}^{trl,n}$$

$$Coût_{transport_{maritime}} = \sum_{\substack{o\in O,d\in D,t\in T \\ tr\in Tr}} \sum_{\substack{n\in\{vrac] \\ q\in Rw}} VM_{o,d}^{q,ts,t} \times TCpM_n^{ts} \times TCM_{o,d}^{ts,n,t} + \sum_{n\in\{conteneur]} SM_{o,d}^{ts,t} \times TCpM_n^{ts} \times TCM_{o,d}^{ts,n,t} \quad (6.36)$$

- Le coût total d'acquisition des composants et des produits finis standards sur l'horizon de planification est fonction des quantités approvisionnées et du coût unitaire d'approvisionnement. Ce dernier dépend de la références des composants et des produits et de la localisation du fournisseur.

$$Coût_{achat_{composant}} = \sum_{\substack{s\in S,pm\in Pm \\ t\in T,q\in Rw\cup Ks}} fs_{s,pm}^{q,t} \times PC_{q,s}^{t} \quad (6.37)$$

- Le coût total de relocalisation des capacités de stockage et de personnalisation varie en fonction de la capacité relocalisée et peut dépendre de la distance parcourue selon que la relocalisation est supposée directe (6.38) ou indirecte (6.39).

$$Coût_{relocalisation_{capacité}} = \sum_{\substack{l,l'\in LP,gs\in GS \\ t\in T}} rs_{l,l'}^{gs,t} \times MSC_{l,l'}^{SCp_{gs},t} + \sum_{\substack{l,l'\in LP,gs\in GS \\ t\in T}} rb_{l,l'}^{gp,t} \times MPC_{l,l'}^{PCp_{gp},t} \quad (6.38)$$

$$Coût_{relocalisation_{capacité}} = \sum_{\substack{l\in LP,gs\in GS \\ t\in T}} rs_{l}^{gs,t} \times MSC_{l}^{SCp_{gs},t} + \sum_{\substack{l,l'\in LP,gs\in GS \\ t\in T}} rb_{l}^{gp,t} \times MPC_{l}^{PCp_{gp},t} \quad (6.39)$$

Tableau 6.3 – Les nouvelles variables de relocalisation des capacités

Variable	Description
$rs_{in_l}^{gs,t}$	1 si une capacité modulaire ayant la configuration $gs \in GS$ est transférée vers une plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début de la période $t \in T$de, 0 sinon
$rs_{out_l}^{gs,t}$	1 si une capacité modulaire ayant la configuration $gs \in GS$ est transférée depuis une plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début de la période $t \in T$, 0 sinon
$rb_{in_l}^{gp,t}$	1 si une capacité modulaire de personnalisation ayant la configuration $gp \in GP$ est transférée vers une plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début de la période $t \in T$, 0 sinon
$rb_{out_l}^{gp,t}$	1 si une capacité modulaire de personnalisation ayant la configuration $gp \in GP$ est transférée vers une plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début de la période $t \in T$, 0 sinon

Tableau 6.4 – Les coûts stratégiques unitaires

Symbole	Description
$OC_l^{SCp_{gs},t}$	Coût fixe unitaire (\$/module) d'acquisition et d'installation de la capacité de stockage modulaire SCp_{gs} au niveau d'une nouvelle plateforme située à la localisation $l \in LP$au début de la période $t \in T$
$PSC_l^{PCp_{gp},t}$	Coût fixe d'acquisition unitaire (\$/module) et d'installation de la capacité de personnalisation modulaire PCp_{gp} au niveau d'une nouvelle plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début de la période $t \in T$
CC_l^t	Coût de fermeture d'une plateforme localisée à $l \in LP$ au début de la période $t \in T$

- ***Critères d'optimisation***

Comme explicité au niveau du chapitre 5, le futur réseau de distribution hybride devra être à la fois économiquement efficient (i.e. générant de faibles coûts d'exploitation et profitant le mieux possible des économies d'échelle d'investissement), assurant une meilleure proximité et disponibilité des produits aux marchés locaux pendant les périodes de consommation et préserve la qualité des produits durant la distribution finale (i.e. minimisant la distance entre les nouvelles plateformes de personnalisation et les marchés). Ces exigences peuvent être modélisées par trois fonctions objectifs (6.40 - 6.42).

$$Max\ f_1 = Co\hat{u}t_{operationnel_{total}} + Co\hat{u}t_{stratégique_{investissement}} \tag{6.40}$$

$$\forall z_T \in Z_T \mid Min\ f_2 = \sum_{ln \in LPn} Dist_{l_n,z_T} \times y_{ln,z_T} \times \sum_{\tau \le t, a \in \{distribution, personnalisation\}} o_l^{a,\tau} \tag{6.41}$$

$$\forall l_n \in LPn, d \in D, t \in T \mid Min\ f_3 = Dist_{l_n,z_T} \times y_{ln,d} \times \sum_{\tau \leq t} o_l^{personnalisation,\tau} \quad (6.42)$$

Tableau 6.5 – Les coûts opérationnels unitaires

Symbole	Description
$\boldsymbol{PC_{q,s}^{t}}$	Coût variable unitaire ($/tonnes) d'acquisition d'un composant ou d'un produit standard de la référence $q \in Rw \cup Ks$ depuis le fournisseur $s \in S$.
$\boldsymbol{FOC_{l}^{SCp_{gs},t}}$	Coût fixe ($) d'exploitation d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$ ayant la configuration de capacité de stockage SCp_{gs} au début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{FOCint_{l}^{t}}$	Coût fixe ($) d'exploitation de la capacité de stockage modulaire ayant la configuration $gs \in GS$, installée au niveau d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$, durant la période $t \in T$
$\boldsymbol{OPC_{l,PCp_{gp}}^{kp,t}}$	Coût variable unitaire ($/tonnes) de production de la référence $kp \in Kp$ par l'unité de personnalisation ayant la capacité PCp_{gp} au niveau d'une plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début la période $t \in T$
$\boldsymbol{IC_{l,q}^{t}}$	Coût variable unitaire ($/tonnes) de possession de stock d'un composant ou d'un produit finis de la référence $q \in QT$ au niveau de la plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{HC_{l,q}^{t}}$	Coût variable unitaire ($/tonnes) de manutention d'un composant ou d'un produit finis de la référence $q \in QT$ au niveau de la plateforme située à la localisation $l \in LP$ au début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{TCR_{o,d}^{tr,n,t}}$	Coût variable unitaire de transport depuis le nœud d'origine $o \in LP \cup P \cup S$ vers le nœud de destination $d \in LP \cup ZT$ moyennant un camion de type $t \in Tr$ au début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{TCF_{o,d}^{trl,n}}$	Coût variable unitaire ($/tonnes) de transport depuis le nœud d'origine $o \in P \cup S$ vers le nœud de destination $d \in Ps$ moyennant un train de type $t \in Trl$ au début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{TCM_{o,d}^{ts,n,t}}$	Coût variable unitaire ($/tonnes) de transport depuis le nœud d'origine $o \in S$ vers le nœud de destination $d \in Pm$ moyennant un navire de type $ts \in Ts$ au début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{MSC_{l,l'}^{gs,t}}$	Coût fixe ($) de relocalisation et transfert d'une capacité modulaire de stockage $gs \in GS$ depuis une plateforme située à la localisation $l \in LP$ vers une autre plateforme située à la localisation $l' \in LP$ au début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{MPC_{l,l'}^{gp,t}}$	Coût fixe ($) de relocalisation et transfert d'une capacité modulaire de personnalisation ayant la configuration $gp \in Gp$ depuis la plateforme située à la localisation $l \in LP$ vers une autre plateforme localisée à $l' \in LP$ au début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{MSC_{l}^{SCp_{gs},t}}$	Coût fixe ($) de relocalisation et transfert d'une capacité modulaire de stockage SCp_{gs} vers une plateforme située à la localisation $l \in LP$ en début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{MPC_{l}^{PCp_{gp},}}$	Coût fixe ($) de relocalisation et transfert d'une capacité modulaire de personnalisation PCp_{gp}vers une plateforme située à la localisation $l \in LP$ en début de la période $t \in T$
$\boldsymbol{Out_{l}^{t}}$	Coût unitaire ($/tonnes) de location de la plateforme située à la localisation $l \in LL$

4. Résolution du problème sous-incertitude : Approche de planification robuste à horizon glissant

Dans la section précédente (§3), nous avons présenté notre modélisation déterministe du problème de la conception flexible de réseaux de distribution hybrides. Celle-ci suppose que les caractéristiques des réseaux ainsi que les coûts sous-jacents sont déterministes. Or, le contexte africain, sujet de notre étude, est entaché de plusieurs sources d'incertitude, principalement au niveau des coûts de conception et d'exploitation des futurs réseaux et au niveau de la dynamique de la demande des marchés, en raison de manque de visibilité sur l'évolution des conditions des marchés et de distribution. Cette partie s'intéressera donc à la résolution de ce problème sous incertitude, en se basant sur une mesure de robustesse.

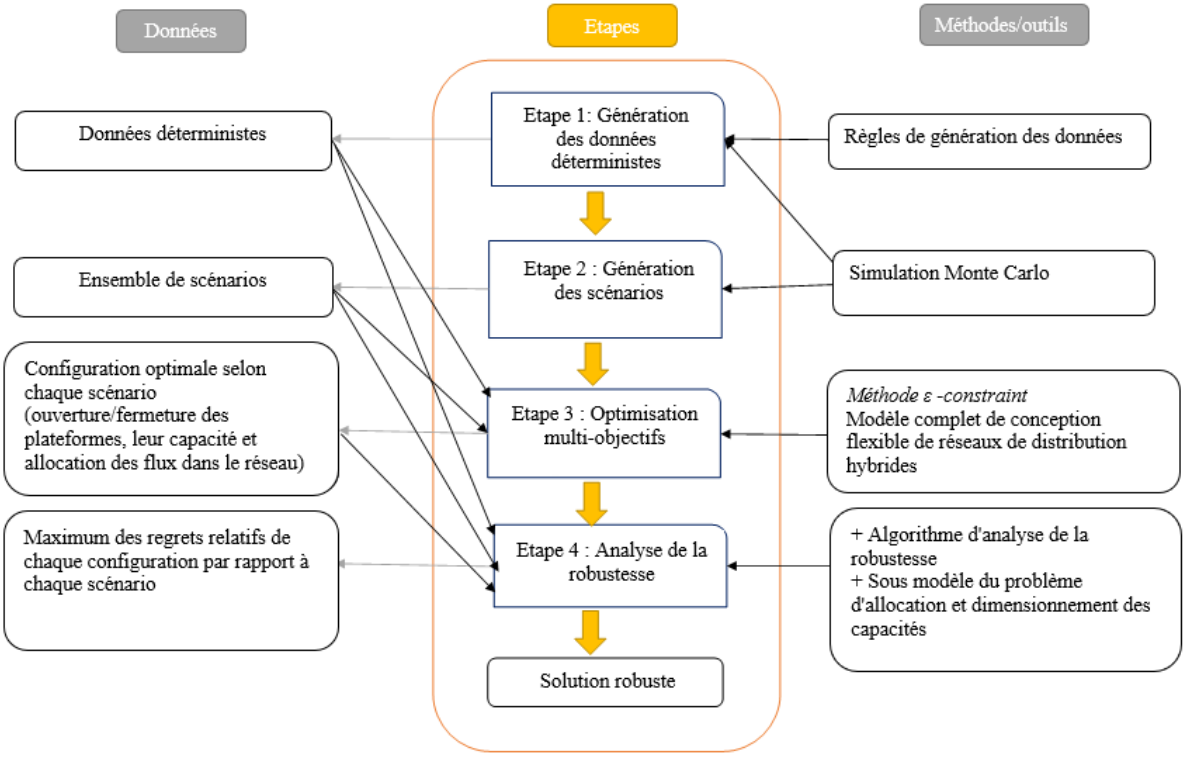

Figure 6.11 – Approche de planification robuste à une itération

En planification robuste et en ce qui nous concerne, l'incertitude sur les données est prise en compte par la génération d'un ensemble discret de scénarios permettant d'évaluer le comportement du système sous des sollicitations différentes. Compte tenu de la forte volatilité des marchés, les scénarios discrets utilisés pour une planification robuste deviennent moins probables avec le temps. Nous devrions donc les mettre à jour régulièrement. La planification

robuste s'effectuera ainsi avec un horizon glissant. Cela permettra une mise à jour périodique des décisions d'investissement en dehors de l'horizon gelé (dont la longueur est inférieure à l'horizon de planification et pendant lequel la demande est bien connue et les décisions sous-jacentes doivent être mises en œuvre). L'approche robuste de planification à horizon glissant commence par l'initialisation des données du réseau (niveaux de stocks, configuration optimale robuste), puis, à chaque itération, nous effectuons une optimisation robuste selon l'algorithme décrit dans les figures 6.11 et 6.12. Ensuite, nous réalisons les investissements relatifs à cette itération puis nous réinitialisons l'état du réseau pour amorcer l'itération suivante.

