



**HAL**  
open science

# La réalité augmentée au service de l'optimisation des opérations de picking et putting dans les entrepôts

Safa Gharbi

## ► To cite this version:

Safa Gharbi. La réalité augmentée au service de l'optimisation des opérations de picking et putting dans les entrepôts. Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Lille, 2015. Français. NNT : 2015ECLI0028 . tel-01441875

**HAL Id: tel-01441875**

**<https://theses.hal.science/tel-01441875>**

Submitted on 20 Jan 2017

**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.

N° d'ordre : 289

**École Centrale de Lille**

**THESE**

Présentée en vue d'obtenir le grade de

**DOCTEUR**

**Spécialité : Automatique, Génie Informatique,  
Traitement du Signal et des Images**

par

**Safa GHARBI**

Doctorat délivré par l'École Centrale de Lille

**La Réalité Augmentée au service de l'optimisation des opérations de picking et putting  
dans les entrepôts**

Soutenue publiquement le 18 décembre 2015 devant le jury :

<b>Président :</b>	<b>Aziz MOUKRIM</b>	Professeur, Université de Technologie de Compiègne
<b>Rapporteurs :</b>	<b>Abdellah EL MOUDNI</b>	Professeur, Université de Belfort-Montbéliard
	<b>Alassane B NDDIAYE</b>	Professeur, Université Libre de Bruxelles
<b>Membre :</b>	<b>Jean-Charles DECONNINCK</b>	Président Generix Group
<b>Directeur :</b>	<b>Slim HAMMADI</b>	Professeur, École Centrale de Lille
<b>Co-encadreur</b>	<b>Hayfa Zgaya</b>	HDR, MCU, Université Lille 2

Thèse préparée dans le laboratoire CRIStAL UMR 9189 à l'École Centrale de Lille.  
École doctorale SPI 072 (EC Lille)

**PRES Université Lille Nord-de-France**

*"La science a-t-elle promis le bonheur, je ne le crois pas. Elle a promis la vérité et la question est de savoir si l'on fera jamais du bonheur avec la vérité".*

*Émile Zola*

# Remerciements

Je tiens à remercier en tout premier lieu mon directeur de thèse Monsieur Slim HAMMADI, Professeur à l'École Centrale de Lille, de m'avoir accueillie, soutenue, encouragée et encadrée tout au long de cette thèse, de m'avoir permis de travailler sur un sujet passionnant et innovant, d'avoir cru en mes capacités et de m'avoir ouvert de nouveaux horizons de la science et de la haute technologie.

Je remercie tout aussi chaleureusement Madame Hayfa ZGAYA, maître de conférences à la faculté d'Ingénierie et Management de la Santé à l'Université de Lille 2 et co-encadrante de cette thèse, pour sa présence, son accompagnement, son encouragement, sa perspicacité et son soutien scientifique.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude et mon plus grand respect au Professeur Aziz MOUKRIM, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider ce jury.

J'adresse aussi mes vifs remerciements au Professeur Abdellah EL MOUDNI, Professeur à l'Université de Belfort-Montbéliard et au Professeur Alassane B NDDIAYE, Professeur à l'Université Libre de Bruxelles, qui m'ont fait le grand honneur d'accepter de rapporter cette thèse. Je les remercie infiniment pour le temps consacré à cet effet en dépit de toutes les responsabilités qu'ils ont.

Je souhaite remercier tout particulièrement Monsieur Jean-Charles DECONNINCK, Président Generix Group, pour avoir évalué ce travail et accepté de participer au jury de cette thèse.

Je remercie également tous les professeurs avec qui j'ai travaillé en tant qu'ATER à l'École Centrale de Lille et plus particulièrement Mr. Hervé Camus, Mr. Thomas Bourdeaud'huy, Mr. Didier Corbeel, Mr. Khaled Mesghouni et Mr. Christian Vercauter.

Mes remerciements vont bien évidemment à l'ensemble du personnel du LAGIS : Mireille pour le joli dessin, Bernard Ch'nard, Christine, Patrick, Gilles, Hilaire, Jacques, Fred et Brigitte.

Un grand merci à toutes les personnes rencontrées au 3<sup>ème</sup> étage du bâtiment C de l'École Centrale de Lille et grâce à qui mon expérience à Lille fut exceptionnelle : Hassan, Laurentieu, Mayank, Noex, Qi, Zora, Matteo, Emmanuel et Maria. Mon quotidien était simple et apaisant grâce aux petits moments partagés avec eux.

Mes remerciements s'adressent également à mes voisins du bureau et collègues de l'équipe OSL lors de ces trois dernières années: Astrid, Ayoub, Carmine, Akram, Ran, Karama, Ayda,

Ismael, Lotfi, Faten, Anne Sophie et Sondes qui m'ont permis de travailler dans une ambiance à la fois studieuse et chaleureuse.

Ces années passées au LAGIS et à Lille n'auraient jamais été aussi agréables sans Wided dont la compagnie et la présence m'ont enrichi, réconforté et apporté une énergie positive au quotidien.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans la présence, l'amour et les encouragements de mon époux Walid.

Je voudrais remercier vivement tonton René pour sa présence, son soutien et pour le temps qu'il m'a consacré et me consacre encore.

Mes remerciements vont aussi à ma belle-famille et à ma famille, mes oncles et mes tantes et plus particulièrement Khalti Halouma, mes cousins et mes cousines en particulier mes chers Youssef, Yasmine et Emna.

Je remercie également tous mes enseignants durant mon parcours scolaire et universitaire, mes amis et tous ceux qui m'ont encouragé, soutenu et aidé à réaliser mon rêve.

Les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection et ma reconnaissance infinie à ma sœur Maroua, mon frère Wissem et mes parents Najet et Ismail, sans qui, ce travail n'aurait pas pu arriver à terme. Leur présence, leur confiance, leur tendresse, leur amour me portent et me guident tous les jours. Merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie cette thèse à ma grand-mère Chhiba, mon grand-père Mohsen et à la mémoire de ma grand-mère Douja, de mon grand-père Houcine, de mon oncle Zine et de khali Ahmed.

Je tourne une page et j'en ouvre une autre: vivement la suite!

# Table des matières

Index des Figures.....	7
Index des tableaux.....	9
Introduction générale.....	11
CHAPITRE I. Nouvelles technologies en logistique des entrepôts.....	14
I.1 Introduction.....	15
I.2 La logistique : définitions et domaines.....	15
I.2.1 Définition de la logistique.....	15
I.2.2 Domaines de la logistique.....	17
I.3 La logistique des entrepôts.....	18
I.3.1 Présentation des entrepôts.....	18
I.3.2 Le système de gestion des entrepôts (WMS).....	18
I.3.2.1 Fonctionnalités du WMS.....	19
I.3.2.2 Objectif du WMS.....	20
I.3.3 La préparation des commandes et les techniques de picking existantes.....	21
I.3.3.1 La préparation des commandes.....	21
I.3.3.2 Les modes de préparation de commandes.....	23
I.3.3.3 Les techniques de préparations de commandes.....	24
I.4 La gestion des entrepôts.....	26
I.5 Application des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) dans la logistique.....	30
I.6 Technologies existantes et innovation technologique.....	31
I.6.1 Localisation de l'opérateur : Géolocalisation indoor.....	31
I.6.2 Localisation de l'opérateur : Vérification de la position.....	36
I.7 La Réalité Augmentée (RA).....	40
I.7.1 Définitions et principe.....	40
I.7.2 Historique et évolution de la RA.....	42
I.7.3 Domaines d'utilisation de la RA.....	43
I.8 Le potentiel de la RA dans la préparation de commandes.....	48
I.9 Choix de la problématique et positionnement.....	50
I.10 Conclusion.....	52
CHAPITRE II. Les approches de modélisation et d'optimisation au profit de la gestion des entrepôts.....	53
II.1 Introduction.....	54
II.2 Méthodes de modélisation.....	54
II.2.1 Outil UML.....	54
II.2.1.1 Diagrammes structurels.....	55
II.2.1.2 Diagrammes comportementaux.....	56
II.2.2 Approche SMA.....	57
II.2.2.1 Agent : Définitions et particularités.....	58
II.2.2.1.1 Définitions.....	58
II.2.2.1.2 Caractéristiques.....	59
II.2.2.2 Les systèmes multi-agents.....	60
II.2.2.3 L'apport et l'intérêt des SMA dans les entrepôts.....	61
II.2.2.4 Application des SMA dans les entrepôts.....	62
II.3 Approche d'optimisation.....	63
II.3.1 Quelques concepts.....	64
II.3.1.1 Définition d'un problème d'optimisation.....	64
II.3.1.2 La notion d'algorithme.....	64

II.3.1.3	Classification des problèmes d'optimisation.....	65
II.3.2	Problèmes classiques d'optimisation combinatoire .....	65
II.3.2.1	Définition d'un problème de voyageur de commerce .....	66
II.3.2.2	Étude de la complexité (convergence de l'algorithme/ PVC normal à multiple).....	67
II.3.3	Heuristiques et méta heuristiques.....	68
II.3.3.1	Algorithme de Lin-Kernighan .....	69
II.3.3.2	Les algorithmes génétiques .....	70
II.3.3.3	Algorithme de colonies de fourmis (Ant System).....	71
II.3.4	Méthodes exactes .....	72
II.3.4.1	La méthode par séparation-évaluation (branch & bound).....	72
II.3.4.2	La programmation linéaire .....	73
II.3.5	Applications de quelques approches d'optimisation dans les entrepôts .....	74
II.4	L'alliance entre les SMA et l'optimisation dans le domaine de la logistique.....	75
II.5	Travaux antérieurs et positionnement .....	76
II.6	Conclusion.....	80
CHAPITRE III.	L'alliance entre les Systèmes Multi-Agents et l'Optimisation pour l'aide à la gestion et la préparation de commandes dans les entrepôts .....	82
III.1	Introduction .....	83
III.2	Système d'aide à la gestion des entrepôts à base d'agents.....	83
III.2.1	Architecture multi-agents proposée .....	83
III.2.2	Comportement détaillé des agents.....	85
III.2.2.1	Agent Interface AI.....	85
III.2.2.2	Agent Identificateur AIId .....	86
III.2.2.3	Agent Optimisateur AO .....	86
III.2.2.4	Agent Mobile AM .....	87
III.2.2.5	Agent Analyse des manquants A2M.....	88
III.2.3	Diagrammes représentant le fonctionnement global détaillé du système .....	88
III.2.3.1	Diagramme de séquence (Aspect dynamique).....	89
III.2.3.2	Diagramme d'activité à couloir (comportements interconnectés des agents).....	90
III.2.3.3	Diagramme de classe (aspect statique).....	92
III.3	Approches et algorithmes d'optimisation proposés .....	92
III.3.1	Notations .....	93
III.3.2	L'algorithme de picking proposé .....	94
III.4	Méthode évolutionnaire proposée .....	95
III.4.1	L'algorithme mémétique .....	96
III.4.2	Fonction Fitness d'évaluation .....	98
III.4.3	Les opérateurs génétiques adoptés .....	99
III.3.4.1	Opérateur de croisement.....	99
III.3.4.2	Opérateur de correction .....	100
III.3.4.3	Opérateur de mutation .....	102
III.3.4.4	Opérateur de recherche Locale.....	102
III.4.4	Convergence des algorithmes évolutionnaires .....	104
III.4	Apport des lunettes à RA dans l'optimisation de la préparation de commandes ...	105
III.5	Conclusion.....	106
CHAPITRE IV.	La RA pour la coordination de la préparation des commandes dans les entrepôts.....	108
IV.1	Introduction .....	109
IV.2	Architecture à trois couches .....	109

IV.3	Protocole de négociation pour la gestion des situations de perturbation dans les entrepôts .....	112
IV.3.1	Définition Protocole de négociation.....	112
IV.3.2	Méthodologies de négociation pour le traitement des commandes.....	114
IV.3.2.1	Négociation à délai fixe.....	114
IV.3.2.2	Méthodologie de négociation pour le traitement des commandes dans un entrepôt.....	115
IV.3.3	Protocole de négociation proposé .....	116
IV.4	Architecture générale du déploiement du système proposé .....	117
IV.5	Les technologies d'Interfaçage Homme-Technologie dans les entrepôts .....	121
IV.5.1	Les Head-Up displays .....	122
IV.5.2	Les technologies d'affichage et le suivi (Tracking) .....	122
IV.5.3	Le principe du rendu et des augmentations .....	123
IV.5.4	Lunettes à RA utilisées.....	126
IV.5.4.1	Lunettes monoculaires : Laster Technologies .....	126
IV.5.4.2	Lunettes binoculaires Epson.....	126
IV.5.5	L'organisation de l'affichage pour un HUD .....	127
IV.6	L'IHM du système .....	131
IV.7	L'interfaçage avec le WMS.....	134
IV.7.1	Présentation du WMS de Generix .....	134
IV.7.2	L'affichage des informations .....	138
IV.7.3	L'utilisation des QR Codes dans les entrepôts.....	141
IV.8	Conclusion.....	141
CHAPITRE V.	Simulations et Résultats .....	142
V.1	Introduction .....	143
V.2	Choix de la plateforme multi-agent.....	143
V.3	Outils et paramètres .....	145
V.4	Simulations et résultats.....	147
V.4.1	Comportement de l'agent AId.....	147
V.4.2	Comportement de l'agent AO .....	149
V.4.2.1	Approche exacte pour le processus de picking/putting mono-clients .....	149
V.4.2.2	L'approche évolutionnaire pour le processus de picking/putting multi-clients.....	152
V.4.3	Comportement de l'agent AM: Processus de picking avec RA .....	159
V.4.3.1	Architecture générale de RASL .....	160
V.4.3.2	Communication du système avec le WMS.....	160
V.4.3.3	Les prototypes de RASL .....	161
V.4.3.3.1	Le serveur RASL .....	161
V.4.3.3.2	Scénario de préparation de commandes avec les lunettes de Laster ...	163
V.4.3.3.3	Scénario de préparation de commandes avec les lunettes d'Epson .....	164
V.4.3.3.4	Scénario de préparation de commandes avec affichage de les images des produits.....	166
V.4.3.4	Générateur de QR Codes.....	167
V.5	Conclusion.....	168
Conclusion générale	.....	169

## Index des figures

Figure I-1. Exemple de chaîne logistique [3] .....	16
Figure I-2. Répartition typique du temps d'un préparateur de commandes .....	22
Figure I-3. Pick and Pack .....	24
Figure I-4. Classification des systèmes de préparation de commandes [20].....	29
Figure I-5. Bat Ultrasonic Location System.....	32
Figure I-6. L'impact des chaussures sur le sol [24] .....	33
Figure I-7. Plaque de pression [24] .....	33
Figure I-8. WiFi.....	34
Figure I-9. Accéléromètre .....	34
Figure I-10. RFID.....	35
Figure I-11. Marqueur .....	36
Figure I-12. QR Code.....	37
Figure I-13. Représentation d'un QR Code .....	38
Figure I-14. Comparaison entre un QR Code et un code barre [26] .....	39
Figure I-15. Niveaux d'erreur dans un QR Code.....	39
Figure I-16. QR Code abimé-QR Code arraché .....	40
Figure I-17. Continuum réalité-virtualité, réalité mixte .....	41
Figure I-18. Traitement d'image utilisé dans ARToolKit [32].....	42
Figure I-19. Statistiques sur l'utilisation de la RA .....	44
Figure I-20. Affichage tête haute ou Head-Up Display (HUD) .....	44
Figure I-21. Exemple d'outils développés par l'IRCAD .....	45
Figure I-22. Utilisation de la RA en navigation .....	47
Figure I-23. La RA à l'intérieur des entrepôts .....	49
Figure I-24. Étude sur les avantages de la RA .....	49
Figure II-1. Différents diagrammes d'UML .....	55
Figure II-2. Graphe du problème.....	67
Figure II-3. Matrice du problème .....	67
Figure II-4. Vecteur de dimension n contenant les villes visitées.....	67
Figure II-5. 2-opt move [87] .....	70
Figure II-6. Les étapes d'un algorithme génétique .....	71
Figure II-7. Des fourmis suivant une piste de phéromone [90] .....	71
Figure II-8. Classification des méthodes de résolution [92] .....	74
Figure II-9. Approches d'optimisation de la préparation de commandes [100].....	77
Figure II-10. Les stratégies de routing [19].....	78
Figure III-1. Architecture du système .....	85
Figure III-2. Comportement de l'agent AI.....	86
Figure III-3. Comportement de l'agent AId.....	86
Figure III-4. Comportement de l'agent AO .....	87
Figure III-5. Comportement de l'agent AM .....	88
Figure III-6. Comportement de l'agent A2M .....	88
Figure III-7. Diagramme de séquence .....	89
Figure III-8. Diagramme d'activités à couloir .....	91
Figure III-9. Diagramme de classe .....	92
Figure III-10. Disposition des opérateurs et des articles dans un entrepôt .....	95
Figure III-11. Schéma d'un algorithme mémétique.....	97
Figure III-12 : Chromosome non viable.....	101
Figure III-13 : Chromosome enfant viable après correction .....	102
Figure III-14 : Exemple de mutation.....	102
Figure III-15. Principe de la recherche locale .....	103

Figure IV-1. Architecture A3C-2SL pour l'optimisation des Systèmes Logistiques .....	110
Figure IV-2. Catégories des négociations et des décisions utilisées par les agents .....	113
Figure IV-3. Protocole de négociation proposé .....	117
Figure IV-4. Architecture de déploiement informatique du système proposé .....	118
Figure IV-5. Processus de préparation de commandes .....	120
Figure IV-6. Briques d'un système de RA [110] .....	123
Figure IV-7 RA en vision indirecte (video see-through) [121].....	124
Figure IV-8. RA en vision directe (optical see-through) [121].....	124
Figure IV-9. Microsoft Hololens®.....	125
Figure IV-10. La technologie EnhancedView.....	126
Figure IV-11. Champ de vision.....	128
Figure IV-12. Traitement de l'information en fonction de sa localisation dans le champ visuel [123] .....	129
Figure IV-13. Principe de présentation informationnelle périphérique respectant la latéralité périphérique du champ de vision (œil gauche en rouge, œil droit en bleu) [126][127].....	130
Figure IV-14. Exemple de gant de données [128].....	131
Figure IV-15. Exemple d'une table interactive.....	131
Figure IV-16. Lunettes à RA commercialisées par l'entreprise Laster .....	132
Figure IV-17. Lunettes EPSON .....	132
Figure IV-18. Utilisation des QR Codes .....	133
Figure IV-19. Connexion au WMS .....	135
Figure IV-20. Page d'accueil du WMS.....	135
Figure IV-21. Création d'un opérateur .....	136
Figure IV-22. Stockage d'un produit .....	137
Figure V-1. Jade RMA .....	145
Figure V-2. Communication des agents .....	146
Figure V-3. Interface de connexion au démonstrateur .....	147
Figure V-4. Table des ressources .....	147
Figure V-5. Table des types de ressources .....	148
Figure V-6. Affectation d'une commande à une ressource de type simple .....	148
Figure V-7. Affectation d'une commande à une ressource de type double.....	149
Figure V-8. Disposition des articles et des opérateurs pour un picking/putting mono-client	149
Figure V-9. Résultat sur la console du choix du meilleur opérateur et meilleur article.....	150
Figure V-10. Graphe pour un picking/putting mono-client .....	151
Figure V-11. Histogramme des distances de picking/putting pour un processus de picking mono-client.....	152
Figure V-12. Disposition des opérateurs en début de journée .....	153
Figure V-13. Affichage des emplacements des articles à partir de la table Article .....	153
Figure V-14. Résultat sur la console pour le choix du premier article.....	154
Figure V-15. Graphe pour un parcours mono-client .....	155
Figure V-16. Table des commandes.....	156
Figure V-17. Disposition des articles dans l'entrepôt.....	156
Figure V-18. Emplacement des articles dans l'entrepôt pour la mission de l'opérateur 1.....	157
Figure V-19. Parcours de préparation de commandes pour l'opérateur 1 .....	157
Figure V-20. Emplacement des articles dans l'entrepôt pour la mission de l'opérateur 2.....	158
Figure V-21. Parcours de préparation de commandes pour l'opérateur 2 .....	158
Figure V-22. Emplacement des articles dans l'entrepôt pour la mission de l'opérateur 3.....	158
Figure V-23. Parcours de préparation de commandes pour l'opérateur 3 .....	159
Figure V-24. Histogramme des distances de picking/putting pour un processus de picking multi-client .....	159

Figure V-25. Architecture du système RASL .....	160
Figure V-26. Lancement du serveur .....	161
Figure V-27. Envoi d'une commande .....	162
Figure V-28. Opération de picking .....	162
Figure V-29. Plusieurs utilisateurs connectés au serveur .....	162
Figure V-30. Identification de l'opérateur .....	163
Figure V-31. Les flèches guidant l'opérateur lors de sa mission de picking .....	164
Figure V-32. Détection du bon casier pour la prise du produit .....	164
Figure V-33. Identification de l'opérateur .....	165
Figure V-34. Menu .....	165
Figure V-35. Affichage des flèches pour le parcours de picking .....	165
Figure V-36. Validation du picking .....	166
Figure V-37. Affichage de l'image du produit et de la quantité .....	166
Figure V-38. Générateur de QR Codes .....	167
Figure V-39. Zebra Crossing .....	167

## Index des tableaux

Tableau I-1 : Différents domaines de la logistique .....	17
Tableau II-1 : Nombre de possibilités de chemins et temps de calcul en fonction du nombre de villes (on suppose qu'il faut 1 micros pour évaluer une possibilité) [88] .....	68
Tableau III-1 : Exemple de chromosome .....	98
Tableau IV-1. Comparaison entre les lunettes Laster et Epson .....	127
Tableau IV-2. Répartition schématique des performances latéralisées [124] .....	129
Tableau IV-3. Comparaison entre les champs visuels gauche et droit .....	130
Tableau IV-4. Les principales informations échangées pour une demande de travail .....	138
Tableau IV-5. Mode d'affichage des informations .....	140
Tableau V-1. Résultat d'affectation d'une commande mono-client à l'opérateur .....	151
Tableau V-2. Comparaison des résultats obtenus pour une préparation de commande mono-client .....	151
Tableau V-3. Commande optimisée affectée à l'opérateur .....	155

# Glossaire

<b>SMA</b>	Système Multi-Agent
<b>IAD</b>	Intelligence Artificielle Distribuée
<b>IA</b>	Intelligence Artificielle
<b>WMS</b>	Warehouse System Management
<b>TMS</b>	Transport System Management
<b>YSM</b>	Yard System Management
<b>RA</b>	Réalité Augmentée
<b>NTIC</b>	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
<b>RM</b>	Réalité Mixte
<b>VA</b>	Virtualité Augmentée
<b>SAD</b>	Système d'Aide à la Décision
<b>CL</b>	Chaîne Logistique
<b>PVC</b>	Problème de Voyageur de Commerce
<b>PVCMD</b>	Problème de Voyageur de Commerce Multiple et Dynamique
<b>AI</b>	Agent Interface
<b>AId</b>	Agent Identificateur
<b>AO</b>	Agent Optimisateur
<b>AM</b>	Agent Mobile
<b>A2M</b>	Agent Analyse des manquants
<b>A3C-2SL</b>	Architecture à 3 Couches au Service des Systèmes Logistiques
<b>IdO</b>	Internet des Objets
<b>ARes</b>	Agent Ressource
<b>AS</b>	Agent Support
<b>ADS</b>	Agent Demande Session
<b>RS</b>	Request Session
<b>AOSMA</b>	Alliance Optimisation et Système Multi-Agent
<b>RASL</b>	Réalité Augmentée au Service de la Logistique
<b>IHM</b>	Interface Homme Machine
<b>HUD</b>	Head-Up Displays

## Introduction générale

La fonction logistique au sein des entreprises a commencé à s'imposer voilà seulement trois décennies, étendant son champ d'action de la gestion opérationnelle des flux de marchandises à celle des flux physiques comme des flux d'informations. Au fil du temps, elle se modifie en assurant de plus en plus un rôle de pilotage et s'inscrit désormais dans une recherche d'optimisation globale participant directement à la performance de l'entreprise.

La planification d'un système logistique distribué s'avère donc un processus complexe impliquant plusieurs contraintes parmi lesquelles la coopération entre les différentes entités organisationnelles du système, la prise en considération de la diversité de la nature du produit acheminé, la catégorie des clients ciblés et les caractéristiques de la zone géographique desservie.

Le but des travaux de recherche présentés dans cette thèse est de proposer une approche qui doit pouvoir répondre, d'une part, au besoin de coordination des différentes entités d'un même système logistique distribué sur différentes zones ; d'autre part, au besoin d'autonomie de ces zones et leur capacité de faire face aux événements imprévus. Aujourd'hui, la plupart des applications nécessitent de distribuer des tâches entre des "entités" autonomes (ou semi-autonome) afin d'atteindre leurs objectifs d'une manière optimale.

Puisque les approches classiques sont en général monolithiques et leur concept d'intelligence est centralisé, les applications actuelles sont établies à base de système multi-agents.

Les Systèmes Multi Agents (SMA) et les agents autonomes fournissent donc une nouvelle méthode pour analyser, designer et implémenter des applications sophistiquées car ils font partie du domaine de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) en bénéficiant aussi d'autres disciplines comme les sciences cognitives, sociologie, et psychologie sociale. L'utilisation des agents mobiles en particulier, peut nous garantir une adaptation dynamique à l'environnement, une robustesse ainsi qu'une tolérance aux fautes.

La notion d'organisation a toujours été dépendante de la notion de tâche ou de celle d'échange d'informations. Cette notion d'organisation d'acteurs distribués est très étudiée dans le domaine de l'Intelligence Artificielle (IA) et plus particulièrement dans celui de l'IAD s'intéressant particulièrement à la modélisation du comportement des entités intelligentes distribuées dans un environnement [1].

Parmi les différents domaines de la logistique, nous nous intéressons à la logistique de distribution dont la gestion des entrepôts est l'une des activités principales. Pendant des années, les gestionnaires d'entrepôts ont été invités à prendre le contrôle des opérations à

l'intérieur de l'entrepôt. Ce qui a permis de passer des opérations manuelles à base de papier à des techniques plus développées améliorant la productivité des entrepôts: des systèmes sans fil de collecte de données en temps réel et les systèmes logiciels pour la Supply Chain Execution tels que les systèmes de gestion des entrepôts (WMS), les systèmes de gestion du transport (TMS), les systèmes de gestion de la cour (YMS) etc.

Ces travaux de recherche sont menés dans le cadre d'un contrat industriel signé entre l'École Centrale de Lille et Generix Group qui vise à réaliser un système d'aide aux déplacements des opérateurs dans les entrepôts.

Le but de cette thèse consiste à améliorer le travail des opérateurs lors de la préparation des commandes en proposant des approches de modélisation et d'optimisation à base d'agents communicants utilisant des lunettes connectées à base de Réalité Augmentée (RA).

La préparation de commandes est l'une des fonctions principales assurée par les entrepôts. L'optimisation de cette tâche permet de gagner en productivité et d'améliorer la qualité de service en réduisant le temps de parcours d'un préparateur de commandes. La majorité des entrepôts utilise la reconnaissance vocale pour assurer le bon déroulement de la mission du préparateur. Mais, cette technique commence déjà à faire l'objet de plusieurs critiques. En effet, elle ne s'adapte pas à tous types d'environnements puisqu'il est difficile d'utiliser le pick-by voice dans les entrepôts bruyants. En plus, il s'agit d'une technique qui empêche le préparateur de commande de travailler les mains libres.

Afin de révolutionner le processus de la préparation de commandes et d'apporter plus de confort à l'opérateur, un système de guidage fondé sur la Réalité Augmentée, autrement dit l'incrustation d'images 3D dans un environnement réel, est capable de remédier aux lacunes des techniques utilisées actuellement dans les entrepôts.

Les travaux de recherche présentés sont donc basés sur une alliance entre les Systèmes Multi-Agent et l'optimisation intégrant la technologie des lunettes connectées à Réalité Augmentée pour le pilotage et le guidage de l'opérateur lors de sa mission de picking ou putting.

Le présent rapport est organisé en 5 chapitres comme suit :

1. Dans le premier chapitre, nous élaborons une étude générale sur la gestion des entrepôts. Nous définissons les notions de la préparation de commandes et du système de gestion des entrepôts (WMS). Nous présentons également les nouvelles technologies intégrées dans les entrepôts ainsi que la notion de réalité augmentée et son potentiel dans le processus de picking et putting.

2. Le chapitre 2 sera consacré à un état de l'art général sur les systèmes multi-agents et les méthodes d'optimisation ainsi que leur apport dans la gestion des entrepôts.

3. Dans le chapitre 3, nous présenterons notre approche d'optimisation pour la mise en œuvre d'un système d'aide à la gestion des entrepôts à base d'agents communicants.

4. Le chapitre 4 sera consacré à la présentation de notre architecture à 3 couches connectée au WMS et intégrant les différentes approches proposées. Nous expliquons également le protocole de négociation proposé pour la gestion des perturbations.

5. Dans le dernier chapitre, nous présentons des scénarii d'utilisation du système adopté pour démontrer l'efficacité des solutions proposées.

# **CHAPITRE I.   Nouvelles technologies en logistique des entrepôts**

## **I.1 Introduction**

Il y a quelques années, la logistique était considérée comme une fonction secondaire dans l'entreprise. Le rôle des logisticiens, se limitait à l'organisation matérielle des transports de matières premières ou de produits finis, et même si des sommes considérables étaient en jeu, on ne voyait guère la nécessité de procéder à une réflexion et à une analyse globale portant sur l'ensemble des flux internes ou externes de l'entreprise.

La crise économique et une productivité de plus en plus féroce imposées aux entrepreneurs, ont accéléré l'évolution de la fonction, devenue une des clés fondamentales de la compétitivité des entreprises. De ce fait, les décideurs ont maintenant pris conscience des multiples enjeux de cette fonction.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes intéressés à la logistique des entrepôts et plus particulièrement à l'étude des tâches les plus importantes dans ce domaine, à savoir la préparation des commandes en mode « pick » ou « put ». En effet, nous nous sommes concentrés sur cette fonctionnalité afin d'optimiser le déplacement des opérateurs lors de la préparation de commandes dans le but d'améliorer la productivité et de réduire les erreurs de picking.

Dans ce chapitre, nous définissons en premier abord les notions de la logistique en général et la logistique des entrepôts en particulier y compris le système de gestion des entrepôts (WMS), la préparation des commandes et les différentes techniques de picking existantes permettant d'assurer cette tâche. Ensuite, nous présentons les nouvelles technologies ainsi que la notion de Réalité Augmentée (RA).

## **I.2 La logistique : définitions et domaines**

### **I.2.1 Définition de la logistique**

Le terme logistique dans son sens le plus courant, désigne « la partie de l'art militaire ayant trait aux problèmes de ravitaillement et de transports des armées » (définition du Petit Larousse). Empruntée au vocabulaire militaire, la logistique n'a été transposée que récemment à la gestion de l'entreprise où elle désigne aujourd'hui la gestion des flux au sein de l'entreprise. En 1948, le comité des définitions de l'American Marketing Association a proposé une première définition : « Mouvement et manutention de marchandises du point de production au point de consommation ou d'utilisation. ». Dans leur ouvrage « La logistique d'entreprise » Tixier et al. [2] ont proposé la définition suivante : « La logistique est le processus stratégique par lequel l'entreprise organise et soutient son activité. À ce titre, sont

déterminés et gérés les flux matériels et informationnels afférents, tant internes qu'externes, qu'amont et aval». L'Association Française pour la logistique (l'ASLOG) a défini la logistique comme suit : « L'ensemble des activités ayant pour but la mise en place au moindre coût, d'une quantité de produit, à l'endroit et au moment où une demande existe ».

La logistique est l'ensemble des méthodes et moyens relatifs à l'organisation d'une entreprise comprenant : les manutentions, les transports, les conditionnements, les approvisionnements. Elle a pour rôle d'assurer le meilleur traitement possible des marchandises et d'optimiser le stockage, le transport et la distribution aux clients. Elle correspond à l'opération qui vise à optimiser les flux dans le système productif, tant pour la distribution que pour l'industrie.

La fonction logistique comporte la gestion des flux physiques de matières premières et de produits ainsi que celle des flux d'information, c'est à dire les transports, les entrepôts, l'import-export, l'informatique, les déplacements et déménagements, etc. La logistique regroupe la logistique de distribution, de production, de soutien, de stockage et industrielle.

Actuellement, les entreprises forment de plus en plus de réseaux. Chaque réseau est constitué d'une entreprise et d'un ensemble de fournisseurs. Dans ses travaux de HDR, Lacomme [3] explique que l'activité de production est coordonnée avec la partie de distribution où les produits sont acheminés par un sous-traitant jusqu'aux magasins ou bien directement jusqu'aux consommateurs.

Les entrepôts sont utilisés comme étant des réseaux de distribution complexes dans cette activité de distribution. Cette chaîne constituée de l'usine et d'un réseau de distribution est la chaîne logistique [3] (Figure I.1).

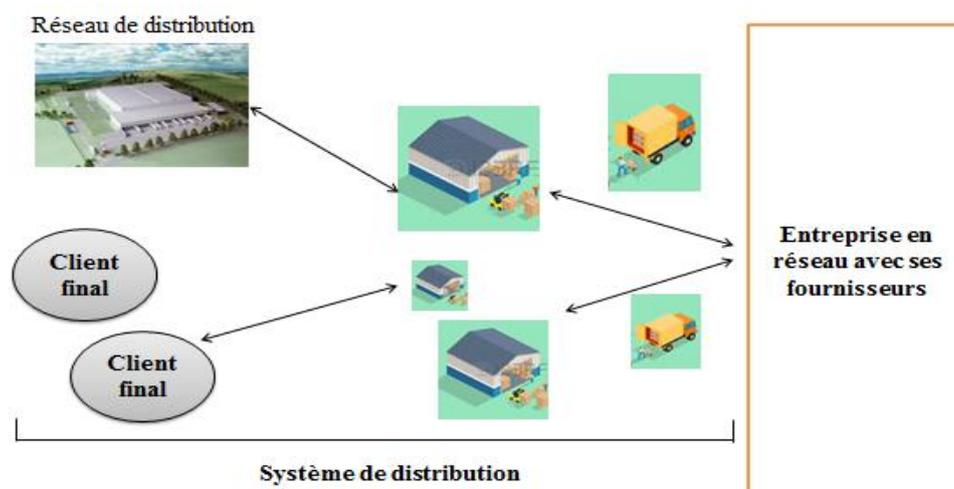


Figure I-1. Exemple de chaîne logistique [3]

La notion de chaîne logistique ou supply chain a réussi à regrouper tous les différents domaines de la logistique. En effet, la chaîne logistique est l'ensemble de l'organisation et des

processus qui a pour but de fournir le bon produit, au bon moment, au bon endroit à un client. Elle intègre les flux d'information, les infrastructures et l'organisation globale de l'entreprise et les processus d'achat-approvisionnement, de production, de distribution et de gestion après-vente.

Rota [4] a donné la définition suivante : «La chaîne logistique est l'ensemble des entreprises qui interviennent dans le processus de fabrication, de distribution et de vente de produit du premier des fournisseurs au client ultime ». Lee et al. [5] ont défini la chaîne logistique comme suit : «La chaîne logistique est un réseau d'installation qui assure la fonction d'approvisionnement de matière première, de transformation de ces critères en produit intermédiaire et fini et de distribution du produit fini au client ».

La chaîne logistique regroupe les maillons relatifs à la logistique d'approvisionnement contenant l'achat, l'approvisionnement, la gestion des stocks, le transport, la manutention. L'optimisation de la supply chain présente un défi pour l'industrie et la distribution. Elle peut être évaluée selon différents critères telles que le contrôle de l'information, des flux physiques ou des coûts physiques ou encore selon le critère d'aide à la décision.

## I.2.2 Domaines de la logistique

Tixier et al. [2] ont proposé un tableau retraçant les différents domaines de la logistique.

Tableau I-1 : Différents domaines de la logistique

Fonction logistique			
Fonction logistique	Logistique de produit	Approvisionnement des matières premières	Logistique industrielle
		Transport des matières premières	
		Gestion de production	
		Transport de produits finis	Logistique de stockage
		Stockage des produits finis	
		Approvisionnement des plates-formes de distribution	
	Logistique de soutien	Transport commande de détail	Logistique de distribution
		Stockage commande de détail	
		Distribution de détail	
		Après-vente	

## **I.3 La logistique des entrepôts**

### **I.3.1 Présentation des entrepôts**

Le ministère de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (Mars 2010) a défini les entrepôts comme suit : « On appelle entrepôt un bâtiment dans lequel les marchandises sont stockées plus de 24 heures. Ces entrepôts sont munis d'étagères (racks) pour le rangement des palettes ou des colis. »

Une autre définition a été donnée par le Harper [6] : « *Un entrepôt est une installation de stockage qui reçoit des biens et produits pour la distribution éventuelle aux consommateurs, ou d'autres entreprises. Un entrepôt peut aussi être appelé un centre de distribution, de gestion d'entrepôt est le processus de coordination des marchandises entrantes, le stockage ultérieur et le suivi des marchandises, et enfin, la distribution des marchandises à leurs destinations appropriées.* »

### **I.3.2 Le système de gestion des entrepôts (WMS)**

Les systèmes logiciels sont utilisés pour soutenir les processus d'entreposage. Le WMS a commencé comme un système de contrôle de stocks « Inventory Control Systems ». Maintenant, il inclut beaucoup plus de fonctionnalités. La préparation des commandes, qui est un processus de récupération de produits stockés répondant à une requête spécifique d'un client, est considérée comme une fonction de base du WMS [7].

Les expériences montrent que la moitié de la charge totale de l'exploitation de l'entrepôt est dépensée par la préparation des commandes dont la complexité et l'intensité du travail sont grandes [8].

Un WMS est un système informatique d'information de préparation, de suivi et d'exécution des activités en entrepôt de nature transactionnelle. Il est disponible depuis les premiers systèmes informatiques où il assurait les simples fonctionnalités pour l'emplacement de stockage. Ils peuvent inclure une technologie complexe, comme l'identification par radiofréquence (RFID) et la reconnaissance vocale. Cependant, le principe de base du système d'entrepôt a demeuré le même, ce qui est de fournir des informations pour permettre un contrôle efficace de la circulation des matériaux à l'intérieur d'un l'entrepôt.

Les améliorations en matière de WMS conduisent dans la très grande majorité des cas à augmenter la satisfaction des clients grâce à la réduction des délais et grâce à des livraisons fiables à 100 %, ainsi qu'à une meilleure productivité (une utilisation des ressources

d'entreposage, une réduction des stocks et une productivité améliorée). Les entreprises utilisant ce type d'outils sont de plus en plus nombreuses.

### **I.3.2.1 Fonctionnalités du WMS**

Les différentes fonctionnalités du WMS présentées par Generix Group<sup>1</sup> sont les suivantes :

- Réception : C'est une fonctionnalité qui prend en charge l'entrée de marchandises dans le dépôt. Elle offre une grande variété de scénarios en fonction de la nature et l'importance du flux à traiter. En liaison avec la gestion des emplacements, elle permet d'assurer une parfaite synchronisation entre les saisies administratives et le stockage.

- Stockage : La fonction première d'un stock est de constituer un "réservoir" permettant de combler les différences entre flux amont et aval. Il contribue à la régularisation de la production et du cycle de distribution et évite les ruptures. Il offre l'avantage de la flexibilité vis à vis de la demande, donc la maîtrise des délais de livraison.

- Intégration système : La plate-forme d'intégration EAI (Enterprise Application Integration), EDI<sup>2</sup> (Electronic Data Exchange) constitue l'interface entre le WMS et le SI (système d'information) du donneur d'ordre. De plus, l'intégration des partenaires EDI est facilitée par l'utilisation des messages préconfigurés pour tous les standards et normes européennes et internationales. Sa mise en place est rapide et peu coûteuse.

- Préparation : La gestion des préparations assure les opérations depuis la prise en compte des commandes à livrer jusqu'à la mise à disposition des marchandises préparées sur les quais d'expédition. De nombreuses simulations de charges sont disponibles dans les logiciels Infolog<sup>3</sup>, ainsi qu'un suivi en temps réel de l'avancement du travail.

- Pilotage et reporting : Véritable "tour de contrôle" de l'entrepôt, les tableaux de bord permettent de superviser l'activité logistique de façon synthétique et détaillée. Des logiciels fournissent les indicateurs clés standards, nécessaires à la mesure de la performance sur les trois axes majeurs: KPI Qualité, KPI Productivité, KPI Taux de service. Dans son ouvrage, Les nouveaux tableaux de bords des managers, Fernandez a défini les indicateurs comme suit : « *Un indicateur de performance KPI est une mesure ou un ensemble de mesures braquées sur un aspect critique de la performance globale de l'organisation.* »[9].

---

<sup>1</sup> <http://www.generixgroup.com/fr/>

<sup>2</sup> Échange de données informatisées

<sup>3</sup> Infolog WMS est le progiciel de référence de gestion d'entrepôt adopté par la majorité des distributeurs et des prestataires logistiques sur la France.

- Traçabilité: Obligation légale présente tout au long de l'ensemble des process logistiques de l'entrepôt. Ça permet de visualiser l'ensemble des événements survenus sur un article, un lot ou un emplacement et ceci en termes de traçabilité tant administrative que physique.

- Inventaire: L'inventaire est une obligation légale selon laquelle chaque référence d'un entrepôt, magasin ou parc doit être comptée au moins une fois dans l'année. L'inventaire permanent augmente la justesse du stock au jour le jour et permet ainsi d'éviter les erreurs de préparation.

- Expédition: Phase finale avant la sortie de la marchandise de l'entrepôt, la gestion des livraisons offre les fonctionnalités nécessaires au contrôle des marchandises préparées et au chargement des véhicules. Elle permet d'ultimes ajustements des tournées avant le départ des camions.

- Portails collaboratifs: Les donneurs d'ordres ou leurs partenaires (les transporteurs par exemple) accèdent aux informations du WMS via un portail web. Les données à valeur ajoutée accessibles: la commande, le niveau de stocks, la commande de livraison, l'approvisionnement, les retours et tout cela en temps réel.

### **I.3.2.2 Objectif du WMS**

La gestion informatique de l'entrepôt a pour objectif de:

- Améliorer l'exploitation des moyens et des surfaces
- Améliorer la traçabilité
- Améliorer la productivité
- Éviter les erreurs de préparation
- Apporter une meilleure connaissance en quantité et en qualité

Le cabinet A22<sup>4</sup> expert en logistique, spécialiste de la gestion de la chaîne logistique, a aussi cité les objectifs suivants du WMS :

- Apporter de la rigueur pour fiabiliser les informations utiles à la gestion des stocks
- Optimiser l'espace de stockage
- Augmenter la productivité des opérations de l'entrepôt

---

<sup>4</sup> [http://www.cat-logistique.com/qui\\_est\\_a22\\_.htm](http://www.cat-logistique.com/qui_est_a22_.htm) et

<sup>4</sup> <http://supplychainmagazine.fr/TOUTE-INFO/APPELSOFFRE/CabinetsConseil8/A22-Expert-en-Logistique.pdf>

- Diminuer le taux d'erreurs picking
- Optimiser la préparation des commandes
- Fiabiliser la traçabilité
- Optimiser les processus internes (réception, rangement, préparation des commandes, expédition,...) de l'entrepôt par des fonctionnalités avancées: algorithme d'adressage, ...
- Réduire les coûts logistiques
- Facturer l'activité de prestations logistiques
- Suivre l'activité de l'entrepôt par un tableau de bord, des statistiques précises et des mesures d'écart prévus/réalisés
- Maîtriser et réduire les stocks
- Communication et échange de données externes: EDI, Web EDI (transporteurs, clients, fournisseurs, ...).

### **I.3.3 La préparation des commandes et les techniques de picking existantes**

#### **I.3.3.1 La préparation des commandes**

L'un des processus les plus importants en logistique est la préparation des commandes dont la tournée occupe 50% de la durée totale du processus de picking [6] (Figure I.2).

En effet, la figure 1 montre que le temps que peut prendre une tournée de picking est composé de plusieurs parties :

- Travel time : le temps de parcours entre les emplacements des produits à collectés, et entre ces emplacements et la zone de dépôt.
- Search time : le temps pour la recherche du bon article une fois le préparateur de la commande est en face de l'emplacement.
- Pick time : le temps pour collecter l'article de son emplacement et le poser sur la palette.
- Set-up time : le temps pour les tâches administratives (tel que la mise à jour de l'inventaire) ainsi que la dépose à quai.

La préparation de la commande consiste à permettre aux opérateurs de collecter un ensemble d'articles d'un assortiment dans un entrepôt suivant un ordre de travail. Elle correspond au rassemblement des marchandises préparés à la suite des commandes des clients [10]. Les préparateurs les délivrent ensuite à la station suivante dans un processus de flux de matières bien précis [11].

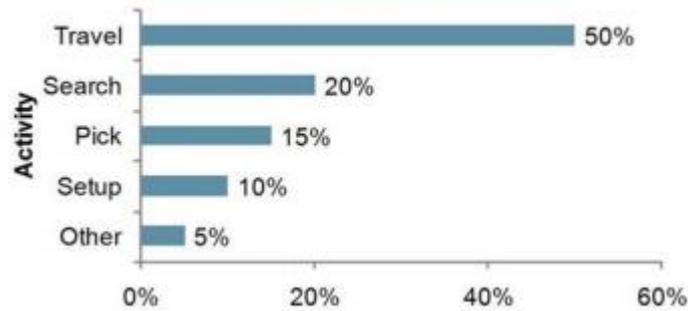


Figure I-2. Répartition typique du temps d'un préparateur de commandes

Traditionnellement, la préparation des commandes est accomplie en fournissant aux préparateurs des imprimés des listes d'une sélection d'articles, décrivant leurs positions dans l'entrepôt ainsi que la quantité à collecter.

Le processus de la préparation des commandes est composé de deux phases qui consistent à trouver le chemin de la bonne étagère et collecter (picking out) le bon colis.

Dans les systèmes logistiques à traitement manuel qui seront expliqués plus en détail dans les paragraphes suivants, l'accent est mis sur l'amélioration du processus opérationnel tout en s'intéressant à la qualité du processus et la rapidité des traitements des commandes [10].

Les processus manuels de la préparation des commandes peuvent engendrer des erreurs qui ont une forte influence sur la qualité de la livraison ainsi que la relation entre les clients et les fournisseurs. Ces défaillances ne peuvent qu'avoir un impact négatif sur la confiance des entreprises. C'est pour cette raison que réduire les erreurs de picking est l'objectif principal de ce projet.

Les préparateurs traitent les commandes avec les listes intuitives pour les opérateurs. Les systèmes modernes n'utilisent plus de papier pour la préparation des commandes. Ces systèmes nécessitant l'utilisation des appareils mobiles de saisie de données demandent un grand effort de manipulation et sont généralement connectés en ligne avec le WMS à partir duquel la commande est envoyée [10].

Dans le but d'améliorer l'efficacité et le rendement et de réduire les erreurs de picking, actuellement, les industriels utilisent deux techniques : Pick by Light et Pick by voice [11]. Ces deux techniques permettent au préparateur d'avoir les mains libres. Le Pick by Voice donne toutes les instructions à travers une sortie vocale de l'ordinateur. L'inconvénient de cette technique est qu'elle peut ne pas bien fonctionner dans les environnements industriels bruyants. Le Pick by Light offre une aide visuelle à l'opérateur en utilisant de petites lampes sur les compartiments de stockage. Mais ces systèmes sont inflexibles et coûteux [10]. Actuellement, les méthodes de guidage des préparateurs possèdent plusieurs inconvénients.