4.1. Etape 1 : Initialisation des données du problème durant le i^{ème} horizon de planification

Avant toute résolution du problème, il faut tout d'abord élaborer un jeu de données fiables. Pour des raisons de confidentialité, il est impossible de divulguer les données réelles de notre partenaire industriel. Nous proposons donc des règles génériques de génération de données réalistes pour la conception de réseaux de distribution hybrides. Par exemple, les coûts d'acquisition traduiront des économies d'échelle comme dans la réalité, mais pas avec le même taux.

Les données générées concernent principalement les coûts unitaires de conception et d'exploitation des plateformes et les demandes périodiques des marchés locaux. A chaque nouvelle période, ces paramètres peuvent augmenter ou diminuer avec un rapport d'évolution par rapport à la période précédente. Nous allons reprendre les définitions des paramètres explicitées dans la section §4.1 du chapitre 5 pour les adapter au contexte dynamique étudié. Les autres paramètres (capacité de stockage, capacité transport, capacité de transit, capacité de production) peuvent être facilement générés suivant une loi uniforme, connaissant leurs valeurs minimales et maximales.

- **Coûts fixes d'investissement en nouvelles capacités de stockage et de personnalisation**

Comme explicité dans la partie 3.2.4, les coûts d'investissement en capacité de stockage et de personnalisation varient en fonction du temps, des capacités à installer et des localisations des plateformes. A la première période, le coût fixe d'installation d'une capacité modulaire de stockage SCp_{gs} (6.43) (respectivement la capacité de personnalisation modulaire PCp_{gp} (6.44))

peut être déduit du coût fixe d'installation d'une capacité de stockage référence SCp_{gs_0} (respectivement de la capacité de personnalisation de référence PCp_{gp_0}) moyennant un taux d'économie d'échelle β défini comme suit :

$$\forall gs \in GS, l \in LP | OC_l^{SCp_{gs},1} = OC_l^{SCp_{gs_0},1} \times (\frac{SCp_{gs}}{SCp_{gs_0}})^{\beta} \quad (6.43)$$

$$\forall gp \in GP, l \in LP | PSC_l^{PCp_{gp},1} = PSC_l^{PCp_{gp_0},1} \times (\frac{PCp_{gp}}{PCp_{gp_0}})^{\beta} \quad (6.44)$$

Avec :

$OC_l^{SCp_{gs_0},1} \sim \mathrm{U}\left[Min_{l \in LP}(OC_l^{SCp_{gs_0},1}), Max_{l \in LP}(OC_l^{SCp_{gs_0},1})\right]$

$PSC_l^{PCp_{gp_0},1} \sim U[Min_{l \in LP}(PSC_l^{PCp_{gp_0},1}), Max_{l \in LP}(PSC_l^{PCp_{gp_0},1})]$

Le coût fixe d'investissement en capacité de stockage (6.45) et de personnalisation (6.46) correspondant aux périodes ultérieures peut être généré comme suit :

$$\forall gs \in GS, l \in LP, t > 1 | OC_l^{SCp_{gs},t} = OC_l^{SCp_{gs_0},1} \times \alpha_t \quad (6.45)$$

$$\forall gp \in GP, l \in LP, t > 1 | PSC_l^{PCp_{gp},t} = PSC_l^{PCp_{gp_0},1} \times \xi_t \quad (6.46)$$

Avec :

α_t et ξ_t : taux d'évolution

$\alpha_t \sim U[Min_{t \in T}(\alpha_t), Max_{t \in T}(\alpha_t)]$

$\xi_t \sim U[Min_{t \in T}(\xi_t), Max_{t \in T}(\xi_t)]$

- **Coûts fixes d'exploitation des plateformes**

De même, le coût fixe d'exploitation d'une plateforme disposant d'une capacité de stockage modulaire SCp_{gs} pendant une période peut être déduit du coût fixe unitaire d'installation d'une capacité de référence SCp_{gs_0} moyennant un coefficient d'économie d'échelle β<1, comme suit :

$$\forall gs \in GS, l \in LP | FOC_l^{SCp_{gs},1} = FOC_l^{SCp_{gs_0},1} \times (\frac{SCp_{gs}}{SCp_{gs_0}})^{\beta} \quad (6.47)$$

$$\forall gs \in GS, l \in LP, t > 1 | FOC_l^{SCp_{gs,t}} = FOC_l^{SCp_{gs_0,1}} \times \chi_t \quad (6.48)$$

Avec :

χ_t : Taux d'évolution ; $\chi_t \sim U[Min_{t\in T}(\chi_t), Max_{t\in T}(\chi_t)]$

$FOC_l^{SCp_{gs_0,1}}$: Coût de référence

$FOC_l^{SCp_{gs_0,1}} \sim U[Min_{l\in LP}(FOC_l^{SCp_{gs_0,1}}), Max_{l\in LP}(FOC_l^{SCp_{gs_0,1}})]$

- **Coûts variables unitaires périodiques d'exploitation des plateformes**

Ces coûts concernent principalement les coûts variables unitaires de personnalisation, de manutention et de stockage :

- Le coût variable unitaire périodique de personnalisation varie en fonction du temps, de la référence du produit fini *kp* à élaborer, de la capacité de personnalisation de configuration g_p et de la main d'œuvre, donc de la localisation de la plateforme localisée à *l*. Notons que plus la capacité d'une installation est importante, plus le coût unitaire de personnalisation décroit. Pour traduire cela, le coût variable unitaire périodique de personnalisation peut être calculé comme suit :

$$\forall gp \in GP, kp \in KP, l \in LP | OPC_{l,PCp_{gp}}^{kp,1} = OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp,1} \times \left(\frac{PCp_{gp}}{PCp_{gp_0}}\right)^{\beta} \quad (6.49)$$

$$\forall gp \in GP, kp \in KP, l \in LP, t > 1 | OPC_{l,PCp_{gp}}^{kp,t} = OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp,1} \times \kappa_t \quad (6.50)$$

Avec :

κ_t : taux d'évolution, ; $\kappa_t \sim U[Min_{t\in T}(\kappa_t), Max_{t\in T}(\kappa_t)]$

$OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp,1}$: Coût unitaire de personnalisation de référence

$OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp,1} \sim U[Min_{l\in LP}(OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp,1}), Max_{l\in LP}(OPC_{l,PCp_{gp_0}}^{kp,1})]$

- Le coût variable unitaire périodique de manutention varie en fonction du temps, du type de conditionnement (en vrac ou en conteneur « *cont* »), de la marchandise réceptionnée ou expédiée et de la localisation de la plateforme localisée à *l*. Notons que la manutention des flux en vrac coûte plus cher que la manutention des flux en conteneur car par nature, les flux en vrac nécessitent des équipements pour pousser les matières

vers les zones de stockage (convoyeurs, chariots verseur, etc.). Ainsi, les coûts variables unitaires périodiques de manutention en vrac et en conteneur s'expriment comme suit :

$$\forall l \in LP, t > 1 |\ HC_l^{vrac,t} = HC_l^{vrac,1} \times \delta_{vrac,t} \quad (6.51)$$

$$\forall l \in LP, t > 1 |\ HC_l^{cont,t} = HC_l^{cont,1} \times \delta_{cont,t} \quad (6.52)$$

Avec :

$\delta_{cont,t}$ et $\delta_{vrac,t}$: taux d'évolution

$\delta_{cont,t} \sim U[Min_{t\in T}(\delta_{cont,t}), Max_{t\in T}(\delta_{cont,t})]$

$\delta_{vrac,t} \sim U[Min_{t\in T}(\delta_{vrac,t}), Max_{t\in T}(\delta_{vrac,t})]$

$HC_l^{vrac,1} \sim U[Min_{l\in LP}(HC_l^{vrac,1}), Max_{l\in LP}(HC_l^{vrac,1})]$

$HC_l^{cont,1} \sim U[Min_{l\in LP}(HC_l^{cont,1}), Max_{l\in LP}(HC_l^{cont,1})]$

- Le coût unitaire périodique de location des plateformes externes varie en fonction du temps, de la capacité de stockage à louer (plus elle est importante, plus le coût de location baisse) et finalement de la localisation de la plateforme, i.e. de la proximité au port (plus nous nous rapprochons du port, plus le coût de location devient important). Le coût unitaire périodique de location d'une plateforme externe correspond à :

$$\forall ll \in LPl, t > 1 |\ Out_{ll}^t = Out_{ll}^1 \times \rho_t \quad (6.53)$$

$$Out_{ll}^1 \sim U[Min_{ll\in LPl}(Out_{ll}^1), Max_{ll\in LPl}(Out_{ll}^1)] \quad (6.54)$$

Avec :

ρ_t : Taux d'évolution

$\rho_t \sim U[Min_{t\in T}(\rho_t), Max_{t\in T}(\rho_t)]$

Coûts variables unitaires périodiques de relocalisation des capacités

Les coûts variables unitaires périodiques de relocalisation des capacités de stockage et de personnalisation comprennent les frais de transport et d'installation. Ils varient en fonction du temps et de la capacité à relocaliser. Ils peuvent également dépendre ou non de la distance parcourue. Pour des raisons de simplification, nous supposons que ces coûts sont indépendants

de la distance et qu'un coût forfaitaire est considéré entre chaque nœud d'origine et de destination. Ainsi, ces coûts s'expriment comme suit :

$$\forall l, l' \in LPl, gs \in GS, t > 1 |\ MSC_{l,l'}^{SCp_{gs},t} = MSC_{l,l'}^{SCp_{gs}0,1} \times (\frac{SCp_{gs}}{SCp_{gs0}})^{\beta} \times \lambda_{1,t} \quad (6.55)$$

$$\forall l, l' \in LPl, gp \in GP, t > 1 |\ MSC_{l,l'}^{PCp_{gp},t} = MSC_{l,l'}^{PCp_{gp}0,1} \times (\frac{PCp_{gp}}{PCp_{gp0}})^{\beta} \times \lambda_{2,t} \quad (6.56)$$

Avec :

$\lambda_{1,t}$ et $\lambda_{2,t}$: taux d'évolution ; $\lambda_{i,t} \sim U[Min_{t\in T}(\lambda_{i,t}\ ), Max_{t\in T}(\lambda_{i,t}\ )]$

$MSC_{l,l'}^{SCp_{gs}0,1}$ et $MSC_{l,l'}^{PCp_{gp}0,1}$: Coût de relocalisation d'une capacité de références respectivement de stockage et de personnalisation

$MSC_{l,l'}^{SCp_{gs}0,1} \sim U[Min_{l,l'\in LP}(MSC_{l,l'}^{SCp_{gs}0,1}), Max_{l,l'\in LP}(MSC_{l,l'}^{SCp_{gs}0,1})]$

$MSC_{l,l'}^{PCp_{gp}0,1} \sim U[Min_{l,l'\in LP}(MSC_{l,l'}^{PCp_{gp}0,1}), Max_{l,l'\in LP}(MSC_{l,l'}^{PCp_{gp}0,1})]$

- **Coûts variables unitaires périodiques de transport**

Les coûts variables unitaires périodiques de transport routier (6.57), ferroviaire (6.58) et maritime (6.59), varient en fonction du temps, de la distance parcourue, de la capacité des véhicules (véhicules hétérogènes) et du type de conditionnement des flux de marchandises (en vrac ou en conteneur). Notons que, par effet d'économie d'échelle, plus la capacité de transport est importante, plus le coût unitaire périodique de transport sera faible. Ces coûts correspondent à :

$$\forall o \in O, d \in D, n \in N, tr \in Tr, t > 1 |$$

$$TCR_{o,d}^{tr,n,t} = TCR_{o,d}^{tr0,n,1} \times (\frac{TCpR_n^{tr}}{TCpR_n^{tr0}})^{\beta} \times \varphi_{1,t} \quad (6.57)$$

$$\forall o \in S \cup P, d \in Ps, n \in N, trl \in Trl, t > 1 | \quad (6.58)$$

$$TCF_{o,d}^{trl,n,t} = TCF_{o,d}^{trl0,n,1} \times (\frac{Nb^{tr}}{Nb^{trl0}})^{\beta} \times \varphi_{2,t}$$

$$\forall o \in S, d \in Pm, n \in N, ts \in Ts, t > 1 | \quad (6.59)$$

$$TCM_{o,d}^{ts,n,t} = TCM_{o,d}^{ts0,n,1} \times (\frac{TCpM_n^{ts}}{TCpM_n^{ts0}})^{\beta} \times \varphi_{3,t}$$