Par exemple, le Voice picking qui consiste à dicter les commandes à l'opérateur par une voix électronique peut s'avérer rapidement fatigant pour celui-ci. Une autre méthode consiste à utiliser un terminal numérique sur lequel sont affichées les commandes, mais le préparateur est obligé de le tenir et se trouve donc gêné dans son travail. C'est pourquoi nous souhaitons exploiter la RA pour obtenir une méthode plus efficace et plus confortable pour l'opérateur qui consiste en le pick-by-vision. Le but du projet est de réaliser un prototype utilisant la RA intégré dans des lunettes et communicant avec le WMS. Ce nouveau dispositif, permettra à la fois un important gain en confort pour les préparateurs de commandes et aussi un gain en productivité : les lunettes connectées permettent d'afficher d'une manière confortable dans le champ de vision de l'opérateur de nombreuses informations telles que l'itinéraire dans l'entrepôt, le nombre de colis à prélever et leurs images sans le surcharger.

Toutes les techniques existantes seront expliquées en détail dans le paragraphe suivant.

### **I.3.3.2 Les modes de préparation de commandes**

Comme nous l'avons vu précédemment, le WMS peut centraliser les différentes commandes. Souvent un préparateur ne part pas en mission pour une seule commande, cela est en effet peu productif. Pour gagner en efficacité, le WMS crée une sorte de « super commande » qui regroupe plusieurs commandes destinées à des clients différents. Le préparateur est envoyé dans l'entrepôt pour récupérer tous les objets voulus. Deux méthodes de travail existent ensuite :

- Le **pick and pack** consiste à déposer les produits dans les colis directement après leur prélèvement (Figure I.3). Le plus souvent, la zone de picking et la zone de dépose (soit un chariot qui comprend plusieurs colis à remplir, soit un tapis roulant qui traverse l'entrepôt) sont très proches l'une de l'autre. Les systèmes vocaux ne donnent actuellement les informations que séquentiellement. Ainsi, imaginons qu'un préparateur récupère trois produits identiques dans un casier donné, et doit en mettre deux dans le casier n°1 et le dernier dans le casier n°2. Le système vocal va alors lui demander d'en mettre un dans le casier n°1, et lorsque le préparateur l'aura fait, il lui redemandera d'en mettre un second dans le casier n°1. Enfin, il lui demandera de mettre le dernier dans le casier n°2.



Figure I-3. Pick and Pack

- Le **pick then pack** consiste à dispatcher les produits dès que la phase de picking est entièrement terminée. Il y a donc plus loin dans l'entrepôt une grande zone de dépôt. L'opérateur doit scanner tous les produits afin de savoir dans quels colis les déposer et avec quelle quantité.

### I.3.3.3 Les techniques de préparations de commandes

- **Pick by paper list** : L'utilisation de cette technique est simple et ne nécessite aucun investissement en termes de technologie mais ne permet pas à l'opérateur de travailler les mains libres. Avec cette technique, la productivité est faible.
- **Pick by light** : L'idée de la préparation des commandes sans papier à l'aide de terminaux (Pick by Light) consiste à donner les instructions aux manutentionnaires directement à l'emplacement de prélèvement. Pour cela, chaque emplacement est équipé d'un module électronique avec un voyant lumineux visible de très loin et d'une ou de plusieurs touches fonctionnelles. Les informations de picking sont transmises grâce à la connexion directe au logiciel de gestion des stocks ou WMS. Le voyant lumineux des terminaux s'allume aux emplacements de prélèvement. Le manutentionnaire reconnaît ainsi facilement de loin l'emplacement ainsi que le nombre d'articles qu'il doit prélever. Il confirme ensuite le prélèvement en appuyant sur la touche de confirmation et le voyant lumineux s'éteint. Le changement est aussitôt enregistré dans le logiciel de gestion et selon l'équipement des terminaux, il y a la possibilité de remédier directement aux corrections de quantité ou de procéder à l'inventaire des stocks. Cette technique qui repose sur des signaux visuels permet de réduire les erreurs ainsi que le temps de recherche. L'avantage du pick by light est de permettre à l'opérateur de garder les mains libres. Les taux d'erreurs ainsi que les dépenses de formation sont faibles avec le pick by Light. L'inconvénient de cette technologie est le fait qu'elle demande un investissement élevé. En plus, il peut y

avoir des défaillances non détectées qui pourront conduire à des erreurs d'affichage dans le picking.

- **Put by light** : Des messages lumineux guident l'opérateur pour stocker les articles. À travers ces écrans lumineux, l'opérateur peut être guidé à l'emplacement et l'affectation des commandes de stock. Il scanne son produit et le place grâce à un voyant clignotant au niveau de chaque emplacement. Dans le cadre de la thèse, nous traitons la préparation de commandes dans les deux modes qui présentent quelques différences mais sur lesquelles on applique les mêmes approches.
- **Pick by voice** : Le guidage par reconnaissance vocale des opérations logistiques est apparu il y a une dizaine d'années. Il semble monter en puissance dans l'équipement des entreprises. D'après Monsieur Christophe François, directeur commercial en France de l'américain Psion Teklogik<sup>5</sup>: « Nous avons réalisé au premier trimestre 2010, deux fois et demi notre chiffre d'affaires du premier trimestre 2009, une progression significative de l'essor de tels systèmes. »

L'article apparu en juin 2010 dans "Logistiques Magazine" intitulé « Le guidage vocal se répand dans l'entrepôt » explique comment marche la technique du guidage vocal. En fait, le préparateur est muni d'un casque à l'oreille. Il reçoit et exécute les informations relatives à la commande à effectuer (zone de prélèvement, quantité d'articles à prélever) que lui envoie le progiciel de gestion de l'entrepôt, le WMS. Puis, l'opérateur confirme oralement, en lisant un code, la prise du produit que le système enregistre aussitôt et ainsi de suite. Lors d'une première utilisation, l'opérateur doit répéter et apprendre au système le timbre de sa voix et les mots clés utilisés dans ses opérations. Cette méthode de locuteur dépendant demande un apprentissage d'une durée de 10 à 20 minutes par opérateur. Cette technique permet de garder les mains et les yeux libres. Donc, l'opérateur gagne du temps dans le déroulement de ses actions en s'affranchissant de scanner les produits par radiofréquence ou de noter son opération sur le bon de préparation. D'après Olivier Legros<sup>6</sup>: « Après l'application historique de la préparation des commandes associée au chargement des camions, ont émergé en 2003 le guidage vocal de la préparation par éclatement puis celui de l'inventaire annuel et tournant en 2005. Le contrôle qualité et la traçabilité des produits constituent les nouvelles applications de la technologie de plus en plus demandées par les entreprises.»

---

<sup>5</sup> Fabricant de terminaux et intégrateur des systèmes vocaux de son partenaire exclusif et compatriote Vocollect leader mondial dans les solutions vocales pour l'optimisation de la chaîne logistique

<sup>6</sup> Business development manager chez ZetesInterscan (intégrateur de solutions vocales)

Après avoir présenté les différentes notions de la logistique de distribution, nous nous intéressons dans ce qui suit à la gestion des entrepôts et à la problématique de l'optimisation de la préparation de commande.

## **I.4 La gestion des entrepôts**

Aujourd'hui, la gestion des entrepôts constitue l'un des maillons les plus essentiels de la chaîne logistique. « Elle recouvre la réduction des déplacements des opérateurs, la planification des tâches, l'optimisation de l'espace, la synchronisation, la régulation et l'optimisation des flux des processus, la gestion des matières dangereuses, le picking, la gestion des stocks, la gestion des familles de produits, la gestion des fournisseurs, la gestion des entrées/sorties, la saisie de l'inventaire et les statistiques. Elle repose sur les technologies d'identification telle que les codes-barres et la RFID, les logiciels de gestion d'entrepôts (WMS) et les applications de gestion de stocks. Elle peut mobiliser des logiciels de reconnaissance vocale (voice picking), des outils d'interfaçage (XML, EDI) » [12].

L'entreposage est une partie intégrante de tout le système logistique [13]. Il constitue un lien entre les producteurs et les clients pour assurer la livraison constante et en temps opportun des produits. Le but principal de l'entreposage est le stockage et la mise en mémoire tampon des produits, allant des matières premières et pièces, aux produits finis. L'entreposage peut être utilisé à tout moment dans la chaîne d'approvisionnement: au producteur (par exemple entrepôt de l'usine), chez le client (par exemple, entrepôt d'un centre commercial) [13].

Le terme «entrepôt» se réfère à une installation, un centre dont la fonction principale est le stockage et la mise en mémoire tampon des produits.

D'autres termes sont parfois utilisés au lieu de 'entrepôt'. Alors qu'ils sont semblables, ils ne peuvent pas être utilisés de manière interchangeable dans la définition de leurs fonctions principales. Le terme «centre de distribution» est utilisé lorsque l'accent est mis sur la distribution des produits principalement à forte demande et non sur le stockage.

Lorsque le stockage de produits n'est pas important, le terme de transbordement est employé, « cross-dock » est aussi utilisé dans ce contexte.

Dans ces installations, les produits sont rarement stockés pendant une longue période de temps et sont généralement déplacés directement de la réception jusqu'à la livraison quai [13], [13], [14].

Comme notre objectif est l'optimisation de la préparation des commandes, nous allons utiliser le terme "entrepôt" tout au long de la thèse.

Les opérations d'entreposage peuvent être divisées en plusieurs fonctions [13] [14], nous citons principalement:

- La réception, qui consiste en le déchargement des produits des véhicules de transport aux quais de réception, l'inspection des produits, la vérification des défaillances ou des produits manquants, et la mise à jour des registres d'inventaire de l'entrepôt pour refléter les changements,
- Le transfert, qui comprend le déplacement des produits des quais de réception aux emplacements de stockage affectés, quais d'expédition ou d'autres zones de l'entrepôt, et le déplacement des produits entre ces domaines,
- La préparation des commandes, qui consiste à collecter des quantités requises de produits à partir d'emplacements de stockage afin de satisfaire les commandes des clients,
- L'expédition, qui comprend les produits de chargement dans des véhicules de transport, l'inspection des produits à expédier, et la mise à jour des registres d'inventaire de l'entrepôt. Elle peut aussi assurer le tri et l'emballage des produits.

La préparation de commandes est basée sur les commandes des clients. La commande client se compose de plusieurs lignes de commande, chaque ligne indiquant le produit et la quantité à prélever. Il s'agit donc d'une opération de l'entrepôt qui satisfait les commandes clients en choisissant les produits nécessaires à partir des emplacements de stockage et les amener à un espace dédié pour collecter les commandes des clients assemblés, généralement considéré comme un dépôt [15]. Il a été estimé que la préparation de commandes compte 50% du total des coûts d'exploitation de l'entrepôt [16]. Ceci est en grande partie due au fait que la préparation de commandes exige la participation des préparateurs de commandes, puisque l'automatisation des systèmes de préparation de commandes nécessite de gros investissements [14], [17].

Pour cette raison, la préparation de commandes suscite depuis quelques années une zone d'intérêt chez les professionnels de l'entrepôt pour améliorer la productivité [14].

Les articles entrants sont reçus et stockés dans un grand volume de charges unitaires (quantité constante de marchandises prévue pour chaque expédition) tandis que les clients ont tendance à commander différents articles de petits volumes [14]. La préparation de commandes est essentielle pour chaque chaîne d'approvisionnement depuis les résultats de la sous-performance des services clients insatisfaisants (les longs traitements et délais de livraison) et des coûts élevés (les coûts de la main-d'œuvre, les coûts de livraisons supplémentaires et / ou d'urgence) [18].

Même si différentes tentatives ont été faites pour automatiser le processus de la préparation de commande, des systèmes impliquant des opérateurs humains sont encore répandus dans la pratique. Ces systèmes de préparation de commandes peuvent être classés en deux catégories [19]:

- Picker-to-parts-systems : où les préparateurs de commandes parcourent l'entrepôt et prélèvent les articles nécessaires
- Parts-to-picker systems : où les systèmes de stockage et de récupération automatisés livrent les articles à un préparateur de commandes fixe.
- Pick-to-box systems : divise la zone de picking dans plusieurs zones affectées chacune à un ou plusieurs opérateurs.
- Pick-and-sort systems : un système qui ne nécessite pas que la commande soit préparée dans son intégralité en une seule tournée.

Selon Dallari et al. [20], la conception d'un système de préparation de commandes dépend de plusieurs éléments de stockage, allant des produits (par exemple le nombre, la taille, la valeur), les commandes clients (par exemple, nombre, taille), jusqu'à la conception et l'aménagement de l'entrepôt. Ces chercheurs ont réalisé une classification des systèmes de préparation de commandes. Cette classification est basée sur quatre décisions prises lors de la conception d'un système de préparation de commandes: (1) qui va choisir des produits à partir des emplacements de stockage (humains ou machines), (2) qui se déplace dans la zone de picking (opérateurs ou des produits), (3) est ce que les convoyeurs sont utilisés pour transporter des produits collectés, et (4) quelle est la stratégie de picking. La classification qui en résulte des systèmes de préparation de commandes est illustrée dans la figure I.4.

Dans cette thèse, nous travaillons sur les systèmes de la première catégorie. On distingue trois activités sur le plan opérationnel [21]: l'attribution des articles aux emplacements de stockage (emplacement de l'article), la transformation des commandes clients en des commandes pour la préparation et la tournée des opérateurs dans l'entrepôt (parcours de l'opérateur). Nos travaux se situent au niveau de la troisième activité où le parcours de l'opérateur est optimisé afin de réduire le temps passé par l'opérateur pour préparer sa commande. Cette activité est révélée être cruciale pour l'efficacité des opérations d'entreposage.

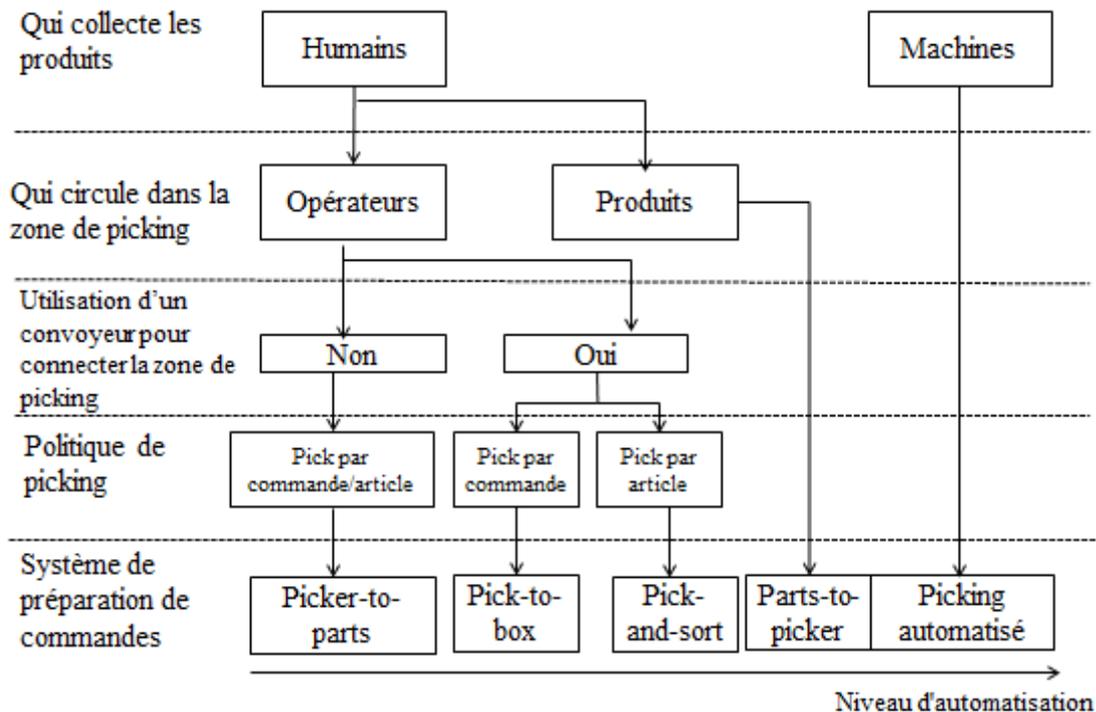


Figure I-4. Classification des systèmes de préparation de commandes [20]

L'optimisation de la préparation de commandes divise le processus en trois principaux domaines de décision: l'emplacement de l'article, le regroupement des commandes clients appelé aussi « order batching » et le chemin de préparation de commande.

Même si ces trois classes sont fortement interdépendantes et seulement une solution simultanée pourrait conduire à une solution globale pour le problème d'optimisation de la préparation des commandes [19], l'inclusion de toutes les décisions dans un modèle ne se fait jamais dans la pratique parce que ce calcul est intraitable [14]. Au lieu de cela, les chercheurs se concentrent sur un ou deux de ces domaines de décision [14].

Le secteur de la logistique est en train de vivre une montée en complexité. La technologie commence à intégrer ce secteur afin de lui permettre de faire face aux difficultés. Elle joue un rôle moteur dans le développement d'innovations logistiques. Dans ce qui suit, nous expliquons l'usage de la technologie pour l'optimisation de l'exploitation des entrepôts et de la préparation de commande.

Dans cette première partie de ce chapitre, nous avons introduit les notions de logistique de distribution afin de comprendre le fonctionnement actuel des entrepôts via les techniques utilisées lors du processus de préparation de commandes en mode « pick » et « put ». Le but de nos recherches est d'améliorer le travail des opérateurs en leur offrant plus de confort et aussi améliorer la productivité et le rendement en réduisant les erreurs. Nous proposons donc

d'intégrer une technologie récente qui ne cesse de séduire dans différents domaines mais qui reste peu utilisée dans la logistique de distribution. Pour ce faire, nous présentons dans la partie qui suit les nouvelles technologies et nous étudions celles qui sauront le mieux satisfaire nos besoins afin d'atteindre nos objectifs.

## **I.5 Application des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) dans la logistique**

Les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC, TIC) sont en plein essor [18]. Dans la littérature, les expressions « NTIC », « TIC », « NTI » fleurissent abondamment [19] et font référence à des applications qui mettent l'accent sur des aspects d'innovation, d'information ou de communication.

Les NTIC représentent l'ensemble des techniques utilisées pour le traitement et la transmission des informations (câble, téléphone, internet, etc.) selon la définition de Larousse. *« L'expression NTIC désigne les technologies récentes issues du mariage de l'informatique, du téléphone et de l'audiovisuel. Elles concernent le recueil, l'élaboration, le traitement, la conservation et le transport de textes, de sons en plus des traditionnelles données numériques. Elles se caractérisent par une grande diversité d'objets numérisés, une grande capacité de diffusion et de transport en réseau, une forte interactivité avec les utilisateurs. »* [20]

Historiquement, l'utilisation des TIC dans la logistique a commencé dans les années 60. Les exemples typiques sont les systèmes de gestion d'inventaire, le transport, l'ordonnancement, aussi connu sous le nom de DRP (Distribution Requirement Planning), et les systèmes de facturation. Ces systèmes sont généralement basés sur les fonctions et sont indépendants les uns des autres. Depuis les années 70, Material Requirements Planning (MRP) et Manufacturing Resource Planning (MRP II) ont émergé dans une tentative d'intégrer les matériaux, la main-d'œuvre et les besoins financiers dans le système. Ce qui a conduit à l'élaboration du progiciel de gestion intégré connu sous le nom d'ERP (Enterprise Resource Planning) dans les années 1990. Parallèlement au développement des systèmes d'entreprise, le développement des systèmes inter-organisationnels n'a vraiment commencé qu'après la commercialisation de l'internet en 1995.

Avant cela, l'EDI, a dominé les connexions inter- organisationnels depuis les années 60. Les systèmes inter-organisationnels (IOS) basés sur l'Internet ont augmenté de façon significative depuis la fin des années 1990, facilité par l'évolution rapide des TIC [22].

De nos jours, les nouvelles technologies touchent presque tous les secteurs, et la logistique ne fait pas l'exception. Dans ce qui suit, nous nous intéressons de plus près aux différentes technologies et innovations susceptibles d'être exploitées dans le domaine de la logistique de distribution.

## **I.6 Technologies existantes et innovation technologique**

Chaque technologie a un domaine d'utilisation privilégié et ne saurait répondre à toutes les problématiques d'optimisation de processus, surtout en logistique. *Heureusement pour les opérateurs en entrepôts, les fabricants de terminaux portables sont en train de développer des produits intégrant plusieurs technologies à la fois (lecture optique, vocal, RFID). Ce qui permettra de recourir à la technologie appropriée avec le même outil [23].* Ces technologies utilisés jusque-là dans les entrepôts ont montré quelques limites (§ I.3.3.3). C'est pour cette raison que les chercheurs essaient toujours d'améliorer et de proposer de nouvelles solutions. Une des finalités de nos travaux est d'améliorer la qualité, d'augmenter la productivité et de réduire les erreurs de picking. Nous essayerons de nous assurer que l'opérateur prenne le bon colis en vérifiant sa position. Pour localiser l'opérateur et vérifier qu'il est au bon emplacement lorsqu'il prend le colis, deux manières d'appréhender les choses se concurrencent: soit l'opérateur est localisé à tout instant  $t$  dans l'entrepôt (géolocalisation indoor) soit sa position est vérifiée seulement lorsqu'il est devant le casier contenant le colis. Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux techniques permettant de réaliser ces deux approches.

### **I.6.1 Localisation de l'opérateur : Géolocalisation indoor**

La géolocalisation indoor est un domaine en plein essor actuellement, de nombreuses recherches sont faites chaque année pour essayer de trouver une alternative au système GPS (Global Positioning System).

En effet, lorsque l'on pense à la géolocalisation, on pense tout de suite au GPS, technique de localisation la plus répandue et la plus connue. Pourtant ce système comporte de nombreux inconvénients. En premier lieu, la précision maximale atteinte est d'environ 1m. Mais cette précision n'est atteinte que dans des cas très particuliers où rien ne vient perturber le signal. Dès que l'on est dans un environnement intérieur ou même en ville, les réverbérations du signal sur les parois amènent à des défauts de positionnement pouvant aller jusqu'à 250m. C'est pourquoi cette technologie n'est pas utilisable en l'état dans un entrepôt.

Nous étudions les techniques existantes pouvant répondre à notre besoin.

### - Filmer les allées

Une des techniques actuellement développées est le filmage du lieu considéré. Cette technique peut être utilisée par exemple dans les métros pour vérifier que personne ne tombe sur les voies. Le principe est le suivant : Grâce à un algorithme de reconnaissance de forme, repérer sur la vidéo en temps réel une forme humaine puis, sachant la disposition de l'entrepôt, on peut positionner cette forme dans l'espace.

L'avantage de cette technique est bien entendu la précision qui peut atteindre le centimètre à condition d'installer plusieurs caméras pour recouper les positions. Ce qui amène un inconvénient. En effet, si l'on veut une précision suffisante, le coût augmente puisqu'il ne faudrait pas moins de 2 caméras par allée. Dans un entrepôt d'une taille conséquente, cela fait un nombre gigantesque de caméras et de données à traiter. Mais le plus grand désavantage est l'impossibilité de reconnaître précisément l'opérateur repéré. La technique permet de connaître avec précision la position de la forme repérée mais nous ne saurons pas à qui appartient cette silhouette. Cette technologie n'est donc pas utilisable toute seule pour repérer un opérateur précisément.

### - Le « Bat Ultrasonic Location System »

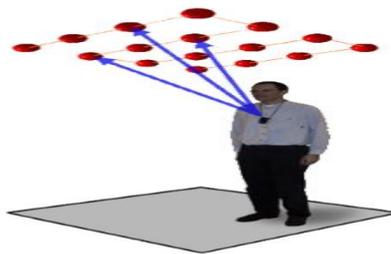


Figure I-5. Bat Ultrasonic Location System<sup>7</sup>

Cette technologie a été étudiée pendant l'année 1999 par des chercheurs du laboratoire « AT&T Laboratories Cambridge »<sup>8</sup> mais n'a pas amené à des développements plus poussés qu'un simple prototype. Son principe est de répartir des récepteurs à ultrason dans un entrepôt puis de munir l'opérateur d'un émetteur à ultrason. Ce dernier émet de courtes impulsions que captent les récepteurs. Sachant la date d'émission et de réception, nous sommes en mesure de calculer la distance de l'opérateur à chaque récepteur et ainsi sa position par trilatération (Figure I.5).