Avec :

$\forall i \in \{1,2,3\}\ \varphi_{i,t}$: taux d'évolution ; $\varphi_{i,t} \sim U[Min_{t\in T}(\varphi_{i,t}), Max_{t\in T}(\varphi_{i,t})]$

$TCR_{o,d}^{tr0,n,1} \sim U[Min_{o\in O,d\in D}(TCR_{o,d}^{tr0,n,1}), Max_{o\in O,d\in D}(TCR_{o,d}^{tr0,n,1})]$

$TCF_{o,d}^{trl0,n,1} \sim U[Min_{o\in S\cup P,d\in Ps}(TCF_{o,d}^{trl0,n,1}), Max_{o\in S\cup P,d\in Ps}(TCF_{o,d}^{tr0,n,1})]$

$TCM_{o,d}^{ts0,n,1} \sim U[Min_{o\in S,d\in Pm}(TCM_{o,d}^{ts0,n,1}), Max_{o\in S,d\in Pm}(TCM_{o,d}^{ts0,n,1})]$

- **Demande périodique déterministe d'un marché local**

La demande d'un marché local par rapport à une référence de produit subit des variations saisonnières au cours d'une même période (par exemple : année). A la 1ère période, cette demande peut être générée comme suit : connaissant la demande prévisionnelle globale (i.e. de tous les marchés) par rapport à une référence de produit D_k, nous déduirons la demande prévisionnelle de chaque marché local durant une période moyennant un taux $w_{z_T}^{k,t}$ suivant cette relation : $d_{z_T}^{k,t} = D_k \times w_{z_T}^{k,t}$. Ce taux représente la part de la demande d'un marché local z_T par rapport à la demande globale d'un produit de qualité k pendant une période. Cette part varie suivant la loi de distribution uniforme $U[Min_{z_T\in ZT}(w_{z_T}^{k_0,t_0}) \times \vartheta_k \times \gamma_t ; Max_{z_T\in ZT}(w_{z_T}^{k_0,t_0}) \times \vartheta_k \times \gamma_t)$ avec ϑ_k varie en fonction des produits finis suivant la loi uniforme $U[Min_{k\in K}(\vartheta_k) ; Max_{k\in K}(\vartheta_k)$ et γ_t qui représente un taux qui varie en fonction de la sous-période *y* selon la loi de distribution uniforme $U[Min_{t\in T}(\gamma_t) ; Max_{t\in T}(\gamma_t)$.

La demande des périodes qui suivent la première période peut être déduite de la relation (6.60) comme suit :

$$\forall z_T \in ZT, k \in K, t > 1 |\ d_{z_T}^{k,t} = d_{z_T}^{k,t+12} \times \tau_t \qquad (6.60)$$

Avec :

τ_t : taux d'évolution déterministe suivant la loi uniforme
$U[Min_{t\in T}(\tau_t) ; Max_{t\in T}(\tau_t)$.

Génération de scénarios de la demande

Ces scénarios peuvent être discrets ou continus (en précisant un intervalle dans lequel le paramètre peut prendre n'importe quelle valeur). En ce qui nous concerne, nous allons nous focaliser sur la génération de scénarios discrets traduisant une évolution incertaine des paramètres du problème. Pour ce faire, nous allons nous appuyer sur la simulation Monte Carlo et sur les règles décrites dans l'étape précédente. Plus précisément, pour chaque paramètre incertain, nous générons des instances de son taux d'évolution suivant la loi de distribution normale. A titre d'illustration, l'ensemble des scénarios d'évolution de la demande périodique d'un marché local par rapport à un produit donné peut être généré comme suit :

$$\forall z_T \in ZT, k \in K, t > 1 |\ d_{z_T}^{k,t} = d_{z_T}^{k,t+12} \times \tau_{t,\varepsilon} \tag{6.61}$$

Avec :

$\tau_{t,\varepsilon}$: taux d'évolution incertain correspondant au scénario ε suivant la loi uniforme $U[Min_{t \in T}(\tau_t) \times \theta_\varepsilon ; Max_{t \in T}(\tau_t) \times \theta_\varepsilon)$ tel que $\theta_\varepsilon \sim N(\mu_\varepsilon, \sigma_\varepsilon)$

4.2. Etape 2 : Optimisation déterministe du problème sur le i^{ème} horizon de planification

Ensuite, nous résolvons le problème de conception flexible de réseaux de distribution hybrides sur un ensemble de scénarios traduisant l'incertitude sur les paramètres. Pour ce faire nous nous appuyons sur la méthode *ε-constraint* et sa proposition d'optimisation lexicographique en intégrant de nouvelle contrainte (6.62, 6.63), comme explicité dans la partie §4 du chapitre 5.

$$\forall z_T \in Z_T \mid f_2 = \sum_{ln \in LPn} Dist(ln, z_T) \times y_{ln,z_T} \leq D_{z_T}^{max} \times \sum_{\substack{\tau \leq t, a \in \{distribution \\ personnalisation\}}} o_l^{a,\tau} \tag{6.62}$$

$$\forall l_n \in LPn, d \in D, t \in T \mid f_3 = Dist(ln, d) \times y_{ln,d} \leq D_{CP}^{max} \times \sum_{\tau \leq t} o_l^{personnalisation,\tau} \tag{6.63}$$

Algorithm 1 Robust planning approach with a rolling horizon

Initialization
$i \leftarrow 1, s \leftarrow 0, mR \leftarrow +\infty, N \leftarrow Patterns, PHi \leftarrow T$
$SCpI_l, PCpI_l \leftarrow Parameters$
Step 1: Data Generation within PHi
Step 2: Flexible Design/Re-Design Opitmization within PHi
for k = 1 N **do**
  $RR_k \leftarrow -\infty$
  if $i = 1$ **then** Solve Flexible Design problem using epsilon-Constraint
  else
    Solve Flexible Re-design problem using epsilon-Constraint
  end if
  Save the solution as Config(k)
end for
Step 3: Robust analysis of optimal solutions within PHi
  for k = 1 N **do**
    for j = 1 N **do**
      Solve Allocation and Capacity sizing problem under **Config(k)**
      Save Optimal Cost as **Cost(k,j)**
      Compute Relative Regret of the Config(k) over the demand evolution scenario j as follows :
      RRegret(Config(k)) = Cost(k,k)/Cost(k,j)-1
      if $RRegret(Config(k)) \geq RR_k$ **then**
        $RR_k \leftarrow RRegret((Config(k))$
      end if
      Return RR_k
    end for
      if $RR_k \leq mR$ **then**
        $mR \leftarrow RR_k, j \leftarrow k$
      end if
    end for
    Return mR as Minimal Regret
    Return Config(s) as Robust Distribution Network Configuration

Step 4: Reset the distribution network at the end of FHi, Set $i \leftarrow i + 1$ and return to **Step 1**

Figure 6.12 – Algorithme de planification robuste à horizon glissant

4.3. Etape 3 : Analyse de la robustesse

A l'issu des optimisations, nous obtenons des configurations optimales associées à chacun des scénarios de la demande. Dans cette phase, nous allons mesurer la robustesse de chaque configuration candidate par rapport à la variation de la demande en utilisant le critère du regret minimal relatif. Ce dernier peut être défini comme l'impression de perte ressentie par un

décideur après avoir appris qu'une autre solution (ou décision) aurait été préférable à celle sélectionnée.

Pour chaque configuration optimale, nous résolvons le sous-problème d'ajustement des capacités et de l'allocation des flux par rapport à chaque scénario. Ensuite, nous calculons la différence relative entre le coût optimal d'ajustement du réseau sous cette configuration optimale selon un scénario donné et le coût optimal d'ajustement du réseau sous cette même configuration mais par rapport au scénario sous-jacent à cette configuration.

Après avoir passé en revue tous les scénarios, nous déduisons le regret maximal de cette configuration par rapport à la variation de la demande. Nous répétons cette analyse pour toutes les configurations optimales candidates. La configuration robuste correspond donc à celle dont le regret relatif maximal est le plus faible.

4.4. Etape 4 : Réinitialisation du réseau

Après avoir identifié la configuration robuste à cette $i^{ème}$ itération, nous réalisons les investissements correspondants à la configuration robuste pour les périodes incluses dans l'horizon gelé.

A la fin cet horizon, nous réinitialisons la configuration du réseau à savoir (niveau des stocks et des capacités) afin d'effectuer une restructuration du réseau durant le prochain horizon de planification à la $(i+1)^{-ème}$ itération, auquel cas nous rebouclons sur la génération des nouveaux scénarios et données du problème durant le prochain horizon de planification en revenant à l'étape 1.

5. Etude de cas

Cette étude de cas a été élaborée avec notre deuxième partenaire industriel pour tester et valider la méthodologie de planification suggérée sur un exemple fictif mais réaliste de conception d'un réseau de distribution et de *blending* d'engrais en Côte d'IVoire (CIV) (§5.1). De plus, nous allons analyser les gains économiques escomptés de l'introduction des degrés de flexibilité dans la conception de ce réseau.

La Côte d'ivoire se dote en effet d'un potentiel de développement agricole très prometteur à terme. L'agriculture ivoirienne est très diversifiée (figures 6.13 et 6.14), nécessitant ainsi des

engrais spécifiques à la nature des sols et des cultures agricoles. Les données présentées ici ne seront toutefois pas les données réelles, mais ont été générées selon les principes donnés ci-dessus.

La consommation d'engrais est sujette à une dynamique à court et à long terme, en fonction :

- **des fluctuations saisonnières**. Il y a deux saisons des pluies communes à toutes les zones agricoles : une longue de Mars à Juillet, pendant laquelle les ventes locales prévues représentent 95 % des ventes totales, réparties équitablement sur les cinq mois, et une courte d'Octobre à Novembre représentant 5 % des ventes locales prévues.
- **de la croissance du marché.** Le marché a un potentiel de développement très prometteur puisque le taux actuel d'application d'engrais (50 kg/ha) reste très inférieur au taux moyen recommandé (200 kg/ha).

Le futur réseau devra desservir efficacement les marchés locaux de la Côte d'Ivoire en vue de décupler les ventes dans les dix prochaines années.

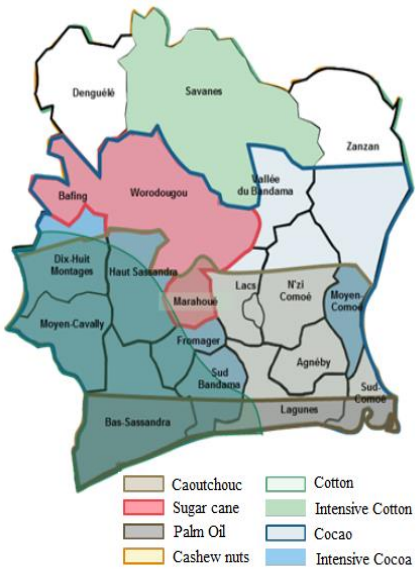

Figure 6.13 – Distribution géographique des cultures de rente[18]

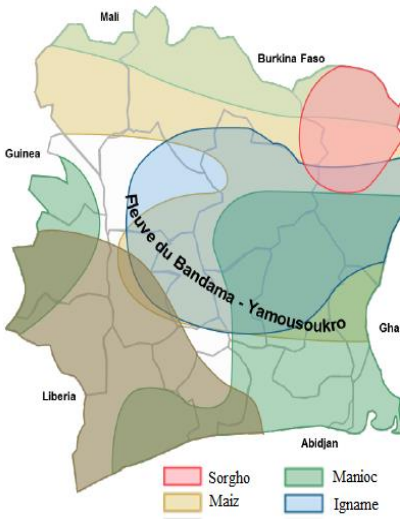

Figure 6.14 – Distribution géographique des cultures vivrières

[18] Dosso M. (2015). « *Etude sur la consommation d'engrais par culture en Côte d'Ivoire* », Rapport de Africa Fertlizer (08/2015)

5.1. Illustration de l'approche de planification robuste

Dans ce qui suit, nous allons illustrer l'approche de planification robuste comme expliquée dans la sous-section §4.1.

5.1.1. Etape 1 : Génération des données déterministes

Nous supposons qu'il y a cinq localisations potentielles pour installer les nouvelles plateformes de distribution et du *blending* (le nombre optimal doit être déterminé) (figure 6.15). Le futur réseau de distribution et *blending* devrait desservir, au cours des cinq prochaines années, dix marchés locaux où opèrent les principaux grossistes (figure 6.15). Sur la base des règles décrites dans §4.1.1, nous avons généré les paramètres logistiques et les coûts (tableau 6.6).

Figure 6.15 – Localisation des plateformes et des marchés

5.1.2. Etape 2 : Génération des scénarios d'évolution de la demande d'engrais

La demande ivoirienne d'engrais prévue pour les cinq prochaines années est générée de manière à refléter l'évolution saisonnière et l'incertitude de la demande. Tout d'abord, nous générons la demande mensuelle de chaque marché local pour chaque référence d'engrais au cours de la première année $\forall t \in [1,12] \,|\, d_{z_T}^{k,t} = D_k \times \omega_{z_T}^{k,t}$. Pour ce faire, nous avons tout d'abord généré la demande globale d'engrais la première année D_k suivant la loi uniforme U[10500 ; 40000],

ensuite, nous déduisons la demande mensuelle de chaque marché local par rapport à chaque référence d'engrais moyennant une part de marché mensuelle $\omega_{z_T}^{k,t} = \mathrm{U}[0.8\times\nu_k\times\gamma_t; 2\times\nu_k\times\gamma_t]$ avec ν_k qui varie en fonction des qualités d'engrais selon la loi uniforme $\nu_k = \mathrm{U}[0.5;1.5]$ et γ_t qui varie en fonction des saisonnalités : il correspond ici à $\forall t \in [1,3]\cup[8,12] \mid \gamma_t = 2\%$ pendant la courte saison et à $\forall t \in [4,7] \mid \gamma_t = 15\%$ pendant la longue saison. Enfin, cette demande devra augmenter au cours des quatre années suivantes avec un taux d'évolution incertain qui suit une distribution normale N (70% ; 65%) (tableau 6.7). Notons qu'à des fins d'illustration, nous ne sélectionnons que cinq scénarios d'évolution. La figure 6.16 montre la demande globale annuelle liée à chaque scénario d'évolution de la demande d'engrais.

Tableau 6.6 – Paramètres logistiques et de coûts à la première année

Installation de blending	
Capacité de *blending* de référence (tonnes/an)	252000
Coût d'investissement en capacité de blending de référence ($)	700000
Coût unitaire de *blending* ($/tonnes)	30
Installation de stockage	
Capacité de stockage de référence (tonnes)	20000
Coût d'investissement en capacité de stockage de référence ($)	U [1000000 ; 4000000]
Coût fixe d'exploitation des installations de stockage ($/année)	1% du coût d'investissement
Coût de manutention du vrac ($/tonnes)	U [10 ; 20]
Coût de manutention des conteneurs ($/conteneur)	U [5 ; 10]
Transport et distribution	
Coût de transport unitaire en vrac ($/tons/km) pour un camion de 30 tonnes	1
Coût de transport unitaire en conteneur ($/tonnes/km) pour un camion de 30 tonnes	1
Coût unitaire de transport maritime en vrac ($/tonnes)	U [30 ; 50]
Coût unitaire de transport maritime en conteneur ($/conteneur)	U [1000 ; 5000]
Capacités	
Capacités de stockage modulaires (tonnes)	U [1000 ; 10000000]
Capacités de *blending* modulaires (tonnes/heure)	{50 ; 80 ; 100 ; 200}
Capacité de location externes des espaces de stockage (tonnes)	U [10000 ; 20000]
Capacités de stockage des grossistes (tonnes)	U [10000 ; 50000]

5.1.3. Etape 3 : Optimisation du problème complet

Dans cette phase, nous résolvons le problème de conception du futur réseau de distribution et de *blending* d'engrais sous chaque scénario d'évolution de la demande (figure 6.16). La figure 6.17 met en évidence les coûts d'exploitation et de conception du réseau correspondant à la configuration optimale. Ces résultats, obtenus avec des données réalistes sinon réelles, montrent que les coûts d'exploitation des plateformes sont les coûts qui pèsent plus dans le coût total. Ceci confirme qu'effectivement les coûts logistiques sont beaucoup plus élevés en Afrique que dans un autre continent.

Tableau 6.7 – Taux d'évolution incertain

	$\tau_{t,1}$	$\tau_{t,2}$	$\tau_{t,3}$	$\tau_{t,4}$	$\tau_{t,5}$
t =2	5%	5%	5%	5%	5%
t =3	30%	5%	75%	100%	150%
t =4	50%	10%	100%	150%	150%
t =5	100%	15%	100%	150%	200%

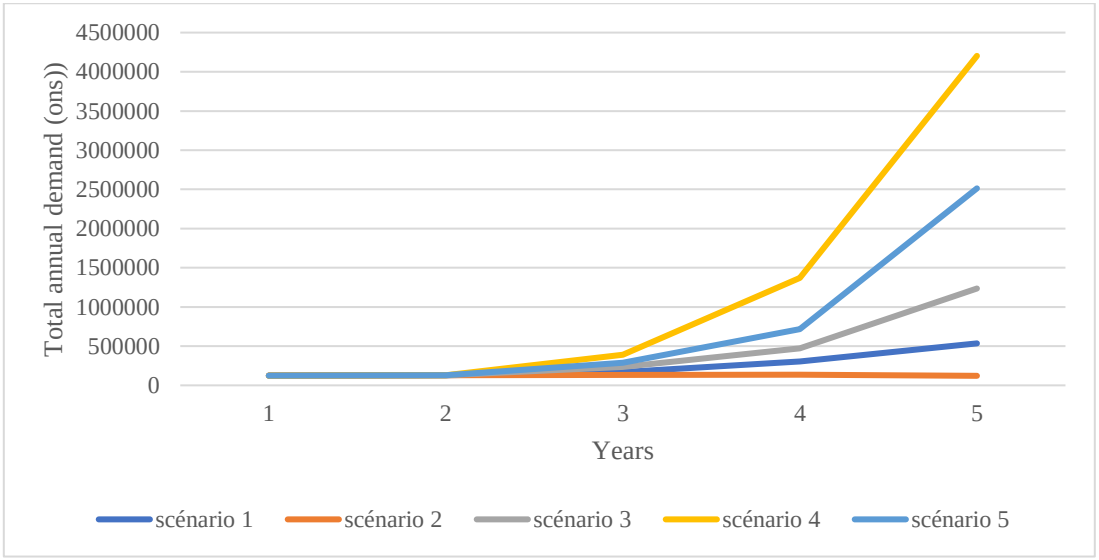

Figure 6.16 – Scénarios d'évolution de la demande

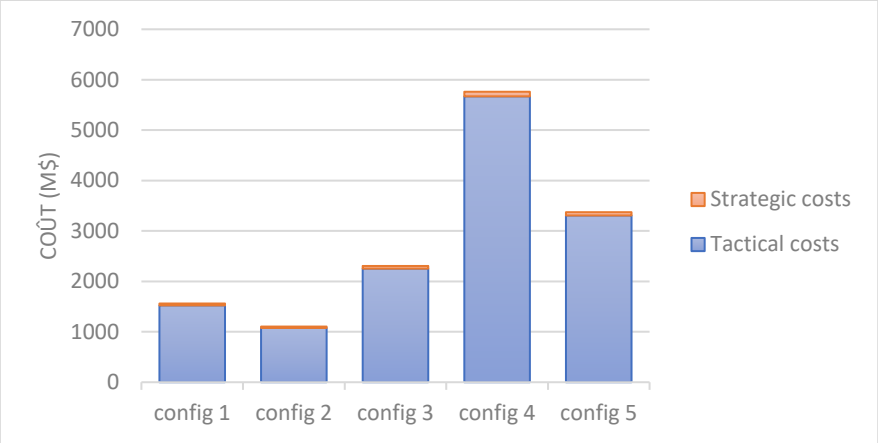

Figure 6.17 – Les coûts d'exploitation (bleu) et de conception (orange) du réseau

5.1.4. Etape 4 : Analyse de robustesse des configurations et synthèse

Ensuite, nous examinons la robustesse de chaque configuration optimale par rapport aux variations de la demande. Pour ce faire, nous résolvons le sous-problème d'allocation des flux et de dimensionnement des capacités en fixant les localisations des plateformes en fonction de chaque configuration. La figure 6.18 illustre les coûts d'ajustement et d'exploitation du réseau issus de chaque optimisation. Nous constatons qu'une configuration prévue pour satisfaire une évolution faible de la demande nécessitera des coûts d'adaptation importants pour s'adapter à une évolution forte de cette demande. En effet, les coûts de d'adaptation globaux sont plus élevés (1179 M$) lorsque la demande change selon le scénario 2 et sont nuls lorsque la demande varie selon le scénario 4. Le tableau 6.8 résume les résultats du calcul du ratio de regret relatif lié à chaque configuration optimale. Il s'ensuit que la première configuration correspond à la configuration la plus robuste puisqu'elle a le regret relatif maximum le plus bas.

Tableau 6.8 – Calcul des regrets relatifs

	scénario 1	**scénario 2**	**scénario 3**	**scénario 4**	**scénario 5**	**Maximum des regrets relatifs**
	Regret relatif					
Config 1	0%	50%	27%	68%	48%	68%
Config2	24%	0%	48%	78%	63%	78%
Config3	60%	122%	0%	52%	65%	122%
Config4	301%	454%	182%	0%	104%	454%
Config5	135%	224%	65%	29%	0%	224%

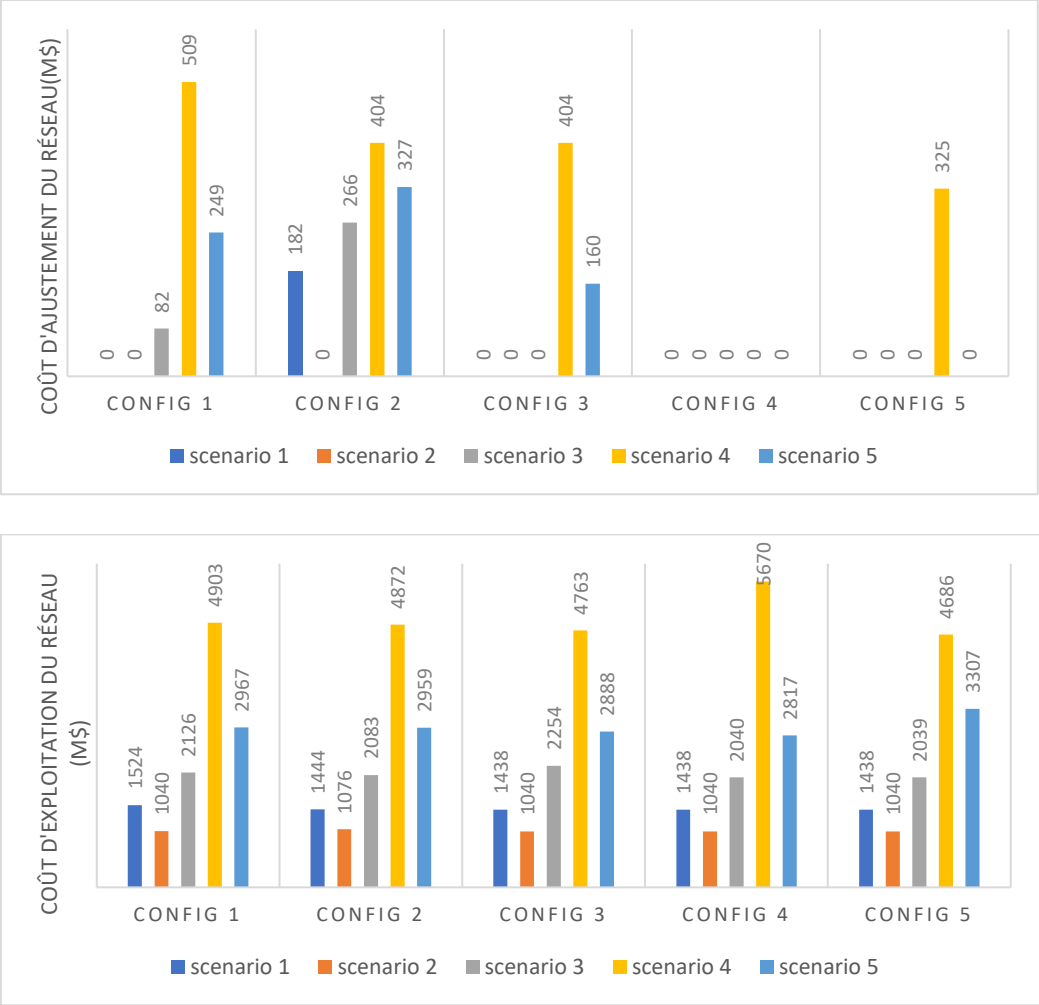

Figure 6.18 – Coûts d'exploitation et d'ajustement du réseau

5.2. Influence économique d'une conception flexible du réseau

Dans ce qui suit, nous analyserons les gains économiques issus de la conception flexible du réseau de distribution sous incertitude de la demande. Pour des fins d'illustration, cette incertitude sera représentée selon trois scénario d'évolution de la demande ivoirienne d'engrais, principalement : le scénario 2 (pessimiste) dénotant une évolution faible de la demande (scénario 2), le scénario 4 (optimiste) dénotant une évolution importante de la demande et le scénario 1 associé à la solution robuste du problème de conception (§5.1) (figure 6.16). Pour ce faire, nous relaxons graduellement les degrés de flexibilité du modèle original (tableau 6.9) à savoir : la sous-traitance du stockage, l'expansion des capacités et l'ouverture flexible des plateformes au cours de l'horizon de planification.