Le coût de ces émetteurs et récepteurs est relativement faible même si pour avoir une précision suffisante, il est nécessaire de multiplier les récepteurs. La précision de ce système

---

<sup>7</sup> <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/>

<sup>8</sup> <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/>

est très bonne et peut atteindre une dizaine de centimètres. Pour autant, relancer les recherches peut s'avérer coûteux.

#### - Le « Smart Floor »

Le smart floor est aussi une technologie qui a été le sujet de travaux de recherche datant de 1999. Son principe, selon Orr et al. [24], est de répartir des plaques de pression sur l'ensemble du sol comme le démontre la figure I.6. En effet, la force de la réaction du sol est représentée sur l'axe vertical et le temps est représenté sur l'axe horizontal. La frappe du talon est représentée par le pic à gauche sur la figure, tandis que le pic à droite représente la force exercée par un push-off sur les orteils. La section du milieu de la courbe montre le passage du poids du talon à la pointe des pieds.

Lorsque l'opérateur marche, la plaque de pression s'enclenche et grâce au profil de pression du pied de l'opérateur (Figure I.7). Le système parvient à définir qui appuie et donc on obtient sa position. Les chercheurs ont réalisé plusieurs tests et ont démontré que la chaussure n'avait pas de réelle influence sur le profil de pression exercé par le pied. Ces derniers ont réussi à atteindre une précision de 93% dans la reconnaissance des personnes passant sur le smart floor après avoir créé leur profil de pression.

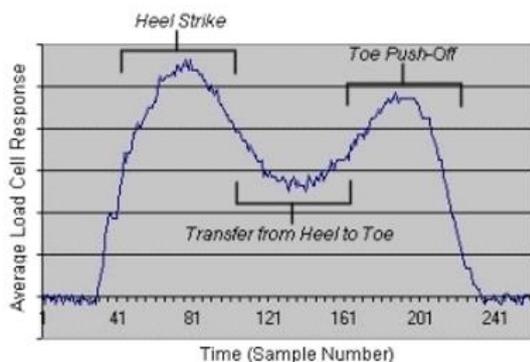


Figure I-6. L'impact des chaussures sur le sol [24]

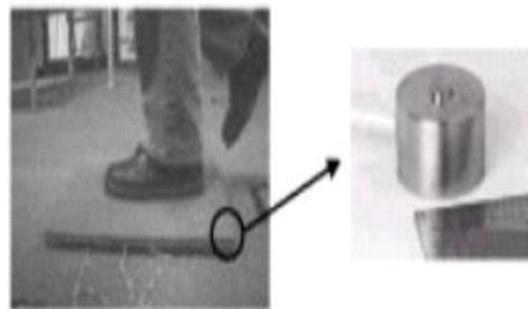


Figure I-7. Plaque de pression [24]

Aucune indication n'a été mentionnée dans le cadre de ces travaux. Cependant, bien qu'un capteur de pression ne coûte pas cher, en recouvrir tout le sol d'un entrepôt est autre chose, sans parler des difficultés d'installations et de durabilité.

#### - WI-FI

La localisation par Wi-Fi est déjà intégrée dans la plupart des Smartphones (Figure I.8). La localisation est déterminée par la puissance du signal reçue de la source par plusieurs récepteurs. C'est la méthode la plus souvent utilisée en Wi-Fi, elle suppose cependant que le modèle d'atténuation des lieux (obstacles, murs, etc.) soit bien connu, ou appris par calibration [25]. Afin de modéliser l'ensemble des lieux où l'on veut avoir de la géolocalisation en faisant une série de calibrations de chaque point de localisation. Le système

recherche alors pour chaque mesure de la source rechercher dans son modèle le point le plus « proche » de la mesure et positionner la source sur le point.



Figure I-8. WiFi

Cette solution demande un gros travail de modélisation mais a un coût d'installation nul puisque le Wi-Fi est déjà utilisé dans le système pick-by-voice. L'inconvénient est la précision : on atteint des mesures précises de 1 à 5 mètres près, ce qui n'est pas suffisant pour notre application.

#### - **Accéléromètre**

Une technique qui n'a pas encore été développée est la localisation par accéléromètre (Figure I.9). Connaissant la position et la vitesse initiale, un accéléromètre peut, par intégrations successives, calculer sa position. La précision d'une intégration est toujours sujette à caution et un tel système devrait en faire deux par intervalle de temps. Cet intervalle doit être minimisé pour accroître la précision. La précision ne peut donc pas être garantie et une erreur se propagera et s'amplifiera au fil des itérations. C'est pourquoi une telle technique n'est à priori pas utilisable pour résoudre notre problématique bien que très peu onéreuse.

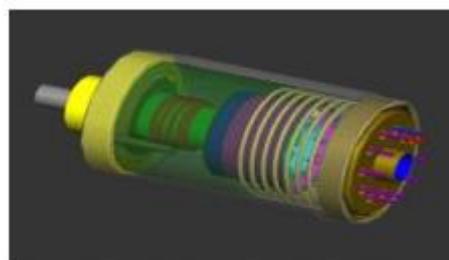


Figure I-9. Accéléromètre

#### - **RFID**

La géolocalisation par puce RFID n'est pas récente (Figure I.10). On l'utilise depuis longtemps dans toute sorte de domaine mais c'est une localisation discrète, c'est à dire que l'on ne connaît pas la position à tout instant. En effet, la solution classique est de positionner des émetteurs d'ondes à des endroits stratégiques qui vont émettre une onde activant une puce que transporte l'opérateur. À ce moment-là, on sait que l'opérateur est devant l'émetteur. Cette technique est surtout utilisée pour savoir dans quelle pièce se trouve une personne. Cette approche ne convient pas à notre problématique d'autant plus qu'elle est relativement

onéreuse car elle incite à une multiplication des émetteurs d'onde qui sont plus chers que les simples puces.



Figure I-10. RFID

Nous avons alors pensé à une approche innovante : à la place de porter une puce, l'opérateur porte un émetteur d'onde. Ainsi, en sachant quelles puces (disséminées en quantité dans tout l'entrepôt) sont activées, on parvient à déduire la position de l'émetteur. Des algorithmes ont été développés pour palier à la collision des puces (le brouillage du signal lorsque plusieurs puces s'activent pour un même émetteur). Ces algorithmes fonctionnent pour des puces à haute fréquence car elles permettent un échange de données plus important. Le problème de ces puces est la portée de détection. Ainsi, il est nécessaire de trouver un équilibre dans la fréquence des puces pour que le lecteur puisse les activer. Ces puces sont situées sur les côtés des allées tout en étant capable de les distinguer séparément.

Cette solution est donc a priori réalisable même si cela n'a jamais été testé. Elle présente comme avantage de limiter le nombre d'émetteurs (un par opérateur) et de permettre une grande précision en multipliant les puces très communes aujourd'hui.

#### - **Reconnaissance de forme**

Cette technique utilise une caméra portée par l'opérateur (celle-ci peut être intégrée à des lunettes). Ces algorithmes demandent une puissance de calcul assez importante mais qui peuvent être simplifiés en positionnant des marqueurs de grande taille sur chaque devanture d'allée (Figure I.11). La reconnaissance de forme est largement simplifiée si l'on connaît ce que l'on cherche et on peut obtenir l'angle solide (un angle solide représente l'analogie tridimensionnel de l'angle plan ou bidimensionnel.) du marqueur grâce à sa taille relative par rapport à la définition de la caméra. Grâce à l'angle solide, on obtient, en connaissant la taille absolue de ce même marqueur, l'éloignement de l'opérateur. Par triangulation ou trilatération, on obtient la position de l'opérateur.



Figure I-11. Marqueur

Cette technique est peu onéreuse (seuls de simples marqueurs doivent être positionnés) mais l'implémentation de cette technique dans un entrepôt n'est pas évidente. En effet, on imagine bien les marqueurs sur les devantures des allées et donc le positionnement dans l'allée principale est possible mais où positionner les marqueurs lorsque l'on se trouve dans une allée secondaire ?

Les deux dernières techniques présentées sont celles qui représentent le plus grand intérêt pour la réponse à notre problématique, à savoir la localisation peu onéreuse à tout instant de l'opérateur. Pourtant, ces techniques ne garantissent pas le fait que l'opérateur choisisse le bon colis quand il y a plusieurs casiers empilés au même endroit et demandent des recherches complémentaires pour garantir leur faisabilité et leur intérêt.

## **I.6.2 Localisation de l'opérateur : Vérification de la position**

La géolocalisation indoor est très intéressante mais son implémentation est peut-être trop lourde et ne répond pas tout à fait au besoin si l'on veut juste vérifier que l'opérateur collecte le bon colis au bon endroit. En effet, nous présentons dans ce qui suit les techniques qui permettent de ne vérifier sa position que lorsqu'il est devant le casier du colis.

- **Le « Smart Floor » (§ I.6.1)**

Nous pourrions utiliser cette technique en ne plaçant des plaques de pression que devant les casiers. En connaissant le poids du colis que doit prendre l'opérateur, on peut en déduire si ce dernier a pris le bon colis. L'inconvénient, en plus de ceux décrits dans le paragraphe expliquant la technique, est que si les différents casiers contiennent des objets d'un poids relativement proches, nous ne pouvons pas garantir que l'opérateur a collecté le bon colis.

- **Reconnaissance de forme**

Les casiers sont déjà munis d'étiquettes de couleurs sur lesquelles des nombres sont inscrits. L'opérateur doit, dans le cas du « pick-by-voice », énoncer à voix haute le nombre inscrit sur l'étiquette de la couleur demandée par le système, voire même dans certains cas effectuer une addition des nombres de deux étiquettes de couleurs différentes. En effet, les opérateurs ont tendance à retenir les nombres inscrits sur les étiquettes et sont capables, en étant à l'autre

bout de l'entrepôt, de citer ces nombres. Cette opération diminue les chances que l'opérateur soit capable de répondre à la demande du système sans être vraiment devant le bon casier. Nous proposons, à l'aide d'une caméra intégrée de reconnaître les étiquettes automatiquement lorsque l'opérateur les regarde. Ainsi, il est impossible pour l'opérateur de répondre lors de son parcours vers le casier, ce qui limite les erreurs pour trouver le bon article. De plus, l'opérateur n'a plus besoin d'effectuer de calcul mental qui, même s'il est simple, fatigue à la longue. Nous gagnons donc en confort de travail et en productivité. L'avantage de cette technologie est de ne nécessiter aucune installation supplémentaire. L'inconvénient est que ces étiquettes ne sont pas des marqueurs. Elles ne contiennent pas de caractéristique permettant de les repérer facilement. Ainsi, les algorithmes sont d'une complexité conséquente et peuvent induire un temps de latence désagréable pour l'opérateur.

- **QR Code**

Cette technique consiste à remplacer les étiquettes de couleur par des QR Codes (Figure I.12). Ces marqueurs, contrairement aux étiquettes, sont très faciles à repérer grâce aux 3 coins qui délimitent le code. Ces codes contiennent pas moins de 20000 caractères. Nous pouvons stocker dedans toute sorte d'information, à savoir, le numéro de l'allée, le numéro de casier, etc. Instantanément, nous avons donc accès à la position du casier vu par l'opérateur et ainsi, une indication peut être directement affichée sur le QR Code par RA pour indiquer la direction du bon casier. L'avantage de cette technologie qui sera détaillée dans le paragraphe suivant est qu'elle ne nécessite pas un investissement conséquent en termes d'installation. En effet, il suffit de coller des QR Codes sur chaque casier.



Figure I-12. QR Code

Les deux premières techniques sont relativement différentes et finalement, ne permettent pas d'atteindre les mêmes objectifs.

En effet, la géolocalisation indoor permet d'accéder à la position de l'opérateur pour le guider tout au long de son parcours et ainsi, un novice aura un temps d'adaptation beaucoup plus faible voir même inexistant. Mais cette technologie permet seulement de vérifier que l'opérateur est à la bonne place sans pour autant permettre de vérifier s'il prend le bon colis.

La deuxième approche quant à elle, permet justement de vérifier si l'opérateur prend le bon colis mais ne permet pas d'aider l'opérateur à trouver le chemin (sauf pour la technologie des QR Codes en partie).

Une fusion des deux approches peut donc être effectuée pour permettre d'atteindre l'ensemble de nos objectifs. On pourrait par exemple implémenter les QR codes et la localisation par RFID (les deux technologies les plus prometteuses) pour profiter des avantages des deux technologies et se débarrasser de leurs inconvénients. Mais les coûts des deux implémentations s'additionnent sachant que le coût de la fusion peut même être supérieur car il faut veiller à leur compatibilité.

#### ○ **Choix du QR Code**

Un des points-clés de nos recherches a été le choix de la méthode de localisation de l'opérateur dans l'entrepôt. Une étude comparative de différentes solutions a donc été réalisée. Le choix a été fixé sur les QR Codes. Les recherches nous ont permis d'établir une étude profonde sur cette technologie afin de justifier notre choix.

Le QR (Quick Response) a été inventé au Japon par Denso Corporation en 1994 dans le but de suivre les pièces automobiles dans les usines Toyota. Il s'agit d'un type de code barre en deux dimensions qui permet de lire rapidement et automatiquement (sans saisie) des données complexes. Le QR Code permet de gagner du temps et réduire les erreurs de saisie. Il est utilisé dans différents domaines tels que : les médias, la presse, le tourisme, le marketing, la consommation, la logistique et la culture [26].

Le QR Code est caractérisé par trois éléments de positionnement (l'emplacement et l'orientation du QR Code) et les éléments de données (les données codées) (Figure I.13).

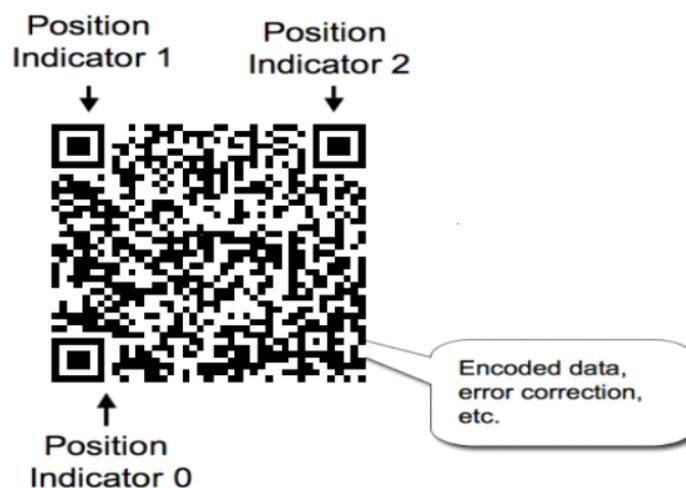


Figure I-13. Représentation d'un QR Code

Il peut être généré grâce à plusieurs sites webs<sup>9</sup>. Ce code, pouvant contenir des informations comme des url ou du texte, peut être lu par les Smartphones et les téléphones mobiles équipés d'une application de lecture de QR Code ainsi qu'avec les lunettes à RA.

Il a une capacité de stockage beaucoup plus importante que le code barre.

En effet, un QR Code contient des informations dans les directions verticales et horizontales alors que le code barre contient des informations dans une seule direction [27] (Figure I.14).



Figure I-14. Comparaison entre un QR Code et un code barre [26]

Un code barre est un code unidimensionnel qui a été inventé en 1952. Il peut stocker entre 10 à 13 caractères. Par contre, un QR Code peut supporter un grand volume d'informations avec 7089 caractères numériques, 4296 caractères alphanumériques, 2953 octets et 1817 caractères japonais Kanji/Kana.

Le QR Code a une fonction de correction d'erreur définie sur 4 niveaux (Figure I.15) :



Figure I-15. Niveaux d'erreur dans un QR Code

Niveau L : environ 7% d'erreur / de redondance

Niveau M : environ 15%

<sup>9</sup> <http://qrcode.kaywa.com/fr>  
<http://bit.ly>  
<http://goo.gl>

Niveau Q : environ 25%

Niveau H : environ 30%

Un QR Code peut être lu même s'il est en partie abîmé ou arraché (Figure I.16). Le niveau Q et le niveau H sont généralement recommandés pour le domaine industriel où il est difficile de garder les QR Codes propres et non endommagés.



Figure I-16. QR Code abîmé-QR Code arraché

ZXing (Zebra Crossing)<sup>10</sup> est une librairie open-source pour Processing consacrée aux codesbarres (1D, 2D). Ayant une grande capacité de stockage d'informations, les QR Codes sont peu onéreux et robustes.

## I.7 La Réalité Augmentée (RA)

### I.7.1 Définitions et principe

La RA consiste à mixer le monde réel et le monde virtuel de manière à apporter à l'utilisateur des informations numériques destinées à le guider ou l'aider à comprendre son environnement. D'après Kong et al. [28], la RA est un concept qui permet d'intégrer des informations virtuelles à un environnement

La définition énoncée par Ronald Azuma, chercheur à l'université de Caroline du Nord, en 1997 dans une étude présentant les nombreuses innovations à venir dans ce domaine, considère qu'un système de RA doit respecter trois règles fondamentales [29] : Combiner le réel et le virtuel, interagir de manière interactive (en temps réel) et être enregistré en 3 dimensions. Une autre définition a été donnée à la RA par Milgram et al. [30] qui consiste à relier le réel à l'environnement purement virtuel en introduisant la notion de RM (Réalité Mixte) qui contient les notions de RA et de VA (Virtualité Augmentée) (Figure I.17).

Quand on parle de la RA, on fait référence à un système qui intègre des éléments virtuels avec des éléments du monde réel créant ainsi un environnement mixte en temps réel.

---

<sup>10</sup> <https://zxingnet.codeplex.com/>

Contrairement à la RA, la virtualité augmentée est l'ajout des éléments réels dans un environnement virtuel.

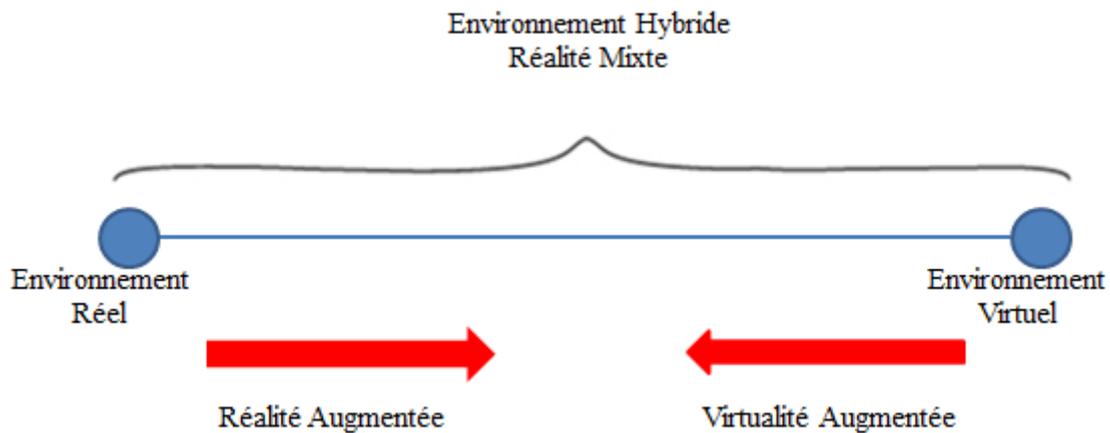


Figure I-17. Continuum réalité-virtualité, réalité mixte

La RA est interdisciplinaire et s'appuie sur le traitement du signal, la vision artificielle, la synthèse d'images, les interfaces homme-application et les technologies nomades. Ses applications sont multiples et touchent de plus en plus de domaines, qui seront détaillés dans le paragraphe I.7.3.

L'utilisation de la technologie de la reconnaissance d'image est fréquente de nos jours. Le pattern (§ Figure I.11) est utilisé dans une scène comme un marqueur. ARToolkit par exemple a son propre marqueur avec un format fixe. L'affichage de la RA se fait en 3 étapes : détecter le marqueur, décoder le marqueur et projeter les objets virtuels. ARToolkit est une bibliothèque pour la construction d'applications en RA. Elle a été développée par Hirokazu Kato [31]. La difficulté majeure dans le développement des applications en RA est le problème de calcul des positions actuelles de la caméra et l'orientation vers le marqueur en temps réel. Afin de réaliser ce calcul, il est nécessaire de savoir où regarde l'utilisateur dans le monde réel. La fonctionnalité principale d'ARToolkit est de réaliser ce calcul. Les autres caractéristiques de la bibliothèque incluent : la détection de labels formés par de simples carrés noirs, la capacité d'utiliser n'importe quel modèle avec de simples carrés noirs et les méthodes pour calibrer la caméra. Malgré les caractéristiques offertes par cette bibliothèque, cette dernière présente des limites surtout en termes de distance de décodage. Dans leurs travaux, Kato et al. [31] ont présenté un diagramme montrant le traitement d'image utilisé dans ARToolKit. Ce même diagramme a été traduit par une équipe française de l'ENSICAEN travaillant sur la RA [32] (Figure I.18).



Figure I-18. Traitement d'image utilisé dans ARToolKit [32]

Une visite en Avril 2012 à Laval Virtual, l'un des plus grands salons internationaux sur la Réalité Virtuelle et les Technologies Convergentes, nous a permis d'approfondir nos connaissances dans ce domaine. Nous avons eu la chance de voir de près différentes démonstrations dans différents domaines. Nous citons l'exemple du projet Corvette développé par INSA de Rennes qui intègre plusieurs techniques associant le réel au virtuel. Ce projet consiste en un bras mécanique qui transfère ses mouvements en 3 dimensions dans un jeu vidéo simpliste. Ce dernier donne en retour les interactions du monde de pixels : si l'on percutait un objet dur, le bras s'arrêterait tout comme notre bras réel. L'impression d'être au cœur de cet environnement fictif était alors à son paroxysme. L'institut Carnot CEA List<sup>11</sup>, quant à lui, travaille sur la manipulation et interactions des corps rigides, d'objets déformables. Ces applications démontrées à Laval Virtual mettent en scène les algorithmes de recalage réel/virtuel 3D sans marqueur. Des démonstrations ont aussi été faites dans le domaine médical où la société néerlandaise Personal Space Technologies présentait une solution permettant à un médecin de pouvoir analyser une radio, une IRM ou un scanner en RA. En modélisant en 3D les organes et les vaisseaux sanguins de ses patients, l'apprentissage et le travail des chirurgiens sont facilités. Le concept de la RA représente de nos jours un véritable atout pour la chirurgie. Dans le paragraphe suivant, nous présentons la diversité de l'utilisation de la RA.

## I.7.2 Historique et évolution de la RA

Nous présentons dans ce paragraphe un bref historique sur la RA :

<sup>11</sup> <http://www-list.cea.fr/>

- 1966 : Ivan Sutherland [33] invente le premier casque qui combine la vue de la réalité et une image de synthèse. L’affichage était effectué par des tubes cathodiques miniatures et le suivi des mouvements de la tête était assuré par un bras mécanique lié au casque.
- 1975 : Myron Krueger [34] crée Videoplace, un dispositif permettant aux utilisateurs d’interagir avec des objets virtuels via une caméra et un projecteur.
- 1979 : McDonnell Douglas développe un casque projetant des informations utiles pour les pilotes de chasse directement sur leur visière.
- 1997 : Steve Feiner présente la Touring Machine, le premier système itinérant de RA combinant un affichage sur les lunettes à la vue réelle [35].
- 1999 : Hirokazu Kato [31] met à disposition ARToolkit, la première librairie open source et multi-plateformes dédiée à la création d’interfaces de RA.
- 2000 : Bruce H.Thomas développe ARQuake, le premier jeu basé sur la RA permettant de jouer à Quake dans un univers réel grâce à la combinaison de caméras, capteurs et GPS.
- 2008-2009 : Lancement de Wikitude Drive, système de navigation AR pour plateformes Android basé sur NyARToolkit. Il s’agit de la première application nomade de RA disponible pour le grand public. Peu après, des applications similaires furent mises à disposition sur l’iPhone d’Apple.