Dans le premier modèle, nous supposons qu'aucune installation n'était exploitée auparavant. Notons que pour des raisons de simplification de l'analyse, la flexibilité de la relocalisation des capacités n'a pas été étudiée. Nous supposons qu'il y a cinq entrepôts externes à louer. De plus, suite à une discussion avec notre partenaire, nous supposons que le coût unitaire de stockage externe est faible par rapport au coût unitaire de stockage interne.

Dans le deuxième modèle, nous excluons, en plus de la possibilité de sous-traitance du stockage, la flexibilité de l'externalisation (i.e. sous-traitance) du stockage, en fixant les capacités de stockage à zéro. Dans le troisième modèle, nous excluons également la possibilité d'extension des capacités. Dans le quatrième modèle, nous excluons tous les degrés de flexibilité par lesquels les nouvelles installations ne peuvent être ouvertes à leur pleine capacité qu'en une seule période et se rapprochent ainsi du modèle de chapitre 5 Les paramètres logistiques et les paramètres de coûts sont décrits dans le tableau 6.6).

Tableau 6.9 – Hypothèses

Modèle	**Degré de flexibilité**	**Transformation/modification du modèle original**
M1	Modèle original sans possibilité de relocalisation	$\forall l \in LP \mid BinR(l) = 0$
M2	M1 sans sous-traitance de stockage	$+ \ \forall l \in LPe \mid SCP_out_l^t = 0$
M3	M2 sans possibilité d'extension des capacités	$+(7.6) \Rightarrow \forall l \in LP, gp \in GP \mid \sum_{t \in T} b_l^{gp,t} \leq bigM \times \sum_{a \in A} o_l^{a,t}$ $+(7.8) \Rightarrow \forall l \in LP, gs \in GS \mid \sum_{t \in T} s_l^{gs,t} \leq SCp_l^{\max} \times \sum_{a \in A} o_l^{a,t}$
M4	M3 sans possibilité d'ouverture flexible des plateformes	$+\forall l \in LP, t > 1, a \in A \mid o_l^{a,t} = 0$

La figure 6.19 résume les économies réalisées sur les coûts d'exploitation et d'investissement avec chaque degré de flexibilité lorsqu'on compare deux à deux les modèles d'optimisation du tableau 6.19. L'évaluation d'une économie de coûts d'un modèle Mi par rapport à un autre modèle Mj est effectuée comme suit : $\text{Economie_coût(Mi/Mj)} = -\frac{\text{Coût(Mi)} - \text{Coût(Mj)}}{\text{Coût(Mj)}} \times 100\%$.

La figure 6.20 illustre les résultats du planning de dimensionnement des capacités en fonction des différents degrés de flexibilité. La figure 6.21 illustre le résultat d'évolution de la localisation des nouvelles plateformes dans le réseau de distribution et de *blending* d'engrais en CIV pendant les cinq prochaines années (colonnes) et en fonction de chaque modèle d'optimisation (lignes). Les plateformes de *blending* sont représentées par des carrés oranges tandis que les plateformes de stockage sont présentées par des triangles inversés noirs (pour les plateformes internes) et bleus (pour les plateformes de stockage externes). Les flux sont modélisés par des arcs noirs (pour les produits finis) et verts (pour les composants). Ces derniers transitent le port d'Abidjan, représenté par un cercle vert.

Au premier abord, on constate que la configuration du réseau sous le modèle 1 reste inchangée au cours des années. Ceci semble logique puisqu'on a supposé que la localisation et le dimensionnement sont statiques. Cela dit, en intégrant la flexibilité de la localisation dynamique (i.e. modèle 2), nous constatons que la première année le réseau comporte trois plateformes de *blending* et qu'à partir de la deuxième année, on localise deux autres plateformes de *blending*. La capacité des plateformes reste inchangée durant les trois dernières années. Ainsi, en intégrant la flexibilité d'extension de capacités (i.e. modèle 3) et de location temporaire (i.e. modèle 4), nous remarquons qu'il y a une évolution notable des capacités des plateformes (figure 6.20).

En comparant la conception sous le modèle M1 par rapport à celle sous le modèle M2, nous voyons que la possibilité d'externaliser le stockage (premier degré de flexibilité) réduit les besoins en capacité des centres de *blending* et de distribution. En effet, en raison de la saisonnalité de la demande, au lieu d'implanter une grande capacité pour répondre à des pics occasionnels de la demande, une capacité plus faible peut être suffisante pour répondre à la demande moyenne (figure 6.20). Ainsi, le coût global diminue d'environ 16% à 46% selon le scénario d'évolution de la demande (figure 6.19). De plus, ce degré de flexibilité a un grand impact sur la configuration du réseau, et même sur la stratégie de localisation des plateformes de *blending*. Ce dernier est centralisé (trois centres de *blending*) en M2 et décentralisé (cinq centres de *blending*) en M1. En effet, puisque la sous-traitance du stockage a permis de réduire les coûts d'investissement et d'exploitation, l'économie de la centralisation du *blending* devient faible par rapport à l'économie des coûts de distribution en aval issue de la décentralisation du *blending.*

Figure 6.19 – Comparaison des économies de coûts

Figure 6.20 – Dimensionnement des capacités de stockage modulaires

En comparant la conception sous le modèle M2 par rapport à celle sous le modèle M3, nous observons que le fait d'avoir la flexibilité d'étendre les capacités quand c'est nécessaire (deuxième degré de flexibilité) a un impact sur le coût total. En effet, en raison des économies d'échelle, le coût d'investissement de la mise en place d'installations à pleine capacité en une seule période est inférieur au coût d'investissement de l'expansion de la capacité. Toutefois, en raison de la croissance de la demande, les capacités deviennent redondantes et ne sont pas utilisées efficacement lorsqu'on exclut la flexibilité d'expansion. Par conséquent, les coûts d'exploitation deviennent plus élevés. Ainsi, l'économie globale des coûts d'exploitation sous-jacents à la prise en compte de ce degré de flexibilité est d'environ 2,5 % à 34% selon l'évolution de la demande (figure 6.19).

En comparant la configuration du réseau sous le modèle M3 à celle sous le modèle M4, nous constatons que ce degré de flexibilité a un impact sur le choix de la localisation optimale du *blending.* Compte tenu de cette flexibilité, le *blending* est centralisé (trois centres de *blending*). En effet, dans ce cas, la centralisation du *blending* génère des économies de coûts d'investissement plus importantes que les économies de coûts de distribution en aval résultants de la décentralisation du *blending.*

En comparant la conception sous le modèle M4 par rapport à celle sous le modèle M3, il s'ensuit que la prise en compte de la flexibilité de l'ouverture multi-périodes des plateformes conduit à une planification de réseau différente par rapport à la période d'établissement des centres de Korhogo et de Yamoussoukro et à la stratégie de localisation du *blending*. Cette flexibilité permet de réduire le coût global d'environ 2,6 % seulement (scénario 1). Cependant, lorsque nous considérons les trois degrés de flexibilité simultanément, nous percevons que l'économie globale des coûts augmente d'environ 43% à 48% selon le scénario d'évolution de la demande. Ainsi, pour tirer le maximum d'avantages économiques liés à la conception flexible d'un réseau, les décideurs doivent prendre en compte simultanément les trois degrés de flexibilité.

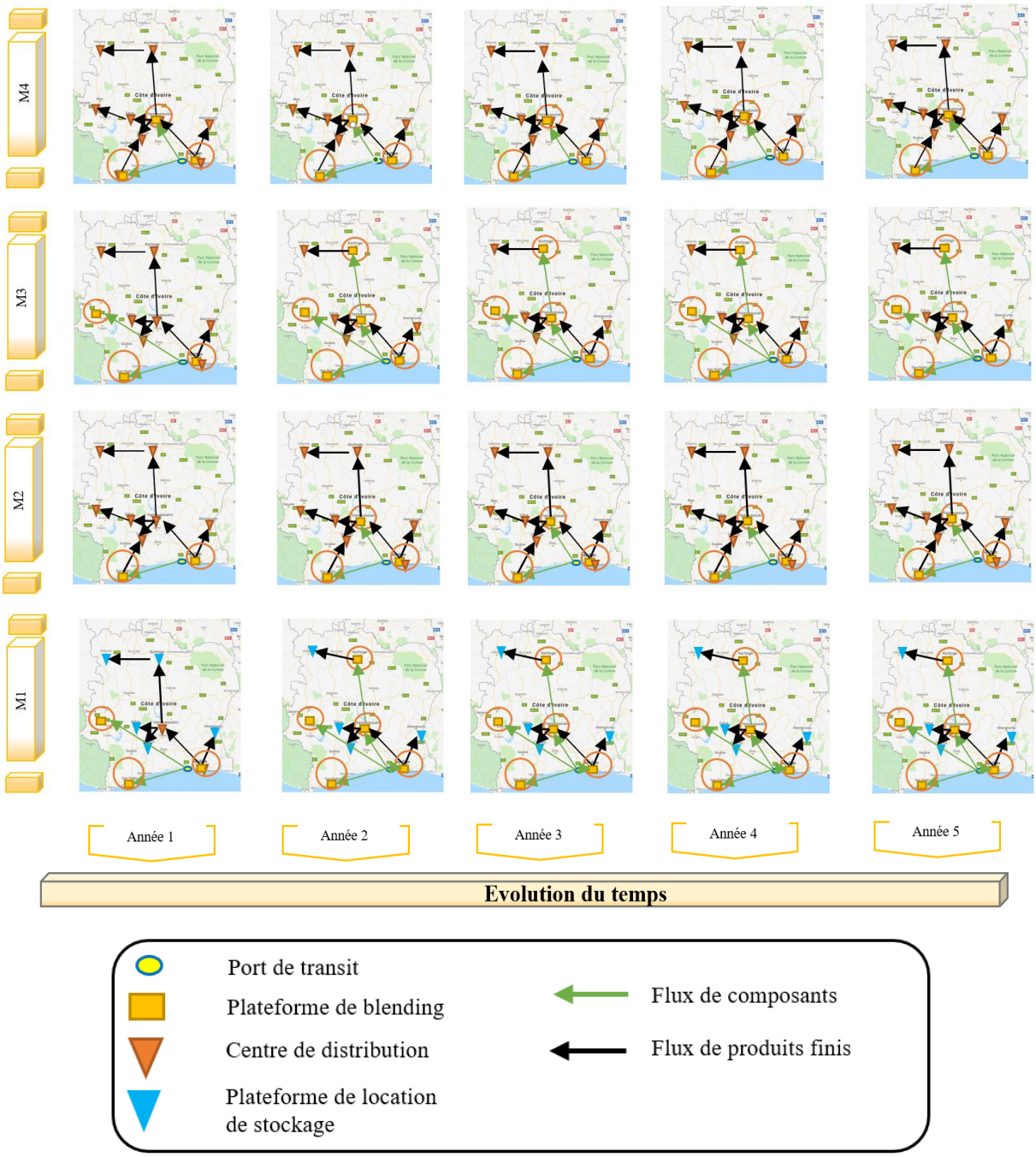

Figure 6.21 – Solutions de la localisation des plateformes de distribution et de blending

6. Conclusion du chapitre 6

Ce chapitre s'est intéressé à corriger les limites du modèle présenté dans le chapitre 5 en intégrant davantage de flexibilité (i.e. de degrés de liberté) dans la prise de décision. Par conséquent, le nouveau modèle de conception flexible de réseaux de distribution hybrides inclut des possibilités industrielles et managériales réalistes pas encore prises en compte à notre connaissance dans des modèles analytiques, y compris le report de la personnalisation finale, la dynamique du marché (infrastructure/offre logistique et changements de demande dans le temps/espace), la sous-traitance temporaire du stockage, l'extension et la relocalisation modulaire de la capacité. Ce modèle est générique et vise à apporter une aide à la décision aux industriels quant à la localisation et au dimensionnement des plateformes de personnalisation et de distribution dans un contexte dynamique et peu prévisible. Tenant compte de ces conditions, la résolution de ce problème s'est basée sur une approche de planification stratégique robuste. En effet, étant donné que les conditions du marché sont dynamiques, le développement industriel doit être aligné et ajusté au fur et à mesure que l'on avance dans l'horizon de planification. De plus, comme la planification porte sur un horizon glissant à long terme et que la demande future est peu prévisible, nous proposons de procéder par une optimisation robuste en cherchant, à chaque itération de planification, la solution dont le regret maximal est le plus faible. La contribution de ce nouveau modèle a été validée par une étude de cas réaliste basée sur le problème de conception d'un réseau de distribution et de *blending* d'engrais en Côte d'Ivoire. Cette étude permet de mettre en valeur les gains économiques de l'intégration des degrés de flexibilité tels que la sous-traitance du stockage, l'extension des capacités et l'ouverture multi-périodes des plateformes durant l'horizon de planification.

Conclusion Générale et perspectives de recherche

1. Conclusion générale

L'Afrique suscite un intérêt particulier pour de nombreuses entreprises manufacturières souhaitant étendre leurs réseaux logistiques pour mieux approcher les marchés africains. Dans ce contexte, les investisseurs se confrontent à un vrai paradoxe décisionnel. D'une part, ils aspirent à accroître leurs parts de marché en offrant un portefeuille de produits très diversifiés et adaptés aux besoins des marchés et aux habitudes de consommations des africains diverses et variées. D'autre part, ils souhaitent maintenir les économies d'échelle, limiter les investissements nécessaires pour offrir cette diversité et réduire les risques qui peuvent nuire au fonctionnement de leur chaînes logistiques.

Pour lever ce dilemme, la **première question de recherche** que nous avons abordée dans cette thèse de doctorat est le choix des hubs logistiques régionaux en Afrique. En effet, avant de penser ou de repenser leurs réseaux logistiques, la plupart des investisseurs choisissent une porte d'entrée vers les marchés régionaux pour atteindre efficacement, de manière efficiente et avec le plus faible risque, leurs marchés ciblés. Ce choix a un impact significatif sur les performances du réseau et devra donc prendre en compte les forces et les faiblesses de l'Afrique, en incorporant l'impact positif ou négatif des grandes disparités entre ses pays. Cette décision stratégique doit être donc basée sur des critères discriminants impliquant le jugement parfois subjectif des décideurs, qui peut être d'autre part être entaché d'imprécision.

De nombreuses études antérieures s'intéressent à ce problème à l'aide de méthodes d'optimisation analytique. Ces approches ne prennent souvent en compte que des critères quantitatifs. Or, dans le contexte étudié, l'Afrique, d'autres critères d'ordre qualitatif auront une influence forte sur le choix de la localisation des plateformes logistiques, tels que la stabilité du pays, la qualité de l'infrastructure, la réglementation du marché de travail, etc.

Pour aborder cette **première question de recherche**, nous avons proposé une approche hybride d'analyse multicritères floue pour la sélection des hubs logistiques régionaux tenant compte de

l'imprécision sur les jugements subjectifs d'experts. Nous avons suggéré d'évaluer séparément l'attractivité d'un pays et celle de l'écosystème logistique portuaire dans lequel le futur hub sera implanté. Sur la base des besoins exprimés par notre partenaire 3PL, les sous-critères de chaque catégorie ont été définis à partir de critères issus de la littérature, de critères suggérés par les organisations internationales et d'une collaboration avec les experts du partenaire logistique. La logique floue a fourni le cadre d'intégration permettant de considérer simultanément des évaluations des critères sous forme de nombres précis, d'intervalles et de jugements subjectifs, provenant de diverses sources. Cette approche combine une version améliorée de la méthode TOPSIS floue, utilisée pour l'évaluation des hubs sur la base de l'attractivité des pays et la compétitivité des écosystèmes logistiques des hubs, et la méthode AHP, utilisée pour la pondération des critères de sélection. Cette approche a été appliquée pour validation sur un cas réaliste, montrant que les améliorations suggérées permettent d'accéder à une information plus riche qui peut être très différente des résultats obtenus en utilisant TOPSIS floue classique.

La **deuxième question de recherche** est liée à la conception de réseaux de distribution en Afrique, à partir de ces hubs, pour servir efficacement, de manière efficiente et en maintenant la qualité requise, des marchés fortement diversifiés et géographiquement éloignés. Pour satisfaire ces objectifs tout en maintenant des économies d'échelle, une idée émergente, proposée par notre partenaire, consiste à personnaliser les produits pendant la distribution. Cela se traduit par la mise en place d'installations de personnalisation (assemblage, conditionnement…) au niveau des plateformes de distribution.

Par ailleurs, les futurs réseaux doivent être adaptés aux spécificités de chaque marché africain et être alignés avec leur dynamique incertaine provoquée par 1) un manque de visibilité sur les préférences des consommateurs à terme ; 2) un manque de visibilité sur l'évolution des conditions de distribution.

L'analyse de la littérature sur la conception de réseaux de distribution a montré que de nombreux articles ne traitent pas simultanément la délocalisation de la personnalisation retardée dans le réseau de distribution, la dynamique spatio-temporelle des demandes, l'extension de capacités modulaires, la relocalisation des capacités modulaires, l'incertitude d'évolution des demandes et des conditions de distribution, la réactivité face aux demandes ainsi que la conservation de la qualité des produits personnalisés. De plus, la plupart des auteurs supposent que la localisation et le dimensionnement sont décidés au début de la planification et restent

inchangés, en supposant que les données de distribution (demande, coûts) sont connues avec certitude. Très peu d'auteurs se sont intéressés à résoudre le problème dans sa version la plus réaliste (incluant dynamique et incertitude) et ceux qui le font se basent souvent sur l'optimisation stochastique. Cette approche nécessite des informations précises sur les lois de distribution des probabilités qui, dans la plupart des cas, sont très difficiles à collecter.

Pour répondre à cette **deuxième question de recherche,** nous avons suggéré deux nouveaux modèles d'optimisation mathématique multi-objectifs génériques intégrant trois critères d'optimisation : la minimisation du coût total (d'investissement et d'exploitation du réseau), la maximisation de la proximité des stocks de produits personnalisés aux marchés et la minimisation des dommages impactant les produits pendant la distribution finale, en rapprochant les plateformes de personnalisation des marchés.

- Le premier modèle vise, dans un contexte à moyen terme et déterministe, à définir la localisation et dimensionnement des plateformes, en faisant l'hypothèse que ces décisions restent inchangées. La pertinence de ce modèle a été validée par une étude de cas réaliste de conception de mélanges et de réseaux de distribution d'engrais en Côte d'Ivoire, avec l'aide de notre partenaire.
- Le deuxième modèle étend le premier en intégrant, dans un contexte incertain, davantage de flexibilité dans la prise de décision : l'ouverture et la fermeture des plateformes durant l'horizon de planification, l'extension ou la relocalisation des capacités (personnalisation ou stockage) et la sous-traitance temporaire des plateformes de stockage. Pour résoudre ce problème sous incertitude, nous avons proposé une approche de planification robuste basée sur le modèle de regret minimal. L'applicabilité de cette approche ainsi que la contribution de ce modèle ont été validées par une étude de cas réaliste basée sur le problème de conception d'un réseau de distribution et de *blending* d'engrais en Côte d'Ivoire. Cette étude permet de mettre en valeur les gains économiques de l'intégration des degrés de flexibilité et que la prise en compte de ces degrés simultanément génère des économies des coûts intéressantes.

2. Implications managériales

Les modèles d'optimisation et l'approche d'analyse multicritère floue, développés dans le cadre de cette thèse de doctorat, sont, d'un point de vue managériale, au cœur des outils d'aide à la planification logistique stratégique.

L'approche d'analyse multicritères floue, conçue pour le choix de hubs logistiques régionaux en Afrique, est adaptée au contexte africain et intègre les contraintes de localisation des hubs en Afrique. De plus, elle tient compte des forces et des faiblesses de l'Afrique, en intégrant l'impact positif ou négatif des grandes disparités entre ses pays. Elle offre un cadre d'évaluation de référence pour tout décideur (prestataire de services logistiques ou investisseur) souhaitant étendre son activité en Afrique. Par ailleurs, cette approche :

- permet d'épargner les biais dans le choix stratégique des hubs. En effet, à la différence des approches classiques, elle prend en compte l'imprécision et la confiance sous-jacentes à l'évaluation des décideurs ;
- permet d'analyser l'impact de la prise en compte du niveau de confiance attaché au jugement des experts sur une évaluation spécifique, et l'impact du retard de la défuzzification permis par la définition des distances floues ;
- permet d'analyser l'impact de la considération des critères liés à l'attractivité du pays et à l'attractivité de l'écosystème logistique séparément, puis simultanément ;

Les deux modèles d'optimisation multi-objectifs, développés pour la conception de réseaux de distribution hybrides, sont adaptés au contexte africain par l'intégration des contraintes de distribution en Afrique et de la flexibilité décisionnelle. Ils forment, donc, un outil décisionnel pour tout industriel souhaitant servir des marchés africains fortement diversifiés. Ainsi, cet outil permet donc :

- de définir la configuration optimale de réseaux de distribution hybrides (la localisation et le dimensionnement des plateformes de distribution et de personnalisation, l'acheminement des flux de composants depuis les sites fournisseurs jusqu'au site de personnalisation, l'acheminement des flux de produits finis depuis les plateformes de distribution ou de personnalisation jusqu'au marchés) adaptée aux conditions de distribution en Afrique actuelles et futures ;

- de réaliser une analyse comparative de réseaux de distribution candidats en fonction des objectifs fixés en termes de coût, qualité, proximité ou réactivité aux demandes de marchés, et des conditions commerciales et logistiques retenues ;
- d'étudier l'impact des caractéristiques des marchés (taille de marché, diversité des produits), des conditions d'infrastructures de transport et d'offres logistiques sur le positionnement de la personnalisation finale des produits ;
- de quantifier l'impact économique de la flexibilité de la conception de réseaux de distribution hybrides (ouverture/fermeture multi-période, extension ou relocalisation des capacités et externalisation temporaire partielle des stocks) ;
- d'analyser la robustesse des configurations de réseaux de distribution hybrides en fonction des évolutions volatiles des marchés africains tant temporelles que spatiales (émergence de nouveaux marchés et/ou disparition des marchés existants).

3. Perspectives de recherche

Les perspectives que nous envisageons prioritairement concernent l'extension du modèle de coût, la résolution du problème de conception sur des cas de taille réaliste et l'analyse de la robustesse des schémas logistiques en se basant sur la simulation.

Relativement au premier volet, nous envisageons d'intégrer de nouveaux inducteurs de coûts au modèle précédemment proposé dans cette thèse, notamment pour :

- L'évaluation du coût de fermeture des sites sur une base socio-économique. En effet, nous avons évalué ce coût sur une base uniquement économique (prix forfaire de cession d'activité). Or, en réalité, la dimension sociale impacte significativement ce coût.
- L'évaluation économique de la pénalité de la dégradation de la qualité des produits causée par la centralisation de la personnalisation et le transport des produits personnalisés en camion sur des routes difficiles.
- La prise en compte de l'impact de la relocalisation des capacités sur le coût de fonctionnement des plateformes (émettrices et réceptrices) en tenant compte d'un délai de relocalisation supérieur à la période. En effet, dans notre modèle de coût, ce délai était supposé inférieur à la période (la relocalisation s'effectue en temps masqué).

- La prise en compte de la dimension environnementale et sociale de la conception de nouvelles plateformes de distribution et de personnalisation.
- La prise en compte de l'amortissement des installations de stockage et de personnalisation acquises dans l'évaluation des coûts d'exploitation.

Relativement au deuxième volet, nous envisageons de développer une approche hybride combinant des méta-heuristiques ou des heuristiques pour résoudre efficacement les problèmes réels de conception de réseaux, c'est-à-dire les problèmes de grande dimension. En effet, nous avons résolu les problèmes de conception modélisés dans cette thèse par une approche exacte en nous basant sur un jeu de données illustratif de faibles dimensions.

Quant au troisième volet, nous envisageons de coupler le modèle d'optimisation avec un nouveau modèle de simulation à évènements discrets pour mieux analyser la robustesse des configurations de réseaux (solutions du problème de conception). Pour ce faire, dans une première étape, nous allons résoudre le problème en générant les *n* meilleurs solutions. Ensuite, nous allons modéliser les configurations puis simuler leur fonctionnement en considérant de nouvelles sources d'incertitude autres que la demande, par exemple dans les délais de réapprovisionnement, de transport et de distribution. Enfin, nous analyserons la robustesse globale de chaque configuration par rapport aux différents aléas sur la base des indicateurs de performance, qu'il faudra définir.

... Mots de fin de cette belle aventure

Cette thèse de doctorat était l'occasion pour moi de développer des compétences avérées sur le plan scientifique liées à la modélisation, l'optimisation, la simulation à évènements discrets et l'analyse des données pour la conception et le pilotage des réseaux logistiques. Sur le plan industriel, j'ai eu l'occasion de mettre en exergue mes contributions scientifiques pour le compte de nos partenaires industriels marocains actifs en industrie des engrais et en services logistiques. Cette expérience, au-delà de mon ancrage scientifique, m'a permis de développer une autonomie dans la conduite de nos relations avec les partenaires industriels et une rigueur dans l'analyse des contraintes et des besoins industriels.