### **I.7.3 Domaines d’utilisation de la RA**

L’utilisation de la RA s’est élargie sur différents domaines selon les statistiques de Hidden Creative<sup>12</sup> (Figure I.19). En effet, cette société de marketing précise qu’il y a déjà 83 applications à RA dans l’App Store en 2008. De nos jours, 35 nouvelles applications à RA sont lancées chaque mois et 43% de ces applications sont gratuites.

---

<sup>12</sup> hiddenltd.com

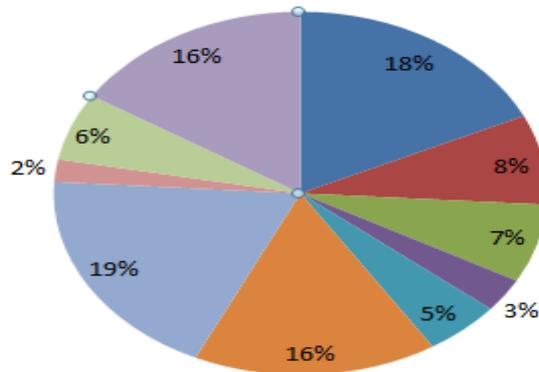


Figure I-19. Statistiques sur l'utilisation de la RA

### - Application militaire

Les toutes premières applications de la RA sont apparues dans les années 80, et étaient essentiellement militaires. En effet, superposer des données stratégiques (positions, distances, etc...) à l'image réelle constitue un atout majeur d'un point de vue tactique.

- Casque des pilotes de chasse

Plutôt onéreuse, cette technologie est tout d'abord réservée aux pilotes de chasse. Ceux-ci peuvent désormais suivre leur cible en temps réel grâce à une indication sur leur visière, mais également connaître la distance à la cible, leur altitude, etc.

Ces données leur confèrent un avantage certain lors des combats, mais également lors des décollages et atterrissages (Figure I.20).

- Extension à l'infanterie [36]

Bien que ce soit encore à l'état de projet, l'armée envisage de doter l'infanterie de ce genre d'équipement, pour améliorer la coordination entre les différentes unités. Il sera alors possible d'indiquer où se trouvent les autres unités, de marquer une zone dangereuse, d'afficher l'objectif à atteindre, etc.



Figure I-20. Affichage tête haute ou Head-Up Display (HUD)

## - Médecine

Le domaine médical a bénéficié de la RA au travers de nombreuses applications, lesquelles permettent principalement d'assister les médecins lors d'opérations délicates. Développée par Luminetx, VeinViewer<sup>13</sup> permet de superposer l'image du patient et l'image de ses veines. Très pratique en cas de prises de sang puisque le médecin ne risque plus de manquer la veine. Le dispositif détectant les veines est à base de rayons infrarouges, lesquels sont plus ou moins absorbés selon qu'ils traversent une veine ou non. Un ordinateur peut alors en déduire la position des veines, et l'image est superposée à l'image réelle. Cet exemple est très représentatif des applications médicales : la limite des risques est la principale conséquence de ce type d'applications.

- Représentation 3D des organes

Comment former les chirurgiens ? Comment éviter les accidents lors des opérations chirurgicales ?



Figure I-21. Exemple d'outils développés par l'IRCAD

La RA permet au chirurgien de visualiser en temps réel les organes sur lesquels il doit travailler, ainsi que les organes « cachés » qu'il ne faut pas endommager. On gagne en précision, en confort et en efficacité.

La figure I.21 montre qu'il est possible de superposer une modélisation 3D des sur l'image du patient. La position des organes est obtenue par l'analyse des ultrasons émis. Traitées par ordinateur, ces données sont superposées à l'image réelle, via la caméra portée par le chirurgien. On est également capable aujourd'hui d'ajouter l'image des outils à l'intérieur du corps. Ce gain de visibilité permet de diminuer de manière très sensible le risque d'accident. En définitive, le gain d'information apporté par la RA permet d'importantes avancées dans le domaine médical en termes de qualité et de fiabilité des opérations.

## - Loisirs et culture

---

<sup>13</sup> <http://thefutureofthings.com/5324-luminetx-veinviewer/>

- Archeoguide

Ce projet consiste à représenter sur les lieux historiques (Olympie, Abbaye de Cluny, etc...) les constructions telles qu'elles étaient autrefois. Le visiteur peut désormais se promener tout en s'intégrant dans le décor de l'époque. Ceci rendrait les visites plus attractives et plus intéressantes. En effet, on serait capable de transmettre bien plus d'informations que par méthode vocale (méthode la plus courante aujourd'hui).

- Les jeux de société : Exemple de Marblegame

En règle générale, les jeux de société ressemblent à Marblegame, en ce sens où le joueur ne manipule qu'un plateau de jeu vide. Monopoly, Pokémon, Avatar sont d'autres exemples, la liste devrait s'allonger rapidement, tellement l'originalité de ces nouveaux jeux les rend attractifs.

La RA annonce une révolution dans le domaine des jeux de société. Seul le support du jeu demeure inchangé, mais les pions, les cartes peuvent maintenant s'animer, ce qui rend le jeu plus passionnant. Marblegame est un jeu d'adresse, où l'objectif est de déplacer une bille sur un plateau, à travers de nombreuses difficultés : trous, impasses, obstacles, etc... Bien sûr, le joueur ne manipule rien d'autre qu'un plateau vide, mais les lunettes qu'il porte font apparaître sur ce plateau tous les objets tridimensionnels.

- **Marketing**

La RA a très vite trouvé une application dans le domaine du marketing via internet, la publicité en ligne et plus généralement le e-commerce.

- Cabine d'essayage virtuelle

Partant du constat qu'un nombre croissant d'internautes visitent les boutiques en ligne, sans pour autant que cela se reflète en termes de ventes, les vendeurs en ligne essaient de rapprocher le plus possible le service offert de leurs concurrents, palliant par exemple à l'absence de cabines pour essayer ses habits grâce à des cabines virtuelles. La société Zugara, qui, juste en utilisant son navigateur, travaille sur des solutions permettant de partager de travailler et de communiquer grâce à des applications de RA, propose ce genre de service. Néanmoins dans ce cas précis, la RA doit être complétée par des technologies 3D permettant par exemple que le vêtement virtuel épouse les formes du corps. Zugara utilise un système dit de « motion capture » qui détecte le corps du sujet et ses mouvements, ce qui permet notamment d'utiliser une interface totalement virtuelle, celle-ci doit être « étalonnée » via le repérage d'une image qui doit préalablement être imprimée.

L'application de Zugara fonctionne avec un PC et une webcam. D'autres solutions ont été envisagées en utilisant comme capteur le Kinect de Microsoft par exemple, sur la même idée.

Ce capteur est un périphérique destiné à la console Xbox 360 qui permet sans utiliser de manette de contrôler des jeux vidéo. Néanmoins ces solutions se heurtent à plusieurs écueils. Le premier est que pour avoir un affichage optimal il faut un périphérique adapté (TV/écran de grande taille). Le second est que l'achat concerne un objet réel, son équivalent virtuel ne peut pas retranscrire toutes ses caractéristiques : on a évoqué la forme du produit sur le corps, mais également la couleur réelle (l'affichage dépend de la luminosité de l'écran...). D'autres limites apparaissent, comme le toucher réel du produit par exemple.

- Insertion d'une image virtuelle dans un environnement réel : L'exemple d'Ikea Il s'agit ici d'insérer dans l'image du salon d'un client, filmée en temps réel, l'image virtuelle du canapé, de la table basse ou de tout autre mobilier vendu, de manière à pré-visualiser le rendu final. L'idée ne consiste pas à proposer une alternative à la boutique réelle comme dans l'exemple précédent, mais au contraire un nouveau service, indisponible dans le monde physique. Comme dans l'exemple précédent, le service fonctionne avec un système d'images à imprimer qui servent à repérer l'emplacement du mobilier dans la pièce.

L'objectif est de pré-visualiser la taille du colis, pour être sûr que la taille convienne pour l'envoi.

#### - **L'aide à la navigation**

L'aide à la navigation est l'une des applications les plus prometteuses de la RA : pointage d'objectifs, de parcours, ou encore caractéristiques d'un objet, de nombreuses informations utiles peuvent être affichées (Figure I.22).



Figure I-22. Utilisation de la RA en navigation

- Layar

Layar<sup>14</sup> est un logiciel d'aide à la navigation pour téléphone mobile utilisant la RA. À la différence des exemples présentés en marketing, celui-ci ne s'appuie pas sur des codes-barres ou des symboles pour repérer l'emplacement d'affichage, mais sur la boussole et le GPS intégrés dans les téléphones modernes sous Android. Après avoir repéré la direction vers laquelle le téléphone est pointé, celui-ci effectue une recherche dans une base de données pour trouver les informations pertinentes à afficher. L'une des innovations majeures de ce logiciel est la substitution de la caméra comme capteur principal, ce qui permet d'alléger le traitement de l'information. De plus, bien qu'étant une application propriétaire, celle-ci offre aux développeurs la possibilité de créer leur propre surcouche (layer ou calque en français) pour leurs propres besoins.

On voit ici l'un des atouts majeurs de la RA : la mise en valeurs d'informations dans l'environnement.

- Junaio

Junaio est une plateforme concurrente de Layar, qui vise les appareils sous iOS (le système d'exploitation mobile développé par Apple pour l'iPhone, l'iPod touch et l'iPad) et Android (donc la même gamme que Layar). Celle-ci s'illustre par ses algorithmes de reconnaissance d'images. La recherche s'effectue donc dans une base de données d'images, à la différence de Layar qui recherche des positions.

Dans la section suivante, nous nous intéressons à l'utilisation de la technologie de la RA pour l'optimisation du processus de préparation de commandes dans les entrepôts.

## **I.8 Le potentiel de la RA dans la préparation de commandes**

La technologie a toujours été un facteur déterminant dans le domaine de la logistique. La RA a pris son envol depuis l'émergence des Smartphones. Elle s'invite un peu partout et dans différents domaines. Elle est perçue comme une alternative révolutionnaire aux solutions actuelles, qui présentent de nombreuses limites notamment en termes de fonctionnalité et de confort. En effet, bien que les représentants de Generix Group avec lesquels nous avons des contacts réguliers soient persuadés que l'application de la RA à la logistique d'entrepôt ait énormément de potentiel, la direction du groupe a réalisé une étude concernant «L'usage des nouvelles technologies dans la gestion des opérations logistiques».

---

<sup>14</sup> <https://www.layar.com/>

Une des trois questions posées était «Existe-t-il une demande potentielle pour la réalisation d'une technologie de RA». En effet, 90% des professionnels de la logistique ayant répondu à l'étude se sont prononcés en faveur de la RA au sein de l'entrepôt (Figure I.23).

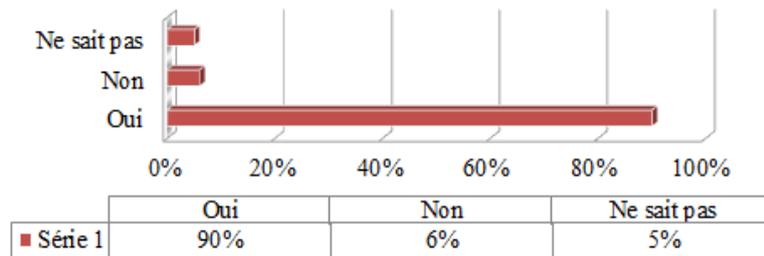


Figure I-23. La RA à l'intérieur des entrepôts

De plus parmi les avantages susceptibles d'être apportés par la RA selon les professionnels, on trouve principalement l'amélioration du confort de travail, et l'augmentation de la rapidité et de la qualité du traitement des commandes (Figure I.24). Ce sont bien les problématiques qui orientent notre démarche scientifique depuis le début du projet.

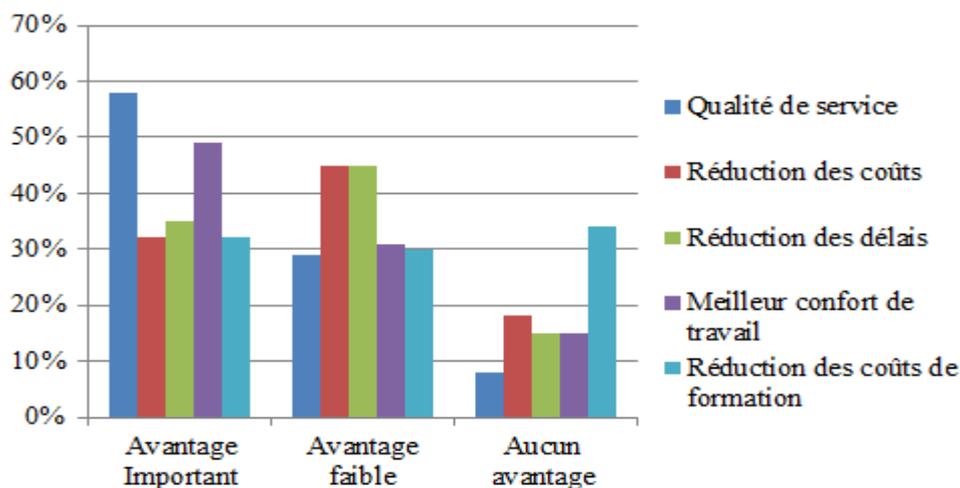


Figure I-24. Étude sur les avantages de la RA

Une étude réalisée par le groupe DHL [37] permet de répartir l'utilisation de la RA dans la logistique dans ces catégories suivantes : les opérations d'entreposage, l'optimisation des transports, la livraison (Last-mile Delivery) et les services à valeur ajoutée améliorés.

Koster et al. [14] ont montré dans leurs travaux que les opérations d'entreposage sont estimées à environ 20% de tous les coûts logistiques, et que le processus du picking prend 55% à 65% du coût total des opérations d'entreposage [38]. Cela indique que la RA a le potentiel de réduire considérablement les coûts en améliorant le processus du picking. La grande majorité des entrepôts dans les pays développés utilise toujours le pick-by-paper pour le processus de la préparation de commandes. Cette technique est lente et peut engendrer des erreurs. Bien que le taux d'erreur de picking puisse paraître très faible, même en utilisant la

technique du Pick-by-papier, les experts estiment un taux de 0,35%. Chaque erreur doit donc être évitée, car elle se traduit généralement par des coûts élevés de suivi [39].

L'intégration de la RA dans les entrepôts va aussi permettre d'aider à la planification de l'entrepôt et à la formation du nouveau personnel de l'entrepôt. En effet, cette tâche est souvent effectuée par des travailleurs temporaires qui nécessitent généralement une formation coûteuse afin d'assurer qu'ils réalisent leur tâche avec efficacité et sans faire d'erreurs

Un groupe de chercheurs allemand a réalisé plusieurs recherches concernant l'application de la RA à la logistique. Ces études [11] avaient pour objectif principal de démontrer l'efficacité de la RA pour la phase de picking par rapport aux autres techniques existantes et de déterminer quel type d'affichage du chemin à suivre minimise le taux d'erreur (entre une flèche, un cadre et un tunnel virtuel). Cependant les solutions techniques utilisées dans ces études ne sont pas applicables à l'échelle d'un entrepôt. En effet, elles nécessitent l'installation de deux caméras par rayon, soit un investissement colossal pour un entrepôt complet.

## **I.9 Choix de la problématique et positionnement**

Dans le cadre des travaux de cette thèse, nous nous intéressons à la problématique d'organisation dans les entrepôts. L'optimisation de la préparation de commande peut se faire selon plusieurs critères. Van Nieuwenhuyse et De Koster (2009) [40] distinguent 4 classes de problèmes pouvant influencer les performances directes du système:

- 1) Politique de stockage: Méthode d'affectation des produits dans les emplacements de stockage
- 2) La disposition de l'entrepôt : Détermination du nombre optimal des allées et de leurs longueurs
- 3) Le chemin des préparateurs de commande : Détermination du chemin le plus court pour ramasser un lot d'articles
- 4) La politique de prélèvement des articles

Une équipe de chercheurs lettonne a travaillé sur la RA dans la logistique [41]. L'objectif de leurs travaux est de fournir l'opérateur d'informations supplémentaires. Donc, à partir d'un plan exact et virtuel d'un entrepôt, une cartographie d'un plan 2D est créée. Grâce à cette modélisation, le graphe du parcours de picking est créé en utilisant les algorithmes de Dijkstra et A\*. Les opérateurs auront par la suite un système de guidage à travers les lunettes à RA leur indiquant le chemin à suivre afin de préparer leurs commandes.

Le développement de ce prototype a été retardé à cause du manque d'équipement matériel pour le « tracking » en temps réel des opérateurs dans l'entrepôt.

Des recherches ont été déjà réalisées dans ce domaine par une entreprise autrichienne indiquant que la technologie de RA peut être utilisée dans la logistique de différentes manières [42]. Cette société, spécialiste des équipements de préparation automatique de commandes, a mené un projet similaire impliquant la RA dans les entrepôts. En effet, leur projet consistait à fournir l'opérateur d'informations visuelles sur des lunettes afin de le guider vers les marchandises à prélever. « *La caméra intégrée peut enregistrer optiquement les numéros de lot et de série où les codes-barres pendant le processus de prélèvement, sans même avoir besoin d'une confirmation ou d'une validation... Les informations sont transmises par radiofréquences* » [43].

Ce projet a été développé avec des universités autrichiennes et allemandes, et le laboratoire ARS Electronica Futurelan de Linz. Cependant, après être passé à la phase d'essai il y a quelques années, ce projet n'a plus communiqué son avancement et semble avoir été mis en veille. À la fin des années 2000, les dispositifs d'affichage étaient beaucoup plus contraignants et ne semblaient pas être une aussi bonne solution qu'aujourd'hui.

Nos travaux de recherches se situent dans le cadre d'un contrat industriel signé entre l'EC Lille et Generix Group, un contrat qui porte sur l'utilisation de la RA au service de la logistique. Generix Group est un éditeur de logiciels collaboratifs pour la supply chain qui s'adresse aux acteurs de la distribution, aux industriels et aux prestataires logistiques et transport. Le but de ces travaux est de proposer une approche pour l'optimisation du processus de préparation des commandes au sein d'un entrepôt, en utilisant la RA. La technologie de la RA consiste à superposer des objets virtuels aux images réelles perçues par le préparateur pour faciliter et optimiser son itinéraire et pour réduire le risque d'erreurs sur la préparation de la commande. Nous proposons un système d'aide aux déplacements dans les entrepôts tout en utilisant les approches d'optimisation. Notre objectif est d'affecter à l'opérateur le parcours le plus optimal possible afin d'obtenir une efficacité et efficacie dans le processus de préparation des commandes (en termes de coûts, délais et qualité). Plusieurs travaux ont traité l'optimisation dans les entrepôts. La gestion des entrepôts repose sur les technologies telles que les codes-barres, la RFID ou encore les logiciels de gestion des entrepôts. Toutes ces technologies ont montré leurs efficacités pour l'automatisation des processus logistiques qui compte parmi les principaux facteurs clés de réussite. Dans cette thèse, nous allions les méthodes de résolution (§ II) adaptées à notre problématique d'optimisation de la préparation de commande et nous intégrons la technologie des lunettes à

RA pour assurer le pilotage et le guidage de la solution proposée. L'objectif est d'affecter aux opérateurs des commandes clients optimisant le chemin de picking ou de putting. L'affectation est basée sur la localisation en temps réel de l'opérateur dans l'entrepôt. Pour une mission de travail, nous affectons un ensemble de commandes optimisées aux préparateurs afin de leur donner une certaine indépendance pour une durée déterminée. Le chemin optimisé est affiché sur son champ de vision à travers les lunettes de RA afin de le guider tout au long de son travail.

## **I.10 Conclusion**

De plus en plus d'entrepôts utilisent le WMS grâce aux différentes fonctionnalités qu'il offre. Les techniques utilisées par les opérateurs se sont développées. La dernière en question est le pick-by-voice utilisée dans bon nombre d'entrepôt. Bien que le système de gestion des entrepôts offre plusieurs services, il n'optimise pas le circuit de préparation et le risque d'erreur reste possible. Réduire la longueur des trajets parcourus par l'opérateur est un facteur important de la préparation des commandes. En effet, nous proposons en premier lieu d'affecter le circuit de préparation le plus optimal à l'opérateur qui lui permettra de réaliser sa mission en un temps optimal sans passer plusieurs fois par le même endroit. Ensuite, afin de réduire les erreurs de picking qui coûtent énormément aux entrepôts, nous proposons d'intégrer la technologie de la RA en proposant un Système d'aide à la décision (SAD) des opérateurs.

Nous proposons dans le chapitre suivant un état de l'art des méthodes d'optimisation et de modélisation avancée ainsi que le paradigme multi-agent, avant de démontrer toute l'originalité de leur alliance.

## **CHAPITRE II. Les approches de modélisation et d'optimisation au profit de la gestion des entrepôts**

## **II.1 Introduction**

Sur la base des problématiques précédemment énoncées (§ I), nous proposons un SAD pour la logistique de distribution et plus particulièrement pour l'optimisation de la préparation de commandes en mode « pick » ou « put » se basant sur une méthodologie de modélisation et une approche de résolution. Nous orientons notre étude vers les fondements essentiels de l'optimisation. Des notions très importantes et d'actualité telle que les SMA (Systèmes Multi-Agents) et l'optimisation sont directement impliquées dans notre approche.

Dans ce chapitre, nous présentons le langage de modélisation UML (Unified Modeling Language) et ses différents diagrammes, ainsi que les SMA qui constituent un concept pour la mise en place d'une méthodologie de résolution et d'optimisation distribuée. Ensuite, notre intérêt se porte sur la définition de quelques concepts de base de l'optimisation. Nous allons aussi établir un état de l'art sur les différents travaux qui ont allié l'optimisation aux SMA dans le domaine de la logistique.

## **II.2 Méthodes de modélisation**

Dans cette partie de ce chapitre, nous nous intéressons à la méthode de résolution UML et au paradigme multi-agents.

Avant la réalisation d'un système, nous commençons tout d'abord par le modéliser. Nous avons choisi UML pour la modélisation de notre système. Ce dernier permet d'obtenir une modélisation de très haut niveau indépendante des langages et des environnements. Nous avons également eu recours au paradigme multi-agent. En effet, les SMA présentent plusieurs avantages. Ils ont montré leur pertinence pour la conception d'applications distribuées (logiquement ou physiquement), complexes et robustes. Les chercheurs et industriels ont eu recours aux plateformes multi-agents pour la mise en place de systèmes performants et efficaces. Ces systèmes ont une capacité d'adaptation à n'importe quel type de problème. Il propose des méthodologies, des outils et des techniques (§ II.2.2.) pour répondre à différents problèmes.

### **II.2.1 Outil UML**

L'UML est né en octobre 1994 chez Rational Software Corporation à l'initiative de G. Booch et de J. Rumbaugh. Il s'agit d'un langage de modélisation objet pour documenter et spécifier graphiquement tous les aspects d'un système à logiciel prépondérant [44]. En tant que standard de l'OMG (Object Management Group) depuis 1997, l'UML jouit d'une popularité

sans précédent à la fois dans le monde industriel et académique. *L'ambition des promoteurs d'UML est de fédérer en une seule notation les meilleures caractéristiques des différents langages de modélisation qui utilisent le paradigme objet. Ce langage se veut être un médium, sous forme de modèle graphique, servant à harmoniser les différents acteurs concourant à la réalisation d'un système, et à garantir la cohérence et la qualité de la conception* [45].

Le langage de modélisation UML se caractérise par sa flexibilité (configurable, extensible), sa syntaxe et sémantique définies et par sa généricité. UML 2.0 [46] comporte ainsi treize types de diagrammes qui représentent autant de vues distinctes représentant des concepts particuliers du système d'information.

Ces diagrammes peuvent être répartis en deux grands groupes : les diagrammes structurels ou statiques et les diagrammes comportementaux qui permettent de définir des aspects dynamiques d'une application (Figure II.1).

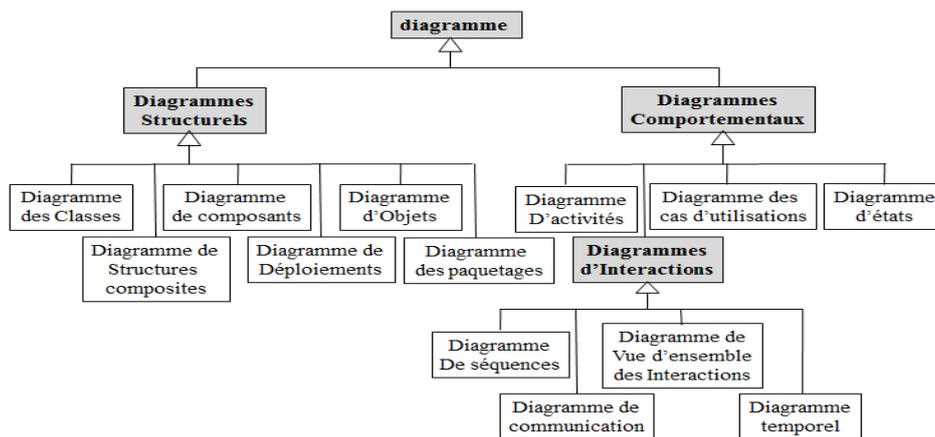


Figure II-1. Différents diagrammes d'UML

### II.2.1.1 Diagrammes structurels

- diagramme de classes (*Class*) : représente les classes qui interviennent dans le système.
- diagramme d'objets (*Object*) : sert à représenter les instances de classes utilisées dans le système.
- diagramme de composants (*Component*) : permet de montrer les composants du système d'un point de vue physique.
- diagramme de déploiement (*Deployment*) : sert à représenter les éléments matériels et la manière dont les composants du système sont répartis sur ces éléments et interagissent entre eux.

- diagramme de paquetages (*Package*) : représente la hiérarchie des paquetages du projet, leur organisation et leurs interdépendances, simplifie les diagrammes.
- diagramme de structures composites (*Composite structure*) : permet de décrire la structure interne d'un objet complexe lors de son exécution dont ses points d'interaction avec le reste du système.

### II.2.1.2 Diagrammes comportementaux

- diagramme de cas d'utilisation (*Use case*) : décrit les possibilités d'interaction entre le système et les acteurs, c'est-à-dire toutes les fonctionnalités que doit fournir le système.
- diagramme d'activités (*Activity*) : variante du diagramme d'états-transitions, il permet de représenter le déclenchement d'événements en fonction des états du système et de modéliser des comportements parallélisables.
- diagramme d'états-transitions (*State machine*) : montre la manière dont l'état du système est modifié en fonction des événements du système.
- **diagrammes d'interaction (*Interaction*) :**
  - diagramme de séquence (*Sequence*) : la représentation séquentielle du déroulement des traitements et des interactions entre les éléments du système et/ou des acteurs
  - diagramme de communication (*Communication*) : la représentation simplifiée d'un diagramme de séquence se concentrant sur les échanges de messages entre les objets
  - diagramme global d'interaction (*Interaction overview*) : variante du diagramme d'activité où les nœuds sont des interactions, permet d'associer les notations du diagramme de séquence à celle du diagramme d'activité, ce qui permet de décrire une méthode complexe
  - diagramme de temps (*Timing*) : la représentation des interactions où l'aspect temporel est mis en valeur ; il permet de modéliser les contraintes d'interaction entre plusieurs objets, comme le changement d'état en réponse à un événement extérieur.

Dans la section suivante, nous nous intéressons au paradigme multi-agent que nous considérons bien adapté pour la mise en œuvre et la modélisation de notre problème.

## II.2.2 Approche SMA

Selon le FOLDOC qui est l'acronyme de Free On-Line Dictionary Of Computer (dictionnaire en ligne de l'informatique) recommandé par le site du laboratoire d'Intelligence Artificielle du MIT<sup>15</sup>, l'IA (Intelligence Artificielle) est le domaine de l'informatique concerné par les concepts et méthodes d'inférence et par les représentations symboliques des connaissances utilisées pour inférer [1]. Elle peut être vue comme une tentative de modéliser certains aspects de la pensée humaine [47]. L'IA a pour objectif de résoudre par ordinateur des problèmes que les humains résolvent généralement plus rapidement. La définition suivante reprend ce concept : L'IA a pour but de faire exécuter par l'ordinateur des tâches (surtout intellectuelles) pour lesquelles l'homme, dans un contexte donné, est meilleur que la machine [48]. Mais l'IA ne suffit pas à l'étude d'un travail coopératif ou du raisonnement d'un groupe de personnes (comme par exemple la recherche d'informations sur des sites répartis ou la résolution commune d'un problème). En effet, ces tâches font intervenir un ensemble d'entités intelligentes qui doivent au minimum communiquer (de manière directe ou indirecte), sinon coopérer, pour atteindre un objectif commun. L'IA ne traitant pas ces problèmes de groupe, une nouvelle branche est apparue : l'IAD (Intelligence Artificielle Distribuée) [49], [50], [51], [52], [47].

*«L'IAD est l'ensemble des disciplines tendant à faire que des ensembles d'entités imitent des comportements intelligents humains.»*

Les SMA constituent aujourd'hui une nouvelle technologie pour la conception et le contrôle de systèmes complexes. Un SMA est un système composé d'entités logicielles ou matérielles autonomes appelées agents. L'approche multi-agents repose sur plusieurs théories et concepts qui trouvent leurs origines dans plusieurs disciplines tels que la sociologie, la psychologie, les systèmes répartis, le génie logiciel. Dans le domaine de la logistique, plusieurs travaux de recherches se sont basés sur les SMA. Bearzotti et al. [53] [54] ont travaillé sur les perturbations qui menacent la CL. Le but de leurs travaux est de permettre à une CL de répondre aux événements perturbateurs en minimisant leur impact. Ces chercheurs ont utilisé une architecture basée sur les agents pour le système de Supply Chain Event Management (SCEM).

---

<sup>15</sup> Massachusetts Institute of Technology

## II.2.2.1 Agent : Définitions et particularités

### II.2.2.1.1 Définitions

Un agent est une entité qui fonctionne continuellement et de manière autonome dans un environnement où d'autres processus se déroulent et d'autres agents existent [55]. Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement. Dans un univers multi-agents, cette entité peut communiquer avec d'autres agents dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents [50]. Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, qui agit d'une façon autonome pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu [56]. Il s'agit d'une entité qui perçoit son environnement et agit sur celui-ci [57]. La définition retenue d'un agent en tant qu'entité interactive, établie par Flores [58], est assez exhaustive et explicite, elle se base sur des définitions préalablement établies par, entre autres, [56] : « Un agent est une entité interactive qui existe en tant que partie d'un environnement partagé par d'autres agents. C'est une entité conceptuelle qui perçoit et agit avec initiative ou en réaction dans un environnement où d'autres agents existent et interagissent les uns avec les autres, sur la base de connaissances partagées de communication et de représentation. »

Dans leur ouvrage [59], Jean-Pierre Briot et Yves Demazeau ont proposé la définition suivante : « Un agent est une entité logicielle ou physique à qui est attribuée une certaine mission qu'elle est capable d'accomplir de manière autonome et en coopération avec d'autres agents ».

*« Un agent peut être défini comme une entité intelligente faisant partie d'un SMA. L'espace dans lequel évolue le système et donc l'agent est appelé le monde, l'agent est capable de percevoir ce qui l'entoure, c'est-à-dire son environnement, et de le modifier dans un but donné et avec une certaine autonomie. Généralement, l'agent n'est pas unique, mais fait partie d'un SMA, il doit donc posséder des capacités de communication » [1].*

D'une manière plus détaillée, Ferber [50] définit un agent comme une entité physique ou virtuelle :

- qui est capable d'agir dans un environnement,
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs, individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- qui possède des ressources propres,

- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement, qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
- qui possède des compétences et offre des services,
- qui peut éventuellement se reproduire,
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

#### **II.2.2.1.2 Caractéristiques**

Un agent peut aussi être défini par rapport à ses propriétés qui sont essentiellement:

- l'autonomie est définie par Demazeau et Muller [49] comme une existence indépendante : un agent autonome est un agent dont l'existence ne dépend pas de celle des autres. Une autre définition de l'autonomie [57] stipule qu'un agent autonome est un agent qui agit sans l'intervention des humains ou des autres agents, et qui a de ce fait un contrôle sur ses actions et sur ses états internes. Un agent logiciel autonome est une entité logicielle qui, à la différence de l'objet, peut choisir de répondre ou de ne pas répondre à un éventuel appel à ses méthodes ou à ses compétences. L'agent est ainsi capable de prendre des initiatives sans avoir recours à des interventions externes.

- la réactivité d'un agent est sa capacité de percevoir et de réagir aux modifications survenues dans son environnement. Le choix des actions et de l'ordre dans lequel elles vont être entreprises, se fait en fonction de cette perception. Une autre définition a été donnée par [60] : « La réactivité est le fait que l'agent réagit selon le changement des circonstances. »

- la proactivité d'un agent, c'est sa capacité à se fixer ses propres buts et objectifs par ses propres initiatives. « L'agent montre un comportement en recevant des informations » [60].

- la continuité d'un agent correspond à sa capacité à être en permanence actif sans avoir à être provoqué par un stimulus externe. Flores définit cette continuité comme la persistance d'une identité et d'un état sur une longue période et ce à la différence des objets logiciels [58]. En effet ces agents logiciels sont souvent implémentés sur des processus légers dit "threads", qui s'exécutent en parallèles.

- la sociabilité c'est la capacité d'un agent de communiquer et d'interagir avec d'autres agents, soit pour échanger des informations nécessaires à son fonctionnement interne, soit pour faire aboutir des mécanismes de coopérations et /ou de coordination mutuelles des différentes actions mutuelles. « Les agents communiquent entre eux à travers un langage spécifique.» [60].

- « En ce qui concerne la notion d'intelligence, il s'agit de souligner le principe suivant : une entité est intelligente si elle est capable d'apprendre, c'est-à-dire d'adapter ses connaissances. Un agent peut donc être défini de la façon suivante : Un agent est une entité adaptative, rationnelle, autonome, capable de communication et d'action » [1].

### **II.2.2.2 Les systèmes multi-agents**

Le SMA est un nouveau paradigme de M&S (Modélisation et la Simulation) des systèmes complexes. Il est le résultat de la combinaison de deux orientations dans la recherche : l'IA et la modélisation orientée objet. Demazeau, [49], définit un SMA comme étant un ensemble de 4 vues principales appelé « l'approche voyelle » :

- La vue agent (A): décrit la structure interne d'un agent. Un agent est un système informatique qui agit d'une manière autonome dans un certain environnement afin de réaliser un objectif de conception [56]. La communauté scientifique distingue 3 types d'agents selon leur intelligence et leur processus décisionnel :

1) l'agent réactif qui réagit au stimulus de l'environnement par des actions prédéfinies [61] ;

2) l'agent cognitif a une faculté de raisonnement et de choix d'action selon la situation afin d'atteindre d'une manière optimale son objectif. Ce type d'agent possède aussi une faculté d'apprentissage et d'adaptation aux changements. Les agents BDI (Belief-Desire-Intention) représentent un exemple de ce type d'agent [53].

3) l'agent hybride fusionne des caractéristiques de l'agent réactif et de l'agent cognitif [62].

- La vue environnement (E) : décrit l'environnement dans lequel évolue l'agent. La FIPA (Federation of Intelligent Physical Agent) le décrit comme étant « ... tout ce qui est extérieur à l'agent ».

- La vue interaction (I) : décrit la relation dynamique entre les agents. Cette dynamique se fait à travers un protocole ou un langage d'interaction. C'est un échange de messages structurés entre les agents selon l'état interne de ce dernier et le cadre d'interaction (coordination, collaboration, coopération ou négociation).

- La vue organisation (O) : décrit la structure de tout le système en termes de groupes d'agents, hiérarchie, relations et de structure de l'environnement. De ce fait, l'approche AEIO décompose le SMA en plusieurs modules. Cette modularité facilite leur réutilisation selon les besoins de modélisation. D'un autre côté, les SMA sont sollicités pour les applications décentralisées, complexes, dynamiques et reconfigurables [63]. Donc, le paradigme agent offre un cadre naturellement orienté vers la modélisation de la CL.

En comparant les caractéristiques de chacun, nous trouvons une forte similarité entre les concepts et les pratiques organisationnelles. En effet, les SMA ainsi que les CL sont composés d'acteurs et d'entités qui interagissent au sein d'une organisation afin de réaliser un ensemble d'objectifs. Cette analogie privilégie l'utilisation de l'approche multi-agent comme moyen de modéliser la CL.

### **II.2.2.3 L'apport et l'intérêt des SMA dans les entrepôts**

Les SMA représentent un paradigme puissant pour simuler et modéliser la structure et le comportement dynamique des systèmes complexes. Il a été démontré que l'approche agent est la mieux adaptée pour prendre en considération l'impact des interactions entre les différents acteurs [63]. La communauté travaillant sur la modélisation et la simulation de la chaîne logistique est attirée par l'importance grandissante que suscitent les SMA dans le paysage scientifique et technologique.

Les industriels et les chercheurs ont recours aux plateformes multi-agents pour leur mise en place de systèmes performants et efficaces. Ces plateformes présentent plusieurs points forts dont leur capacité à s'adapter à n'importe quel type de problème et la prise de décision collective à travers des mécanismes de coordination et collaboration assurées de par la communication, les échanges et interactions entre les agents [64].

Selon Monteiro et al. [65], les entreprises doivent faire face à de nombreux problèmes décisionnels en rapport avec l'intégration et la gestion de leurs organisations dans un environnement fortement stochastique. *Dans cette optique, les caractéristiques des SMA semblent être particulièrement adaptées pour la représentation et la simulation des systèmes industriels dynamiques. En effet, il existe une forte analogie entre les caractéristiques architecturales et les pratiques organisationnelles des SMA et de la chaîne logistique. Les deux systèmes sont considérés comme un réseau d'entités et d'acteurs qui interagissent au sein d'une organisation afin d'atteindre un objectif en commun* [66]. Yuan et al. [67] constatent un ensemble d'analogies structurelles et organisationnelles entre les SMA et la chaîne logistique, ce qui rend cette dernière naturellement orientée pour la modélisation et la simulation du réseau. Cette analogie est réalisée selon plusieurs critères partant du principe qu'on est face à une situation qui présentent plusieurs entités ayant différents rôles et compétences et qui ont pour objectif de réaliser des tâches communes [66]:

-Dans une chaîne logistique, les acteurs de la chaîne ont des moyens, objectifs et compétences nécessaires pour exécuter des tâches. Ils suivent donc un ensemble de règles de gestion. Dans

un SMA, les agents possèdent des rôles, objectifs, capacités de raisonnement et compétence qu'ils mettent en œuvre selon différents modes décisionnels complexes.

-Les prises de décisions se font au travers de méthodes de coordination et/ou négociation entre les acteurs dans une chaîne logistique. De même, pour un SMA où les agents sont autonomes, proactifs et disposent de capacités sociales.

Du point de vue évolutivité du système, dans une structure dynamique, les acteurs s'inscrivent ou quittent la chaîne logistique. Dans un SMA, les agents peuvent rejoindre le système et d'autres peuvent être détruits.

#### **II.2.2.4 Application des SMA dans les entrepôts**

Les SMA sont devenus populaires pour la modélisation des systèmes complexes. En effet, plusieurs travaux adoptent les SMA afin de répondre à plusieurs problématiques dont la modélisation, la conception, la gestion (pilotage) et l'optimisation des flux, etc.

Nous présentons quelques travaux qui ont allié les SMA au domaine de la logistique.

- La conception des SMA auto-adaptatifs pour la gestion collaborative des coûts (Cost Collaborative Management CCM) des chaînes d'approvisionnement a suscité l'intérêt des travaux de recherche au cours des dernières années. Fu et al. [68] proposent un nouveau système qui intègre le SMA afin améliorer le CCM dans les chaînes d'approvisionnement. Les principales conclusions de cette étude indiquent que ces concepts, méthodes et mécanismes peuvent être utilisés pour créer un cadre pour la conception de systèmes SMA-CCM auto-adaptatifs, d'améliorer la coordination et l'interaction du système avec l'environnement extérieur, et de renforcer la capacité du système d'auto-apprentissage et d'auto-adaptation.

- Jiao et al [69], proposent un SMA utilisant une négociation multi contractuelle pour coordonner la fabrication dans une CL. Le système est développé à l'aide de la plate-forme JADE et est utilisé dans une compagnie de fabrication de téléphones mobiles.

- Dans leurs travaux [70], Liang et al. ont utilisé la technologie des agents pour simuler une CL et les méthodes de gestion du stock de chaque entité qui y appartient. Les agents emploient des algorithmes génétiques pour calculer la quantité optimale à commander pour chaque échelon. Chaque agent communique et partage les informations de la demande avec les autres afin de minimiser le coût global. Les supply chain managers des différentes entités partagent les informations avec confiance. En outre, les agents explorent et stockent les connaissances des supply chain managers sous forme de règles et les réutilisent plus tard en cas de problèmes semblables. Avec cette approche, les auteurs ont montré que le coût total est réduit au minimum.

- MASCF (Multi-Agent Supply Chain Framework) [71] est un outil qui offre une méthodologie générique conçue pour simplifier et faciliter les phases d'analyse et de conception des applications basées sur les SMA.

- MASC (Multi Agent Supply Chain) [72]: Ces travaux proposent un modèle dit 'MASC' à base d'agents cognitifs autonomes modélisant les installations de la chaîne et réifiant des rôles. Ce modèle est générique et permet de représenter toute chaîne logistique manufacturière. Il contribue à la gestion collaborative des activités des entreprises. Défini comme un outil d'aide à la décision mono et multi-critères, ce modèle permet d'évaluer les performances d'une entreprise dans un environnement dynamique et incertain où chaque acteur est décrit par un comportement propre encapsulé dans un agent dit 'agent-acteur'

- OCEAN (Organisation and Control Emergence with an Agent Network) est un système de pilotage à architecture ouverte, décentralisée et basée sur des contraintes (distribution des ressources de production, distribution des données techniques, adaptabilité pour répondre à la dynamique de l'environnement). Le but de ce système est de montrer que des coopérations au niveau global peuvent apparaître à partir des compétitions au niveau individuel [73]. Ce travail a été réalisé à l'INSA de Lyon (France) et à l'Université Montpellier 2 (France).

- Le simulateur du jeu du Bois Québécois [74] (jeu dérivé du jeu de la bière (en anglais, Beer Game) : il s'agit d'un jeu proposé par Sterman en 1989 pour faire prendre conscience aux étudiants et aux industriels de la dynamique d'une CL. C'est un simulateur à base de SMA servant à modéliser et simuler la CL de l'industrie forestière du Québec.

Parmi aussi les travaux de recherche qui s'appuient sur la modélisation multi-agent pour représenter et appréhender les chaînes logistiques, nous pouvons citer : Fung et Chen [75], Shen et al. [76] et Labarthe et al. [77].

De nos jours, optimiser est reconnu comme étant le mot-clé dans l'industrie. Nous proposons donc une approche qui consiste à intégrer les méthodes d'optimisation dans des SMA pour résoudre les problèmes liés à la gestion des entrepôts et la préparation de commandes.

### **II.3 Approche d'optimisation**

Optimiser : rendre optimal, donner à quelque chose les meilleures conditions d'utilisation, de fonctionnement ou de rendement au regard de certaines circonstances. (Définition de LAROUSSE).

Dans le domaine de la logistique, nous cherchons toujours à maximiser les bénéfices et minimiser les pénalités dues aux retards. Ces objectifs à atteindre s'inscrivent dans le cadre

des problèmes d'optimisation. Plusieurs méthodes sont développées afin d'aider à atteindre l'optimalité relativement aux décisions que les logisticiens doivent prendre (méthodes exactes, heuristiques et méta heuristiques) [64].

## II.3.1 Quelques concepts

### II.3.1.1 Définition d'un problème d'optimisation

En mathématique, un problème d'optimisation (encore appelé problème de programmation mathématique) consiste à trouver, parmi un élément (pour nous ici un vecteur de  $R$  à la puissance  $p$  mais ce peut être aussi un vecteur d'entiers, une fonction...) minimisant ou maximisant une fonction donnée de cet ensemble sur  $R$ .

*«Un problème d'optimisation, noté  $P(X,f)$  est caractérisé par un ensemble réalisable ou admissible  $X$  non-vide et une fonction objectif  $f$  qui associe un scalaire dans  $R$  à chaque élément  $x$  de l'ensemble  $X$ . Les éléments de  $X$  sont dits solutions réalisables. Résoudre le problème  $P(X,f)$  revient à trouver parmi les solutions réalisables, une qui minimise ou maximise  $f$ , c'est-à-dire dans le cas d'un problème de minimisation, trouver une solution  $x^* \in X$  telle que  $f(x) \geq f(x^*)$  pour tout élément  $x$  dans  $X$ . Une telle solution est dite optimale et sera notée  $x(X, f)$  » [78].* Il consiste à chercher une instantiation d'un ensemble de variables soumises à des contraintes, de façon à maximiser ou minimiser un critère. Lorsque les domaines de valeurs des variables sont discrets, on parle alors de problèmes d'optimisation combinatoire [79] (§ II.3.2).

### II.3.1.2 La notion d'algorithme

Un algorithme doit, autant que possible, répondre à un problème. Il s'agit d'une suite logique d'opérations permettant d'arriver à un résultat déterminé. Il décrit un comportement en termes d'actions réalisables a priori, et d'informations identifiées dans le lexique de l'algorithme.

La mesure de la performance d'un algorithme appliqué à un jeu donné se fait selon différents critères :

- Le temps d'exécution : Le temps d'exécution représente le temps nécessaire à l'algorithme pour calculer la solution. Il dépend évidemment de la taille des données fournies en entrée, ne serait-ce que parce qu'il faut les lire avant de les traiter.
- L'espace mémoire : L'espace mémoire d'un algorithme définit la quantité de mémoire utilisée pour exécuter l'algorithme.

- L'erreur : L'erreur représente l'erreur possible pouvant exister entre la solution optimale et l'erreur calculée.
- La robustesse : La robustesse d'un algorithme est son aptitude à se protéger de conditions anormales d'utilisation.

### II.3.1.3 Classification des problèmes d'optimisation

La complexité d'un problème représente une estimation du nombre d'instructions à exécuter pour résoudre les instances de ce problème, cette estimation étant un ordre de grandeur par rapport à la taille de l'instance. Pour un certain nombre de problèmes (coloriage des graphes, chemins hamiltoniens, factorisation des nombres entiers, problèmes d'emplois du temps), une solution peut être difficile à trouver, mais, si on en propose une, il est facile (= polynomial) de vérifier si elle convient.

Les classes de complexité ont été introduites pour les problèmes de décision. Pour ces problèmes, on définit notamment les classes suivantes :

- La classe *P* contient l'ensemble des problèmes polynomiaux, i.e., pouvant être résolus par un algorithme de complexité polynomiale. Cette classe caractérise l'ensemble des problèmes que l'on peut résoudre « efficacement ».
- La classe *NP* contient l'ensemble des problèmes polynomiaux non déterministes, i.e., pouvant être résolus par un algorithme de complexité polynomiale pour une machine non déterministe (que l'on peut voir comme une machine capable d'exécuter en parallèle un nombre fini d'alternatives).
- La classe *P-Espace* : un problème *P* est dit polynomial-espace, s'il existe un algorithme qui résout *P* en espace polynomial par rapport à la taille de ses données.
- Les problèmes NP-complet : s'il est dans *NP* et il est au moins aussi difficile que tout problème de *NP*. Cette catégorie est d'une importance particulière car si nous réussissons à prouver qu'un seul NP-C est effectivement dans *P*, alors tout *NP* est inclus dans *P*.