En conclusion, je suis fière d'avoir mené cette belle aventure en Afrique, mon continent, et d'avoir contribué, avec une grande passion et patience, à l'avancée de la recherche scientifique appliquée en Afrique et à son développement.

« J'ai le sentiment que chaque homme possède en lui quelque chose que personne d'autre ne peut faire. Alors c'est une question de découverte. Certains le découvrent très tôt, d'autres mettent un temps fou. D'autres encore apprennent la patience et se préparent pour le jour où, brusquement, ils le reconnaîtront. Comme un comédien qui attend le rôle de sa vie. »

Une saison blanche et sèche de André Brink - André Brink

« Research is to see what everybody else has seen, and to think what nobody else has thought".

Albert Szent-Gyorgyi

« Cher lecteur, je vous remercie de l'attention que vous avez portée à la lecture de mon manuscrit de thèse et je vous offre un bouquet de fleurs comme symbole de mon respect et de mes sincères remerciements »

Bibliographie

Abdullah, L., 2013. Fuzzy multi criteria decision making and its applications: A brief review of category. Procedia-Social and Behavioral Sciences 97, 131–136.

Abodohoui, A., Aïhounhin, S.P., Mayuto, R., Marif, A., Montreuil, B., 2014. Assessing the Readiness of Africa for the Physical Internet, in: First International Physical Internet Conference. Québec City, Canada, May. pp. 28–30.

Afshari, H., Sharafi, M., ElMekkawy, T., Peng, Q., 2014. Optimizing Multi-objective Dynamic Facility Location Decisions within Green Distribution Network Design. Procedia CIRP, Variety Management in Manufacturing 17, 675–679. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.147

Alaya, I., 2009. Optimisation multi-objectif par colonies de fourmis: cas des problèmes de sac à dos (PhD Thesis). Université Claude Bernard-Lyon I.

Albareda-Sambola, M., Fernández, E., Hinojosa, Y., Puerto, J., 2009. The multi-period incremental service facility location problem. Computers & Operations Research 36, 1356–1375.

Alderson, W., 1957. Marketing behavior and executive action.

Alumur, S., Kara, B.Y., 2008. Network hub location problems: The state of the art. European journal of operational research 190, 1–21.

Amin, S.H., Zhang, G., 2013. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. Applied Mathematical Modelling 37, 4165–4176. https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.039

Aruldoss, M., Lakshmi, T.M., Venkatesan, V.P., 2013. A survey on multi criteria decision making methods and its applications. American Journal of Information Systems 1, 31–43.

Awasthi, A., Chauhan, S.S., Goyal, S.K., 2011. A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. Mathematical and Computer Modelling 53, 98–109.

Badri, H., Bashiri, M., Hejazi, T.H., 2013. Integrated strategic and tactical planning in a supply chain network design with a heuristic solution method. Computers & Operations Research 40, 1143–1154.

Baghalian, A., Rezapour, S., Farahani, R.Z., 2013. Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. European Journal of Operational Research 227, 199–215.

Ballou, R.H., 2001. Unresolved issues in supply chain network design. Information Systems Frontiers 3, 417–426.

Banque Africaine de Développement, 2010. Going forward: Developing regional hub ports in Africa

Bashiri, M., Badri, H., 2010. A dynamic model for expansion planning of multi echelon multi commodity supply chain. International Journal of Engineering and Technology 2, 85.

Behmardi, B., Lee, S., 2008. Dynamic multi-commodity capacitated facility location problem in supply chain, in: IIE Annual Conference. Proceedings. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), p. 1914.

Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A., Aghdasi, M., 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. European journal of Operational research 200, 198–215.

Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., Ignatius, J., 2012. Review: A state-of the-art survey of TOPSIS applications. Expert Systems With Applications 39, 13051–13069. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056

Bouchon-Meunier, B., 1995. La logique floue et ses applications.

Brans, J.-P., Mareschal, B., 2005. PROMETHEE methods, in: Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Springer, pp. 163–186.

Buckley, J.J., 1985. Fuzzy hierarchical analysis. Fuzzy sets and systems 17, 233–247.

Burgess, K., Singh, P.J., Koroglu, R., 2006. Supply chain management: a structured literature review and implications for future research. International Journal of Operations & Production Management 26, 703–729.
Campbell, J.F., O'Kelly, M.E., 2012. Twenty-five years of hub location research. Transportation Science 46, 153–169.
Chaabane, A., Ramudhin, A., Paquet, M., 2011. Designing supply chains with sustainability considerations. Production Planning & Control 22, 727–741.
Chabrol, M., Féniès, P., Gourgand, M., Tchernev, N., 2006. Un environnement de modélisation pour le système d'information de la Supply Chain. Application au Nouvel Hôpital Estaing. Ingénierie des Systèmes d'Information 11, 137–162.
Chabrol, M., Gourgand, M., Rodier, S., 2009. Methodological approach and software tools for the hospital systems, in: Intelligent Patient Management. Springer, pp. 93–111.
Chabrol, M., Sarramia, D., 2001. Modélisation orientée objets du système d'information des Systèmes de Trafic Urbain: une approche multi-agents. Université Blaise Pascal–Clermont-Ferrand II LIMOS.
Chen, C., Hu, X., Gan, J., Qiu, R., 2017. Regional low-carbon timber logistics network design and management using multi-objective optimization. Journal of Forest Research 22, 354–362. https://doi.org/10.1080/13416979.2017.1381493
Chen, C.-T., 2000. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. Fuzzy sets and systems 114, 1–9.
Chen, G., Cheung, W., Chu, S.-C., Xu, L., 2017. Transshipment hub selection from a shipper's and freight forwarder's perspective. Expert Systems with Applications 83, 396–404.
Chen, S.-P., Chang, P.-C., 2006. A mathematical programming approach to supply chain models with fuzzy parameters. Engineering Optimization 38, 647–669.
Chen, Y., Qu, L., 2006. Evaluating the selection of logistics centre location using fuzzy MCDM model based on entropy weight, in: Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress On. IEEE, pp. 7128–7132.
Combes, C., 1994. Un environnement de modélisation pour les systèmes hospitaliers (PhD Thesis). Clermont-Ferrand 2.
Correia, I., Melo, T., 2017. A multi-period facility location problem with modular capacity adjustments and flexible demand fulfillment. Computers & Industrial Engineering.
Correia, I., Melo, T., Saldanha-da-Gama, F., 2013. Comparing classical performance measures for a multi-period, two-echelon supply chain network design problem with sizing decisions. Computers & Industrial Engineering 64, 366–380.
Cortinhal, M.J., Lopes, M.J., Melo, M.T., 2015. Dynamic design and re-design of multi-echelon, multi-product logistics networks with outsourcing opportunities: A computational study. Computers & Industrial Engineering 90, 118–131.
Cossard, N., 2004. Un environnement logiciel de modélisation et d'optimisation pour la planification de la production dans la chaîne logistique (PhD Thesis). Clermont-Ferrand 2.
Dal-Mas, M., Giarola, S., Zamboni, A., Bezzo, F., 2011. Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty. Biomass and Bioenergy 35, 2059–2071. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.060
Delmelle, E.M., Thill, J.-C., Peeters, D., Thomas, I., 2014. A multi-period capacitated school location problem with modular equipment and closest assignment considerations. Journal of Geographical Systems 16, 263–286.
Deloitte, 2015. La consommation en Afrique Le marché du XXIe siècle
Dey, B., Bairagi, B., Sarkar, B., Sanyal, S.K., 2015. Warehouse location selection by fuzzy multi-criteria decision making methodologies based on subjective and objective criteria. International Journal of Management Science and Engineering Management 0, 1–17. https://doi.org/10.1080/17509653.2015.1086964
Dias, J., Captivo, M.E., Clímaco, J., 2006. Capacitated dynamic location problems with opening, closure and reopening of facilities. IMA Journal of Management Mathematics 17, 317–348.
Elevli, B., 2014. Logistics freight center locations decision by using Fuzzy-PROMETHEE. Transport 29, 412–418. https://doi.org/10.3846/16484142.2014.983966

El-Nakib, I., 2010. Egyptian firms' location preferences for logistics hubs: focus on the Southeast African region, in: 8th International Conference on Supply Chain Management and Information Systems (SCMIS 2010).
Eskilsson, C., Hansson, F., 2010. Finding optimal logistical hubs for Swedish export.
Essaadi, I., Grabot, B., Fénies, P., 2016. Location of logistics hubs at national and subnational level with consideration of the structure of the location choice. IFAC-PapersOnLine 49, 155–160.
Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., 2009. Facility location: concepts, models, algorithms and case studies. Springer.
Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., Arabani, A.B., Nikbakhsh, E., 2013. Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. Computers & Industrial Engineering 64, 1096–1109.
Farahani, R.Z., SteadieSeifi, M., Asgari, N., 2010a. Multiple criteria facility location problems: A survey. Applied Mathematical Modelling 34, 1689–1709.
Farahani, R.Z., SteadieSeifi, M., Asgari, N., 2010b. Multiple criteria facility location problems: A survey. Applied Mathematical Modelling 34, 1689–1709. https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.10.005
Feitzinger, E., Lee, H.L., 1997. Mass customization at Hewlett-Packard: the power of postponement. Harvard business review 75, 116–123.
Fenies, P., Gourgand, M., Rodier, S., 2006. A decisional model for the performance evaluation of the logistic process: application to the hospital supply chain, in: International Conference on Service Systems and Service Management.
Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M., 2005. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. Springer Science & Business Media.
Fowler, M., 2004. UML distilled: a brief guide to the standard object modeling language. Addison-Wesley Professional.
Ghiani, G., Laporte, G., Musmanno, R., 2004. Introduction to logistics systems planning and control. John Wiley & Sons.
Goujon, J.-Y., 1997. Un environnement de modélisation multi-agents pour la spécification et l'évaluation des performances des systèmes industriels de production (PhD Thesis). Clermont-Ferrand 2.
Gourgand, M., Kellert, P., 1991. Conception d'un environnement de modélisation des systèmes de production, in: Actes Du Troisieme Congres International de Génie Industriel, Tours, France. pp. 191–203.
Govindan, K., Fattahi, M., Keyvanshokooh, E., 2017. Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. European Journal of Operational Research 263, 108–141. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009
Govindan, K., Jepsen, M.B., 2016. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. European Journal of Operational Research 250, 1–29. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.019
Grangeon, N., 2001. Métaheuristique et modèles d'évaluation pour le problème du Flow-Shop hybride hiérarchisé: contexte déterministe et contexte stochastique (PhD Thesis).
Gupta, S.K., Rosenhead, J., 1968. Robustness in sequential investment decisions. Management science 15, B–18.
Gwilliam, K., 2011. Africa's transport infrastructure: Mainstreaming maintenance and management. The World Bank.
Haimes, Y.Y., Wismer, D.A., 1971. Integrated system modeling and optimization via quasilinearization. Journal of Optimization Theory and Applications 8, 100–109.
Hamer-Lavoie, G., Cordeau, J.-F., 2006. Un Modèle Pour La Conception D'Un Réseau De Distribution Avec Localisation, Aefectation Et Stocks. INFOR: Information Systems and Operational Research 44, 1–18.
Harrison, T.P., 2005. The practice of supply chain management: where theory and application converge. Springer Science & Business Media.
Hatami-Marbini, A., Kangi, F., 2017. An extension of fuzzy TOPSIS for a group decision making with an application to tehran stock exchange. Applied Soft Computing 52, 1084–1097.