### II.3.2 Problèmes classiques d'optimisation combinatoire

Parmi les problèmes d'optimisation combinatoire, on peut citer le problème du sac à dos, le problème d'affectation, le PVC (Problème de Voyageur de Commerce) ainsi que le problème d'ordonnancement.

Résoudre un problème d'ordonnancement revient à organiser la réalisation d'un ensemble d'opérations élémentaires (les tâches), en exploitant les capacités des machines disponibles (les ressources). Cette réalisation doit respecter un ensemble de règles techniques (les

contraintes), tout en présentant le maximum d'efficacité (selon les critères d'évaluation choisies) [80] [81]. *Les éléments principaux constituant un problème d'ordonnement sont donc les suivants : les tâches, les ressources, les contraintes et la fonction critère* [82].

Dans cette partie, nous expliquons l'un des problèmes classiques d'optimisation combinatoire qui est le PVC. En effet, notre objectif est d'optimiser le chemin que parcourt l'opérateur lors de la préparation de commandes. Ce dernier exécute les commandes arrivant du WMS. Sa commande contient plusieurs articles et le préparateur doit passer par tous les emplacements de ces articles afin de valider sa commande. Nous avons donc fait une analogie entre notre problème et celui du voyageur de commerce. D'où l'intérêt que nous portons sur le PVC qui sera expliqué dans le paragraphe suivant.

### **II.3.2.1 Définition d'un problème de voyageur de commerce**

Le principe du PVC ou TSP (pour Traveling Salesman Problem) est le suivant : Un voyageur de commerce doit visiter  $n$  villes données en passant par chaque ville exactement une fois et revenir à son point de départ pour un moindre coût. Les distances entre les villes sont connues. Il faut trouver le chemin qui minimise la distance parcourue. La notion de distance peut-être remplacée par d'autres notions comme le temps qu'il met ou l'argent qu'il dépense. Historiquement, les premières approches mathématiques présentées pour le TSP ont été traitées au 19<sup>ième</sup> siècle par les mathématiciens Thomas Penyngton Kirkman et Sir William Rowan Hamilton. Ce dernier en a fait un jeu où des joueurs devaient effectuer une tournée qui passe par 20 points. Par la suite, le PVC a été traité plus en profondeur à partir des années 30. En 1954, des chercheurs ont utilisé la méthode du cutting-plane pour trouver une solution pour 49 villes [83]. Les solutions ont ensuite passé de 100 villes [84] jusqu'à 15112 villes [85].

Le problème peut être représenté sous forme d'un graphe et d'une matrice représentant le graphe. On se donne  $n$  villes et les distances entre chaque ville. Les villes sont indicées de 0 à  $n - 1$ . Voici un exemple (Figure II.2 et II.3) :

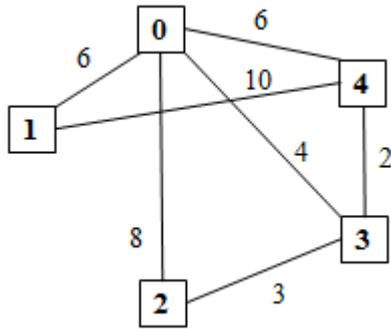


Figure II-2. Graphe du problème

$$\begin{bmatrix} -1 & 6 & 8 & 4 & 6 \\ 6 & -1 & -1 & -1 & 10 \\ 8 & -1 & -1 & 3 & -1 \\ 4 & -1 & 3 & -1 & 2 \\ 6 & 10 & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

Figure II-3. Matrice du problème

Dans la matrice qui représente le graphe, les arcs inexistant ont une distance strictement négative (-1) puisque certains arcs (chemins) n'existent pas. On ne considère pas les arcs qui relient une ville à elle-même. Le but est de trouver dans le graphe un cycle passant par tous les sommets une unique fois et qui soit de longueur minimale.

Le TSP doit revenir dans la ville de départ. On peut représenter une « tournée » par un vecteur de dimension n, contenant la liste des villes « visitées » dans l'ordre (Figure II.4).

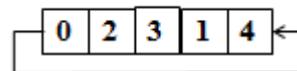


Figure II-4. Vecteur de dimension n contenant les villes visitées

D'une manière générale, à partir d'une matrice  $C = (C_{ij})$  où  $C_{ij}$  représente le coût du déplacement entre la ville i et la ville j ( $1 \leq i, j \leq n$ ), il faut trouver une permutation qui minimise la somme des coûts  $C_{\sigma(1)\sigma(2)} + C_{\sigma(2)\sigma(3)} + \dots + C_{\sigma(n-1)\sigma(n)} + C_{\sigma(n)\sigma(1)}$ , et donc trouver un cycle hamiltonien de longueur minimale dans un graphe pondéré complet. Un cycle est dit hamiltonien s'il passe par chaque nœud du graphe une et une seule fois.

### II.3.2.2 Étude de la complexité (convergence de l'algorithme/ PVC normal à multiple)

Le but du voyageur de commerce est de sélectionner la tournée qui minimise la distance totale parcourue. Le PVC rentre dans la catégorie des problèmes NP-complets (complexité pas polynomial).

La complexité en temps des algorithmes proposés croît exponentiellement avec n (le nombre de villes ou la taille du problème) [86].

L'existence d'un algorithme de complexité polynomiale reste inconnue. Un calcul rapide de la complexité montre qu'elle est en  $O(n!)$ . Avec  $n$  villes, il y a  $(n-1)!/2$  chemins possibles.

En supposant que le temps pour évaluer un trajet est de  $1 \mu s$ , le tableau 1 montre l'explosion combinatoire du PCV [87].

Les possibilités augmentent exponentiellement avec le nombre de villes (Tableau II.1).

Tableau II-1 : Nombre de possibilités de chemins et temps de calcul en fonction du nombre de villes (on suppose qu'il faut 1 micro pour évaluer une possibilité) [87]

Nb villes	Nb possibilités	Temps de calcul
5	12	12 $\mu s$
10	181440	0,18 $ms$
15	43 milliards	12 heures
20	60 E+15	1928 ans
25	310 E+21	9,8 milliards d'années

Les méthodes exactes donnent la solution optimale en un temps de calcul qui peut être long si le problème est compliqué à résoudre. Les algorithmes déterministes permettent de trouver la solution optimale, mais leur complexité est de l'ordre du factoriel.

Les méthodes approchées donnent une solution pas toujours optimale mais permettent d'obtenir rapidement une solution approchée. Les algorithmes d'approximation permettent de trouver une solution dont le coût est proche du coût de la solution optimale. Ils ont l'avantage de permettre en un temps raisonnable de trouver une solution. De ce fait, ils ne sont à utiliser que dans les cas où une solution approchée est acceptable.

Dans la partie qui suit, nous donnons un aperçu des heuristiques et des métaheuristiques.

### II.3.3 Heuristiques et méta heuristiques

En optimisation combinatoire, une heuristique est un algorithme approché permettant d'identifier en temps polynomial au moins une solution réalisable rapide, pas obligatoirement optimale. Pour le calcul d'une solution approchée d'un problème, le recours à une heuristique s'avère efficace ce qui peut accélérer le processus de résolution exacte. Nous pouvons classer les heuristiques en deux catégories :

- Méthodes de fouilles locales qui démarrent avec une solution initialement complète (probablement moins intéressante), et de manière répétitive essaie d'améliorer cette solution en explorant son voisinage.
- Méthodes constructives qui génèrent des solutions à partir d'une solution initiale en essayant d'en ajouter petit à petit des éléments jusqu'à ce qu'une solution complète soit obtenue.

Face aux difficultés rencontrées par les heuristiques pour avoir une solution réalisable de bonne qualité pour des problèmes d'optimisation difficiles, les métaheuristiques ont fait leur apparition. Ces algorithmes sont plus complets et complexes qu'une simple heuristique, et permettent généralement d'obtenir une solution de très bonne qualité pour des problèmes issus des domaines de la recherche opérationnelle ou de l'ingénierie dont on ne connaît pas de méthodes efficaces pour les traiter ou bien quand la résolution du problème nécessite un temps élevé ou une grande mémoire de stockage. Le rapport entre le temps d'exécution et la qualité de la solution trouvée d'une métaheuristique reste alors dans la majorité des cas très intéressant par rapport aux différents types d'approches de résolution. Une métaheuristique peut être adaptée pour différents types de problèmes, tandis qu'une heuristique est utilisée à un problème donné. Plusieurs d'entre elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels dans de nombreux domaines tels que : la biologie (algorithmes évolutionnaires et génétiques) la physique (recuit simulé), et aussi l'éthologie (algorithmes de colonies de fourmis). Les métaheuristiques peuvent être classées de nombreuses façons. On peut distinguer celles qui travaillent avec une population de solutions de celles qui ne manipulent qu'une seule solution à la fois. Les méthodes qui tentent itérativement d'améliorer une solution sont appelées méthodes de recherche locale ou méthodes de trajectoire. Ces méthodes construisent une trajectoire dans l'espace des solutions en tentant de se diriger vers des solutions optimales. Les exemples les plus connus de ces méthodes sont : La recherche Tabou et le Recuit Simulé. Les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim de particules et Les algorithmes de colonies de fourmis présentent les exemples les plus connus des méthodes qui travaillent avec une population.

### **II.3.3.1      Algorithme de Lin-Kernighan**

L'algorithme de Lin-Kernighan [88] représente l'une des meilleures heuristiques pour le PVC. Il consiste à commencer avec une tournée donnée puis chercher dans le voisinage de la solution courante défini par l'opération  $\lambda$ -opt move toute tournée pouvant améliorer la configuration courante.

L'algorithme examine, à chaque étape de l'itération, pour des valeurs croissantes de  $\lambda$  (à partir de 2) si l'échange de  $\lambda$  liens produit une tournée plus courte. Il poursuit ainsi jusqu'à ce qu'on ne peut plus avoir d'amélioration. L'opération  $\lambda$ -opt move consiste à supprimer  $\lambda$  liens (arêtes) et à reconnecter les segments restants par de nouveaux liens, en renversant si possible le sens de parcours d'un ou de plusieurs de ces segments. Plus la valeur de  $\lambda$  est grande, plus la solution finale est proche de l'optimum et plus le temps d'exécution devient élevé. En général, on utilise des valeurs entières de  $\lambda \in \{2, 3, 4, 5\}$ . La Figure II.5 illustre l'opération 2-opt move.

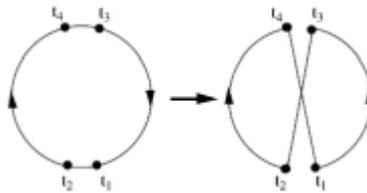


Figure II-5. 2-opt move [86]

### II.3.3.2 Les algorithmes génétiques

Cet algorithme consiste en une population de  $N$  permutations de solutions du problème représentées par des individus. Cette population choisie aléatoirement est appelée population parent. Le degré d'adaptation (Fitness ou coût) d'un individu à l'environnement est exprimé par la valeur de la fonction de coût  $f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} C_{x(i)x(i+1)} + C_{x(n)x(1)}$ , où  $x$  est la solution que l'individu représente [86]. Un individu est d'autant mieux adapté à son environnement que le coût de la solution qu'il représente est plus faible. Au sein de cette population, intervient alors la sélection au hasard d'un ou de deux parents, qui produisent une nouvelle solution, à travers les opérateurs génétiques qui sont le croisement et la mutation. La nouvelle population, obtenue par le choix de  $N$  individus parmi les populations parent et enfant, est appelée génération suivante. En itérant ce processus, on produit une population plus riche en individus mieux adaptés.

On parle d'algorithmes stochastiques itératifs qui opèrent sur des individus codés, à partir d'une population initiale. Cette population évolue de la génération  $k$  à la génération  $k+1$  à l'aide de trois opérateurs :

- Opérateur de Sélection
- Opérateur de Croisement
- Opérateur de Mutation.

Chaque individu est reproduit en fonction de son adaptation au problème (fitness). On code les individus de manière à les faire "évoluer" grâce aux opérateurs. On effectue des

croisements sur les individus destinés à être reproduits et des mutations aléatoires d'où la génération de nouveaux individus. La figure II.6 illustre les étapes d'un algorithme génétiques.  $P_c$  représente la probabilité de croisement et  $P_m$  la probabilité de mutation.

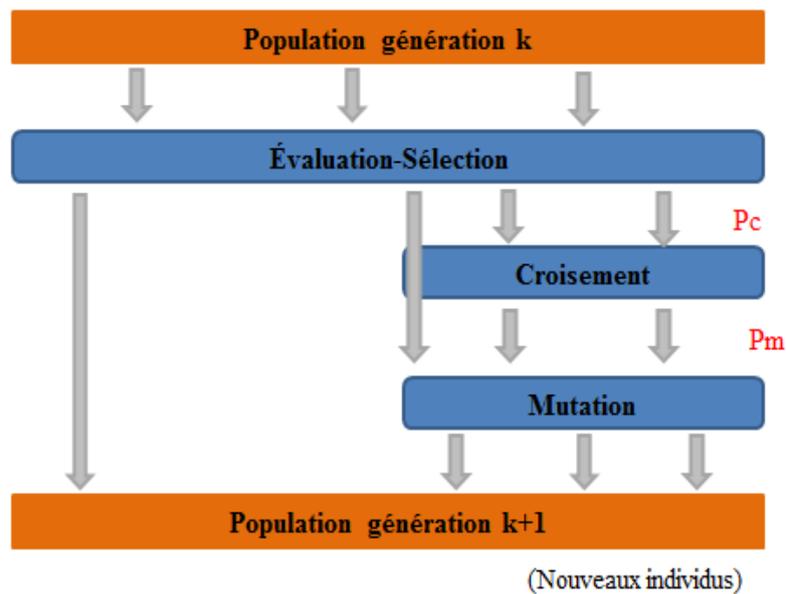


Figure II-6. Les étapes d'un algorithme génétique

### II.3.3.3 Algorithme de colonies de fourmis (Ant System)

Ces algorithmes s'inspirent des comportements collectifs de suivi de piste et de dépôt observés dans les colonies de fourmis. Cet algorithme peut être utilisé pour résoudre le PVC. En effet, un ensemble d'agents, appelés fourmis, recherchent en parallèle une meilleure solution au PVC en coopérant indirectement à travers les phéromones qu'ils déposent sur le graphe du PVC (Figure II.7).



Figure II-7. Des fourmis suivant une piste de phéromone [89]

Dans le système de colonies de fourmis,  $m$  fourmis (agents) sont initialement positionnées sur  $n$  villes choisies par une règle d'initialisation (e.g. aléatoirement). Chaque fourmi construit une tournée représentant une solution admissible du TSP en choisissant les villes à visiter par la règle de transition d'état. Pendant la construction de sa tournée, la fourmi modifie également la quantité de phéromone sur l'arc visité en appliquant la règle de mise à jour

locale. Une fois que toutes les fourmis ont terminé leurs tournées, une certaine quantité de phéromones est déposée sur la plus courte tournée par la règle de mise à jour globale.

Soit  $N$  le nombre de villes et  $M$  le nombre de fourmis,  $d(i,j)$  la distance entre les villes  $i$  et  $j$  et  $P(i,j)$  la quantité de phéromone sur le chemin entre ces deux villes.

Initialisation

```
for iteration:=1 to NbIteration
```

```
  for i:=1 to N
```

```
    for k:=1 to M
```

```
      choix de la prochaine ville pour la fourmi k
```

```
      dépôt de la trace locale
```

```
    endfor
```

```
  endfor
```

```
  Choix de la fourmi ayant le plus court chemin
```

```
  dépôt de la trace globale
```

```
endfor
```

### II.3.4 Méthodes exactes

Nous présentons dans la section suivante les deux méthodes exactes les plus utilisées dans la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire à savoir l'exploration arborescente et la programmation linéaire.

#### II.3.4.1 La méthode par séparation-évaluation (branch & bound)

Il s'agit d'une méthode algorithmique classique pour résoudre un problème d'optimisation combinatoire plus connu sous son appellation anglaise Branch and Bound (B&B) [90]. Cette méthode consiste à rechercher une solution optimale dans un ensemble combinatoire de solutions possibles. Elle repose d'abord sur la séparation (branch) de l'ensemble des solutions en sous-ensembles plus petits. L'exploration de ces solutions utilise ensuite une évaluation optimiste pour majorer (bound) les sous-ensembles, ce qui permet de ne plus considérer que ceux susceptibles de contenir une solution potentiellement meilleure que la solution courante.

Le branch-and-bound est basé sur trois axes principaux :

- L'évaluation,

- La séparation,

- La stratégie de parcours.

- L'évaluation : consiste à évaluer les solutions d'un sous-ensemble de façon optimiste, c'est-à-dire en majorant la valeur de la meilleure solution de ce sous-ensemble. L'algorithme propose de parcourir l'arborescence des solutions possibles tout en évaluant chaque sous-ensemble de solutions de façon optimiste. Lors de ce parcours, il maintient la valeur  $V$  de la

meilleure solution trouvée jusqu'à présent. Quand l'évaluation d'un sous-ensemble donne une valeur plus faible que V, il est inutile d'explorer plus loin ce sous-ensemble. Les paragraphes suivants détaillent les différentes opérations de l'algorithme.

- La séparation : Pour décrire l'opération de séparation, il suffit de dire comment on divise un ensemble de solutions en sous-ensembles. Cela revient à décrire comment construire l'arbre permettant d'énumérer toutes les solutions. L'ensemble de nœuds de l'arbre qu'il reste encore à parcourir comme étant susceptibles de contenir une solution optimale, c'est-à-dire encore à diviser, est appelé ensemble des nœuds actifs.

- La stratégie de parcours

- La largeur d'abord: Cette stratégie favorise les sommets les plus proches de la racine en faisant moins de séparations du problème initial. Elle est moins efficace que les deux autres stratégies présentées ci-après.

- La profondeur d'abord: Cette stratégie avantage les sommets les plus éloignés de la racine (de profondeur la plus élevée) en appliquant plus de séparations au problème initial. Cette voie mène rapidement à une solution optimale en économisant la mémoire.

- Le meilleur d'abord: Cette stratégie consiste à explorer des sous problèmes possédant la meilleure borne. Elle permet aussi d'éviter l'exploration de tous les sous-problèmes qui possèdent une mauvaise évaluation par rapport à la valeur optimale.

### II.3.4.2 La programmation linéaire

Modéliser un problème consiste à identifier: les variables intrinsèques (inconnues), les différentes contraintes auxquelles sont soumises ces variables ainsi que l'objectif visé (optimisation). Dans un problème de programmation linéaire (PL), on cherche à optimiser une fonction objectif linéaire sous un certain nombre de contraintes. Ces contraintes sont modélisées par des équations ou inéquations linéaires.

Formulation d'un programme linéaire :

• **Variables réelles** :  $x_1, x_2, \dots, x_n$

• **Fonction objectif linéaire, à optimiser (min ou max)** :  $z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

• **Contraintes linéaires (égalités ou inégalités)** :

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

Une méthode d'optimisation adéquate est choisie avec soin afin de bien cadrer avec le contexte et résoudre le problème de manière efficace. Dans cette section du chapitre, nous nous sommes intéressés aux problèmes d'optimisation combinatoire et aux différentes méthodes de résolution.

Nous avons présenté les deux grandes approches de résolution existantes : Les méthodes exactes telles que la programmation linéaire et l'exploration arborescente qui permettent d'obtenir la solution optimale mais le temps de calcul peut être long et les méthodes approchées qui permettent d'obtenir une solution approchée, pas toujours optimale. Dans la Figure II.8, Collette et al. [91] présentent une large panoplie de méthodes d'optimisation. Ces méthodes sont classées selon la nature du problème et sa complexité.

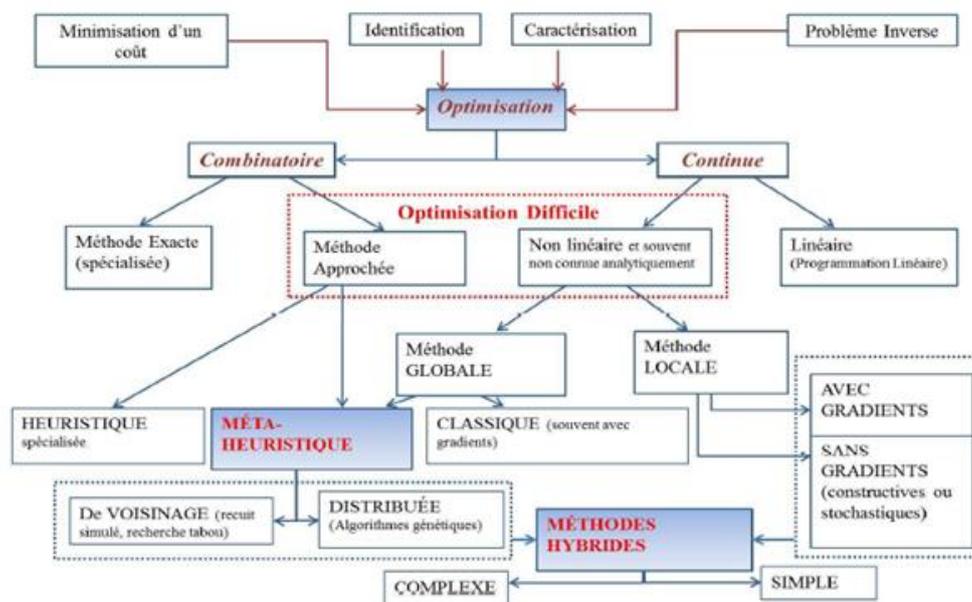


Figure II-8. Classification des méthodes de résolution [91]

### II.3.5 Applications de quelques approches d'optimisation dans les entrepôts

Les travaux de recherches réalisés dans les entrepôts ont tous pour but de gagner en productivité. Dans la préparation de commande, réduire le temps de cette tâche a fait l'objet de plusieurs recherches.

Le problème d'«order batching», un problème de décision majeur dans la conception et le contrôle des systèmes d'entreposage [14] et un facteur clé pour la réussite d'un système de préparation de commandes [92], détermine la façon dont les commandes sont regroupées en lots à traiter dans un parcours de picking afin de réduire la distance [93]. Parce qu'obtenir des solutions précises en exerçant des efforts raisonnables de calcul est impraticable [94], les

chercheurs ont développé des méthodes heuristiques pour déterminer les solutions optimales les plus proches.

De Koster et al. [15] ont combiné les heuristiques bien connues avec de nouvelles heuristiques dans le but de générer des algorithmes efficaces, rapides et robustes pour le traitement des commandes dans les entrepôts et qui sont suffisamment simple à utiliser dans des situations du monde réel. Gademann et al.[95] ont présenté dans leurs travaux un algorithme exact qui affecte les commandes aux lots afin de minimiser le délai maximal pour chaque lot. Hsu et al. [96] ont développé un algorithme génétique pour la gestion des commandes avec différents types de structures de lots et de dispositions de l'entrepôt afin de minimiser la distance parcourue lors de la préparation de commandes.

Boudia et al. [97] ont travaillé sur les problèmes de production et distribution multi période. Ce problème NP-difficile consiste à minimiser la somme des trois coûts, celui de la distribution, de l'inventaire et de la production. Il a été résolu par les algorithmes mémétiques. Contrairement aux méthodes classiques à deux phases, dont la planification de la production puis la planification de la distribution, l'algorithme aborde simultanément les décisions de production et de distribution.

## **II.4 L'alliance entre les SMA et l'optimisation dans le domaine de la logistique**

La combinaison des SMA et de l'optimisation offrent une approche de résolution innovante et efficace pour la réduction de la complexité des systèmes réels.

Un agent est associé à la construction ou à l'amélioration d'une solution d'un problème d'optimisation. Les communications et interactions entre agents visent à échanger des informations à propos des zones prometteuses de l'espace de recherche, de manière à rendre l'exploration plus efficace. L'intérêt de l'utilisation du paradigme multi-agent pour les approches d'optimisation est tout d'abord de pouvoir décrire de manière naturelle le fonctionnement des méthodes d'optimisation, ce qui en facilite la conception. Donc, dans un premier temps, les SMA offrent un support informatique performant et flexible pour la modélisation et la mise en œuvre des problèmes d'optimisation. Ensuite, en termes de résolution, la distribution du calcul permet une exploration plus efficace de l'espace de recherche tout en permettant une mise en œuvre parallèle possible des algorithmes mis en place. Les systèmes multi-agents semblent donc adaptés pour la résolution de divers types de problèmes combinatoires. Cette alliance permet une application simultanée de plusieurs algorithmes de recherche locale, et nous offre la possibilité d'explorer un grand nombre de

solutions, en prenant différentes directions définies par divers fonctions de voisinage considérées à la fois, et ainsi accélérer la recherche d'une bonne solution.