Hinojosa, Y., Kalcsics, J., Nickel, S., Puerto, J., Velten, S., 2008. Dynamic supply chain design with inventory. Computers & Operations Research 35, 373–391.
Hiremath, N. C., Sahu, S., Tiwari, M.K., 2013. Multi objective outbound logistics network design for a manufacturing supply chain. Journal of Intelligent Manufacturing 24, 1071–1084. https://doi.org/10.1007/s10845-012-0635-8
Hiremath, Nagayya C., Sahu, S., Tiwari, M.K., 2013. Multi objective outbound logistics network design for a manufacturing supply chain. Journal of Intelligent Manufacturing 24, 1071–1084.
Hwang, C.-L., Yoon, K., 1981. Methods for multiple attribute decision making, in: Multiple Attribute Decision Making. Springer, pp. 58–191.
Jena, S.D., 2014. Dynamic Facility Location with Modular Capacities: Models, Algorithms and Applications in Forestry.
Jena, S.D., Cordeau, J.-F., Gendron, B., 2015. Dynamic facility location with generalized modular capacities. Transportation Science 49, 484–499.
Jubril, A.M., 2012. A nonlinear weights selection in weighted sum for convex multiobjective optimization. Facta Universitatis 27, 357–372.
Ka, B., 2011. Application of Fuzzy AHP and ELECTRE to China Dry Port Location Selection. The Asian Journal of Shipping and Logistics 27, 331–353. https://doi.org/10.1016/S2092-5212(11)80015-5
Kahraman, C., 2008. Fuzzy Multi-Criteria Decision Making: Theory and Applications with Recent Developments. Springer.
Kayikci, Y., 2010. A conceptual model for intermodal freight logistics centre location decisions. Procedia - Social and Behavioral Sciences, The Sixth International Conference on City Logistics 2, 6297–6311. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.039
Kim, J., Moon, I., 2008. Strategic design of hydrogen infrastructure considering cost and safety using multiobjective optimization. International Journal of Hydrogen Energy 33, 5887–5896.
Klose, A., Drexl, A., 2005. Facility location models for distribution system design. European journal of operational research 162, 4–29.
Kouvelis, P., Yu, G., n.d. Robust discrete optimization and its applications. 1997. Kluwer Academic Publishers, Boston.
Lacomme, P., 1998. Optimisation des systemes de production: methodes stochastiques et approche multi-agents (PhD Thesis). Clermont-Ferrand 2.
Lambert, D.M., Cooper, M.C., Pagh, J.D., 1998. Supply chain management: implementation issues and research opportunities. The international journal of logistics management 9, 1–20.
Lee, K.-L. [b1] (analytic), Huang, W.-C. [b2] (analytic), Teng, J.-Y. [b3] (analytic), 2009. Locating the competitive relation of global logistics hub using quantitative SWOT analytical method (English). Quality & quantity 43, 87–107.
Lemoine, D., 2008. Modèles génériques et méthodes de résolution pour la planification tactique mono-site et multi-site (PhD Thesis). Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
Lirn, T.-C., Thanopoulou, H., Beresford, A., 2003. Transhipment Port Selection and Decision-making Behaviour: Analysing the Taiwanese Case. International Journal of Logistics Research and Applications 6, 229–244. https://doi.org/10.1080/1367556031000162699O
Long, S., Grasman, S.E., 2012. A strategic decision model for evaluating inland freight hub locations. Research in Transportation Business & Management 5, 92–98.
Manzini, R., Bindi, F., 2009. Strategic design and operational management optimization of a multi stage physical distribution system. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 45, 915–936.
Manzini, R., Gebennini, E., 2008. Optimization models for the dynamic facility location and allocation problem. International Journal of Production Research 46, 2061–2086.
Mardani, A., Jusoh, A., Zavadskas, E.K., 2015. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014. Expert Systems with Applications 42, 4126–4148. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.003
Marler, R.T., Arora, J.S., 2004. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Structural and multidisciplinary optimization 26, 369–395.

Mausser, H.E., Laguna, M., 1999. Minimising the maximum relative regret for linear programmes with interval objective function coefficients. Journal of the Operational Research Society 50, 1063–1070.
Mausser, H.E., Laguna, M., 1998. A new mixed integer formulation for the maximum regret problem. International Transactions in Operational Research 5, 389–403.
Mavrotas, G., 2009. Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. Applied mathematics and computation 213, 455–465.
Mebrek, F., Tanguy, A., 2005. modélisation et simulation a évènements discrets du pôle imagerie d'un hôpital moderne, in: 6e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation-Mosim'05.
Melachrinoudis, E., Min, H., 2007. Redesigning a warehouse network. European Journal of Operational Research 176, 210–229.
Melo, M.T., Nickel, S., Da Gama, F.S., 2006. Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. Computers & Operations Research 33, 181–208.
Mena, S.B., 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement 4, 83–93.
Méndez, M., Galván, B., Salazar, D., Greiner, D., 2009. Multiple-objective genetic algorithm using the multiple criteria decision making method topsis, in: Multiobjective Programming and Goal Programming. Springer, pp. 145–154.
Miettinen, K., 1999. Nonlinear Multiobjective Optimization, volume 12 of International Series in Operations Research and Management Science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
Min, H., Ko, H.-J., 2008. The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. International Journal of Production Economics, Research and Applications in E-Commerce and Third-Party Logistics Management 113, 176–192. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.01.017
Muñoz, D., Rivera Virgüez, M.L., others, 2010. Development of Panama as a logistics hub and the impact on Latin America. Massachusetts Institute of Technology.
Murthy, A.N., Mohle, H.R., 2001. Transportation engineering basics.
Naraharisetti, P.K., Karimi, I.A., 2010. Supply chain redesign and new process introduction in multipurpose plants. Chemical Engineering Science 65, 2596–2607.
O'Kelly, M.E., Miller, H.J., 1994. The hub network design problem: a review and synthesis. Journal of Transport Geography 2, 31–40.
Oum, T.H., Park, J.-H., 2004. Multinational firms' location preference for regional distribution centers: focus on the Northeast Asian region. Transportation Research Part E 40, 101–121. https://doi.org/10.1016/S1366-5545(03)00036-X
Owen, S.H., Daskin, M.S., 1998. Strategic facility location: A review. European journal of operational research 111, 423–447.
Pandu, R.G., 2016. Multi-objective Optimization: Techniques And Applications In Chemical Engineering (Second Edition). World Scientific.
Peker, I., Baki, B., Tanyas, M., Ar, I.M., 2016. Logistics center site selection by ANP/BOCR analysis: A case study of Turkey. J. Intell. Fuzzy Syst. 30, 2383–2396. https://doi.org/10.3233/IFS-152007
Pine, B.J., 1993. Mass customizing products and services. Planning Review 21, 6–55. https://doi.org/10.1108/eb054420
Pishvaee, M.S., Razmi, J., 2012. Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. Applied Mathematical Modelling 36, 3433–3446.
Pomerol, J.-C., Barba-Romero, S., 1993. Choix multicritère dans l'entreprise: principes et pratique. Hermes.
Portugal, L. da S., Morgado, A.V., Júnior, O.L., 2011. Location of cargo terminals in metropolitan areas of developing countries: the Brazilian case. Journal of Transport Geography 19, 900–910. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.11.005
Ramezani, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2013. A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. Applied Mathematical Modelling 37, 328–344.

Razmi, J., Zahedi-Anaraki, A., Zakerinia, M., 2013. A bi-objective stochastic optimization model for reliable warehouse network redesign. Mathematical and Computer Modelling 58, 1804–1813. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2013.03.009

Rietze, S.M. (Susan M., 2006. Case studies of postponement in the supply chain (Thesis). Massachusetts Institute of Technology.

Roso, V., Brnjac, N., Abramovic, B., 2015. Inland Intermodal Terminals Location Criteria Evaluation: The Case of Croatia. Transportation Journal 54, 496–515. https://doi.org/10.5325/transportationj.54.4.0496

Roy, B., 2010. Robustness in operational research and decision aiding: A multi-faceted issue. European Journal of Operational Research 200, 629–638.

Roy, B., 2002. Robustesse de quoi et vis-à-vis de quoi mais aussi robustesse pourquoi en aide à la décision. Newsletter of the European Working Group" Multicriteria Aid for Decisions 3, 1–6.

Roy, B., 1990. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, in: Readings in Multiple Criteria Decision Aid. Springer, pp. 155–183.

Russo, R. de F.S.M., Camanho, R., 2015. Criteria in AHP: A Systematic Review of Literature. Procedia Computer Science, 3rd International Conference on Information Technology and Quantitative Management, ITQM 2015 55, 1123–1132. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.081

Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences 1, 83–98.

Sahin, F., Narayanan, A., Robinson, E.P., 2013. Rolling horizon planning in supply chains: review, implications and directions for future research. International Journal of Production Research 51, 5413–5436. https://doi.org/10.1080/00207543.2013.775523

Sarraj, R., 2013. Interconnexion des réseaux logistiques: éléments de définition et potentiel (PhD Thesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Schulze, L., Li, L., 2009. Location-allocation model for logistics networks with implementing commonality and postponement strategies, in: Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. pp. 1615–1620.

Schwartz, F., Vo\s s, S., Ceroni, J.A., 2007. Designing distribution networks taking into account aspects of postponement, in: The Development of Collaborative Production and Service Systems in Emergent Economies, Proceedings of the 19th International Conference on Production Research. IFPR, p. 6.

Seth, D., Panigrahi, A., 2015. Application and evaluation of packaging postponement strategy to boost supply chain responsiveness: a case study. Production Planning & Control 26, 1069–1089.

Shiau, T.-A., Lin, L.-M., Ding, J.-F., Chou, C.-C., 2011. Hub location selection of third-party logistics service on multiple countries consolidations for ocean freight forwarders by using fuzzy multiple criteria decision-making (MCDM) approach. International Journal of Physical Sciences 6, 4548–4557.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E., 2004. Managing the Supply Chain: Definitive Guide. Tata McGraw-Hill Education.

Snyder, L.V., 2006. Facility location under uncertainty: a review. IIE transactions 38, 547–564.

Tchernev, N., 1997. Modélisation du processus logistique dans les systèmes flexibles de production (PhD Thesis). Clermont-Ferrand 2.

Thanh, P.N., Bostel, N., Péton, O., 2008. A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. International Journal of Production Economics 113, 678–693.

Tongzon, J., 2004. Determinants of competitiveness in logistics: implications for the region, in: International Conference on Competitiveness: Challenges and Opportunities for Asian Countries. pp. 1–16.

Torres-Soto, J.E., Üster, H., 2011. Dynamic-demand capacitated facility location problems with and without relocation. International Journal of Production Research 49, 3979–4005.

Ugboma, C., Ugboma, O., Ogwude, I.C., 2006. An analytic hierarchy process (AHP) approach to port selection decisions–empirical evidence from Nigerian ports. Maritime Economics & Logistics 8, 251–266.

Uysal, H., Yavuz, K., 2014. Selection of Logistics Centre Location via ELECTRE Method: A Case Study in Turkey. International Journal of Business and Social Science 5.

van Dyck, G.K., Ismael, H.M., 2015. Multi-Criteria Evaluation of Port Competitiveness in West Africa Using Analytic Hierarchy Process (AHP). American Journal of Industrial and Business Management 5, 432.
Vila, D., Martel, A., Beauregard, R., 2006. Designing logistics networks in divergent process industries: A methodology and its application to the lumber industry. International journal of production economics 102, 358–378.
Voxman, W., 1998. Some remarks on distances between fuzzy numbers. Fuzzy Sets and Systems 100, 353–365.
Walczak, M., 2014. Models of the emergence and diffusion of mass customization. Procedia-Social and Behavioral Sciences 110, 812–821.
Wang, K.-J., Makond, B., Liu, S.-Y., 2011. Location and allocation decisions in a two-echelon supply chain with stochastic demand–A genetic-algorithm based solution. Expert Systems with Applications 38, 6125–6131.
Wang, S., Liu, P., 2007. The evaluation study on location selection of logistics center based on fuzzy AHP and TOPSIS, in: Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference On. IEEE, pp. 3779–3782.
Wanzala, M., Groot, R., 2013. Fertiliser Market Development in Sub-Saharan Africa. International Fertiliser Society.
Wilhelm, W., Han, X., Lee, C., 2013. Computational comparison of two formulations for dynamic supply chain reconfiguration with capacity expansion and contraction. Computers & Operations Research 40, 2340–2356.
Yang, B., Burns, N., 2003. Implications of postponement for the supply chain. International Journal of Production Research 41, 2075–2090.
Yang, Y.-C., Chen, S.-L., 2016. Determinants of global logistics hub ports: Comparison of the port development policies of Taiwan, Korea, and Japan. Transport Policy 45, 179–189. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.10.005
You, F., Grossmann, I.E., 2008. Design of responsive supply chains under demand uncertainty. Computers & Chemical Engineering 32, 3090–3111.
Yu, J., Liu, Y., Chang, G.-L., Ma, W., Yang, X., 2011. Locating Urban Transit Hubs: Multicriteria Model and Case Study in China. Journal of Transportation Engineering 137, 944–952. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000275
Zadeh, A.S., Sahraeian, R., Homayouni, S.M., 2014. A dynamic multi-commodity inventory and facility location problem in steel supply chain network design. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 70, 1267–1282.
Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy logic and its applications. New York, NY, USA.
Zahiri, B., Zhuang, J., Mohammadi, M., 2017. Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: A pharmaceutical case study. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 103, 109–142. https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.04.009
Żak, J., Węgliński, S., 2014. The Selection of the Logistics Center Location Based on MCDM/A Methodology. Transportation Research Procedia 3, 555–564. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.034
Zavadskas, E.K., Turskis, Z., 2011. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview. Technological and economic development of economy 17, 397–427.
Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., Mohammadi, M., 2016. Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 89, 182–214. https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011