Nous nous basons alors sur les principes des SMA, qui nous permettent d'avoir une collaboration entre les différentes méthodes et heuristiques. Notons que l'utilisation de ces systèmes, pour la résolution de certains problèmes industriels, présente des avantages dus à la fois, à l'exécution parallèle de plusieurs procédures et aussi à la présence de collaboration entre la totalité de ses composantes.

## **II.5 Travaux antérieurs et positionnement**

Dans cette partie, nous citons les différents travaux de recherche qui se sont concentrés sur l'amélioration du processus de la préparation de commandes dans les entrepôts.

Dans les entrepôts qui opèrent manuellement, la distance parcourue par l'opérateur a des effets profonds sur le coût et l'efficacité de l'entrepôt. L'estimation de cette distance est difficile vu que l'entrepôt est un environnement stochastique, affecté par un grand nombre de paramètres. Une équipe de chercheurs a réalisé une étude statistique employant une modélisation à base d'agent qui a pour objectif d'estimer les effets des différents paramètres qui influe la distance parcourue dans les entrepôts [98]. Il présente une étude statique pour évaluer la façon dont les différents paramètres de l'entrepôt et leurs interactions influent sur le chemin de picking. Pour estimer le parcours de préparation de commandes, ils ont simulées différents modèles utilisant la modélisation à base d'agent. Avec 324 modèles différents, la modélisation à base d'agent a permis de construire un modèle informatique pour simuler tous les cas. Les études montrent qu'avoir une allée transversale et utiliser une politique de stockage basée sur les classes diminue la distance parcourue par les opérateurs. Les résultats obtenus par cette équipe de chercheurs ont montré que le choix de la meilleure politique de routage dépend de la disposition de l'entrepôt, ce qui prouve l'importance de prendre en compte les interactions entre les différents paramètres. Ces paramètres sont : le nombre d'allées, la longueur de l'allée, le nombre de blocs de stockage, la stratégie de stockage, la politique de routage et la taille de la commande. Cette équipe de chercheurs a démontré que la distance parcourue augmente si la taille de la commande, le nombre d'allées et la longueur des allées augmentent.

Dans ses travaux de thèse, Horvat [99] a présenté un aperçu sur les approches de la préparation de commandes (Figure II.9).

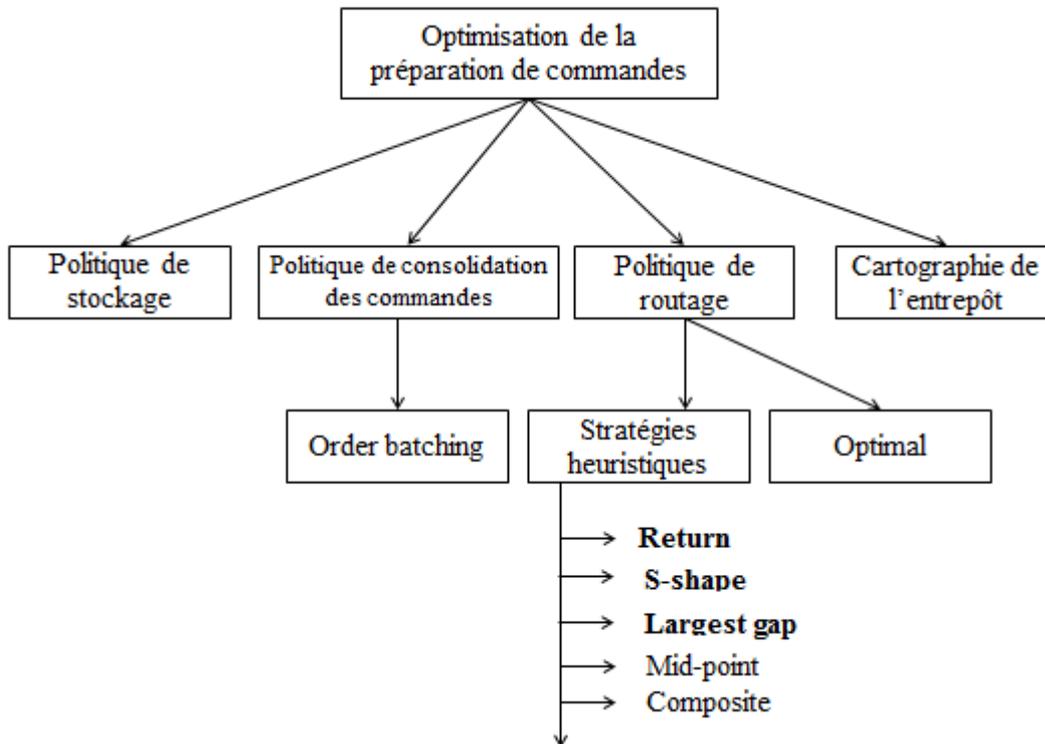


Figure II-9. Approches d'optimisation de la préparation de commandes [99]

Il explique les différentes stratégies de picking qui ont pour but de réduire le trajet parcouru par l'opérateur lors de la préparation de commandes.

La figure II.10 représente des rectangles noirs symbolisant l'emplacement des stockages à partir desquels les produits vont être pickés (pick location).

a) The return strategy : le préparateur de commandes entre dans chaque allée où il y a un article à picker à partir de l'entrée de l'allée, traverse l'allée jusqu'à l'article le plus loin et retourne à l'entrée de l'allée.

b) The S-Shape routing : le préparateur traverse successivement chaque allée entièrement si elle contient au moins un article, la première allée est traversée à partir de son entrée, la deuxième à partir de sa sortie,

c) The Largest Gap routing : l'écart représente la séparation entre deux emplacements d'articles adjacents, entre le premier choix et l'allée d'avant, ou entre le dernier pick et l'allée de retour. Le préparateur de commande retourne au début de l'allée de l'emplacement de picking qui fait partie du plus large gap.

d) The combined strategy : intègre des éléments de S-Shape et « return strategy ». Les allées peuvent être traversées entièrement où l'opérateur peut entrer et sortir de l'allée à partir de la même entrée.

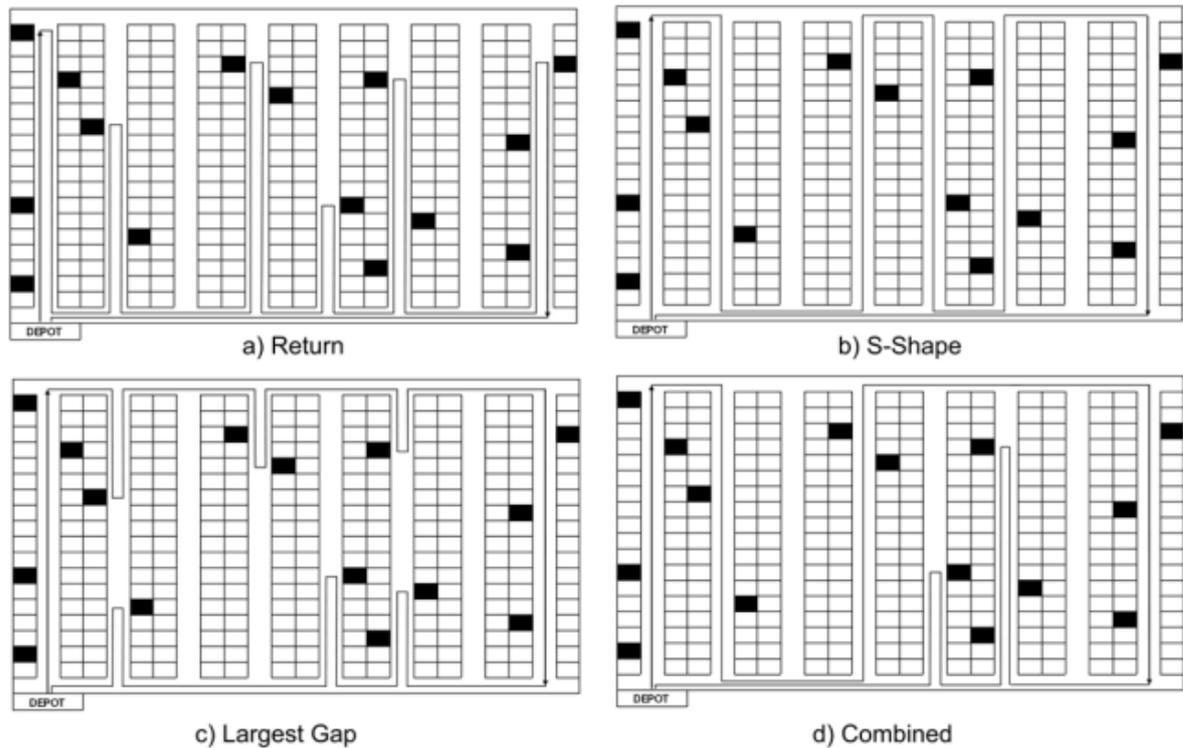


Figure II-10. Les stratégies de routing [19]

Dans les systèmes de préparation de commandes manuelles, les préparateurs de commandes circulent dans l'entrepôt de distribution dans le but de recueillir les commandes clients. Le regroupement des commandes (Order batching) consiste à combiner ces commandes clients. Deux types de problèmes peuvent être distingués: le regroupement des commandes en off-line (statique) où toutes les commandes sont connues à l'avance et le regroupement des commandes en on-line (dynamique) où les commandes des clients deviennent disponibles dynamiquement au fil du temps. Henn [100] travaille sur le problème du regroupement des commandes on-line dans lequel le temps d'achèvement maximal des commandes clients qui arrivent dans un certain laps de temps doit être minimisé. L'auteur montre comment les approches heuristiques pour les commandes off-line peuvent être modifiées afin de faire face à la situation quand il s'agit des commandes on-line. Il démontre que le choix d'une méthode de regroupement des commandes peut conduire à une réduction du temps d'achèvement maximal.

Une politique de regroupement des commandes détermine la façon dont les commandes sont combinées pour former des lots ou ce qu'on appelle aussi du multi-client. Des études antérieures sur le batching portées principalement sur les entrepôts manuels classiques, et leurs effets sur les systèmes «pick-and-pass» ont rarement été discutées. Le Pick and Pass est une méthode de tri utilisée par les centres de distribution dans les applications où un nombre

élevé de références existe dans chaque pick. Les systèmes « pick-and-pass » jouent un rôle clé dans la gestion d'une chaîne d'approvisionnement efficace parce que la livraison rapide de petites et fréquentes commandes d'inventaire est devenue une pratique de négociation cruciale en raison de la hausse du e-commerce et du e-business. Pan et al, [101] proposent une approche basée sur les algorithmes génétiques qui a pour objectif d'équilibrer la charge de travail de chaque zone de picking et de minimiser le nombre de lots dans un système « pick-and-pass ». Ils proposent un modèle de simulation basé sur Flexsim qui est utilisé pour mettre en œuvre un algorithme heuristique proposé. Flexsim est un logiciel de simulation qui facilite l'analyse et l'optimisation de flux de tout système logistique et de production.

Hwang et al, [102] travaillent sur un modèle d'évaluation de la performance pour la préparation de commandes facilité pour la conception d'entrepôt dans un centre d'approvisionnement en réduisant la distance parcourue par les transporteurs. Cette étude comprend des aspects de détails importants de la conception de l'entrepôt et des paramètres opérationnels tels que la taille de l'entrepôt, la taille du rack, le nombre de transporteurs et les performances du système.

Les résultats sont validés par des méthodes de simulation en utilisant le simulateur AutoMod qui est un logiciel de simulation de système logistique et de production. Un programme informatique systématique et pratique a été développé. Il était prouvé que la méthode proposée est potentiellement efficace et utile dans l'analyse de la performance pour la préparation de commandes d'entrepôt.

Shiau et al. [103] développent un algorithme hybride générant une séquence de picking pour combiner les opérations de picking et de packing. Un WMS générique, pour une usine de thé dans le centre de Taiwan, a été mis en œuvre pour démontrer l'élimination du tampon de stockage et de la réduction du temps de fonctionnement.

Nous nous intéressons dans cette thèse à l'optimisation des déplacements des opérateurs en entrepôts. Ce problème a souvent été réduit à un PVC, partant du fait que l'optimisation s'applique sur une commande affectée à l'opérateur. Notre but est d'apporter plus d'autonomie aux préparateurs et donc de lui affecter une mission de travail composée de plusieurs commandes. Nous nous retrouvons plus face à un PVC mais plutôt un PVCMD (Problème de Voyageur de Commerce Dynamique et Multiple) : Multiple, puisque nous appliquons ce problème au sein d'un entrepôt qui forcément contient plusieurs préparateurs de commandes et dynamique, parce que contrairement au PVC classique l'opérateur ne retourne pas à la ville de départ c'est-à-dire au premier article de la commande courante mais enchaîne la commande suivante selon sa localisation en temps réel dans l'entrepôt. Les distances entre

les articles de la commande étant connues, nous cherchons à trouver le chemin qui minimise la distance parcourue lors de la préparation de commandes en mode « pick » ou « put ». L'opérateur doit visiter les emplacements de tous les articles de la commande en passant par chaque article exactement une fois. Il commence par le meilleur article choisi selon sa position initiale mais ne termine pas en retournant à l'article de départ comme pour un voyageur de commerce classique. Le but est de trouver le chemin qui minimise la distance parcourue.

Le cœur de cette thèse est le mariage entre les SMA et l'optimisation qui a pour but de modéliser et optimiser des modèles complexes en logistiques. Nous proposons des approches et algorithmes d'optimisation qui permettent de réduire essentiellement le nombre de pas que parcourent les préparateurs de commandes lors de leurs tournées de prélèvement ou de dépose d'articles. En effet, réussir à rationaliser et à optimiser cette tâche permet à la fois d'apporter des gains de productivité indéniables et d'améliorer la qualité de service et donc l'image de marque de l'entreprise. Optimiser l'ordre de prélèvement permet également de diminuer les risques d'erreurs grâce à l'utilisation des codes à barres pour la vérification de l'emplacement de l'opérateur au bon endroit devant le bon colis. Réduire les erreurs permet d'envoyer les commandes dans le respect des délais négociés avec le client. Tous ces facteurs nous ont encouragés à se concentrer sur cette tâche, l'améliorer et lui intégrer des algorithmes d'optimisation performants permettant de concilier contraintes produits, optimisation de l'espace et productivité des opérateurs. L'originalité de nos travaux consiste en le regroupement et l'alliance de différentes techniques et paradigmes qui ont pour but de réduire le coût et d'améliorer les performances dans les entrepôts. Nous proposons un SAD qui a pour but de réduire principalement le parcours de l'opérateur lors de sa mission de picking. La technologie de la RA est intégrée dans ce système puisque le préparateur de commandes reçoit un parcours optimisé grâce aux approches proposées (§ III), un parcours affiché sur son champ de vision grâce à des lunettes connectées qui assureront le pilotage et le guidage.

## **II.6 Conclusion**

La conception et la réalisation d'outils d'aide à la décision consistent à proposer un outil adapté à la résolution et passe par une démarche composée de trois étapes : la modélisation du problème, la conception d'algorithmes d'optimisation et la validation des solutions obtenues [3]. Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter les SMA en mettant l'accent sur les contributions qu'ils sont susceptibles d'apporter surtout pour des systèmes complexes comme

celui que nous sommes en train de traiter. En second lieu, nous avons présenté le concept d'optimisation ainsi que les principales notions qui y sont reliées.

Nous adoptons dans notre approche un croisement mutuel entre les deux concepts d'optimisation et de SMA tout en intégrant les nouvelles technologies dans les entrepôts. Une architecture spécifique basée sur cette alliance est détaillée dans le chapitre suivant.

# **CHAPITRE III. L'alliance entre les Systèmes Multi-Agents et l'Optimisation pour l'aide à la gestion et la préparation de commandes dans les entrepôts**

## **III.1 Introduction**

L'entrepôt est un espace au sein duquel se déroule une multitude d'activités. Les logisticiens et les éditeurs précisent souvent que les gains de productivité s'obtiennent essentiellement à travers une optimisation très fine de chacune d'elles. Cette optimisation peut constituer une source non négligeable d'amélioration et de progrès.

Dans le processus de la logistique commerciale, une étape clé est la préparation de la commande. Une tâche qui répond à un double objectif du magasin : rapidité et efficacité. C'est à dire préparer des colis sans erreur tout en maintenant une excellente productivité pour des coûts logistiques maîtrisés. L'optimisation de cette phase peut être réalisée selon différentes classes de problèmes pouvant influencer les performances directes du système. Nous avons choisi de travailler sur un SAD optimisant les parcours des préparateurs de commandes en utilisant les nouvelles technologies et notamment les objets connectés en entrepôts pour une mise en œuvre et un pilotage efficaces et en temps réel. Pour la résolution de ce problème, nous proposons un système d'aide à la gestion des entrepôts basé sur une alliance entre l'optimisation et le SMA connecté à des lunettes à base de RA.

La suite du chapitre est organisée comme suit : l'architecture multi-agent est présentée dans le paragraphe III.2 ainsi que le comportement de chaque agent. La formalisation du problème et l'approche d'optimisation sont proposées dans le paragraphe III.3.

## **III.2 Système d'aide à la gestion des entrepôts à base d'agents**

Nous avons choisi de nous baser sur l'approche multi-agent car cette approche permet de décomposer un système complexe en un ensemble d'entités autonomes en interaction avec des comportements différents : optimisateur, préparateur, mobile, etc. Un agent mobile peut représenter une entité mobile en déplacement comme les opérateurs en entrepôt. Un agent optimisateur peut représenter le cœur logiciel du SAD et peut comprendre une bibliothèque d'algorithmes utilisés selon la complexité de la situation à optimiser. En plus, les interactions entre les différents agents d'un système peuvent différer selon les tendances internes des agents et les objectifs à atteindre : négociation en cas de conflit, collaboration pour atteindre un objectif global commun, etc.

### **III.2.1 Architecture multi-agents proposée**

Nous proposons un système dynamique (Figure III.1) basé sur l'interaction de cinq types d'agents :

- Les Agents Interface(AI),

- les Agents Identificateur (AId),
- les Agents Optimisateur (AO),
- les Agents Mobiles (AM),
- les Agents Analyse des Manquants(A2M).

Dans notre modèle, une fois la connexion avec le système WMS est établie, le processus de préparation des commandes est lancé. Les agents AI interagissent avec le WMS. Ils jouent le rôle d'interface entre les utilisateurs et le système. La commande est analysée par les agents AId. Ces derniers décomposent la commande et vérifient les ressources. Les agents AO ont pour rôle d'optimiser les chemins de picking ou putting avant de les envoyer sous forme de missions aux agents AM qui représentent les opérateurs (préparateurs de commandes) dans l'entrepôt. Les agents AM, qui sont munis de lunettes à RA, ont pour mission de parcourir l'entrepôt afin de collecter ou déposer les produits selon le mode de la préparation de commandes. Ainsi, ils reçoivent le parcours optimisé par l'agent AO et voient s'afficher dans leur champ de vision les informations et les flèches nécessaires pour les guider dans l'entrepôt. Les lunettes à RA ou le « pick-by-vision » assurent une préparation de commandes sans erreur et avec un gain en temps et en productivité. Les agents A2M réagissent en fonction du statut de la commande envoyée par les agents AM. Les agents A2M représentent le point de contrôle de l'architecture. Ils sont utilisés pour le contrôle, la vérification et l'analyse générale des informations concernant le statut de chaque commande traitée dans l'entrepôt.

L'existence même des agents du système dépend exclusivement de l'activité dans l'entrepôt. En d'autres termes, la première commande de la journée envoyée par le WMS crée l'ensemble des agents du système. S'il n'y a pas de requête pendant une assez longue période appelée période d'inactivité et notée par  $\Delta_{\infty}$ , aucun agent n'existe dans le système. À un instant  $t$ , la formulation d'une commande nécessite la création d'un agent AI et déclenche la création d'un agent AId, un agent AO, un agent A2M et un certain nombre d'agents AM. Les agents AId, AO, A2M, AM ainsi créés à l'instant  $t$  sont appelés société d'agents  $P_t$  [104].

Ensuite, et pendant une courte période de temps, qu'on appelle période d'acquisition et qu'on note par  $\Delta_{\varepsilon}$ , chaque nouvelle requête formulée par un nouvel agent AI, est gérée par la même société d'agents  $P_t$  dont la création a été déclenchée par la première requête formulée à l'instant  $t$ . Si à l'instant  $t+\Delta_{\varepsilon}$ , toutes les sociétés d'agents préalablement créées sont indisponibles, alors la formulation de nouvelles requêtes déclenche la création d'une nouvelle société  $P_{t+\Delta_{\varepsilon}}$  et ainsi de suite. Dès qu'une société  $P_{t_i}$  créée à l'instant  $t_i$ , est disponible, elle

devient prête à gérer un ensemble de requêtes formulées pendant une nouvelle période  $\Delta_\varepsilon$  à un nouvel instant  $t_j$  avec  $t_i \leq t_j$ . On appelle les requêtes formulées pendant la période  $\Delta_\varepsilon$ , des requêtes  $\Delta_\varepsilon$  – simultanées. Cependant, dès que la disponibilité d’une société ou d’un agent AI atteint la période  $\Delta_\infty$ , alors cette société ou cet agent est automatiquement détruit.

Ce concept montre que notre architecture est dynamique, évolutive et dépend du nombre de requêtes simultanées envoyées par le WMS.

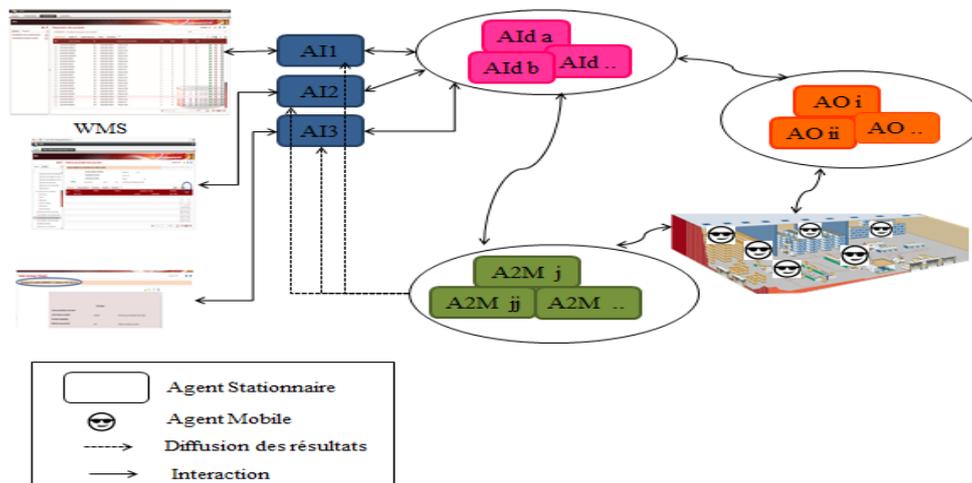


Figure III-1. Architecture du système

## III.2.2 Comportement détaillé des agents

Dans ce qui suit, nous décrivons les différents comportements des agents du système à travers des diagrammes d’activités représentant l’aspect dynamique.

### III.2.2.1 Agent Interface AI

L’agent AI interagit avec l’utilisateur du WMS. Il lui permet d’exprimer et d’émettre sa requête. Dès qu’un utilisateur accède au système, un agent AI est créé en temps réel pour l’aider et l’assister à formuler sa requête (mono-client ou multi-client). Le même agent peut assurer cette tâche plusieurs fois de suite sur le même support tant que sa période d’inactivité n’est pas encore écoulée. Sinon, le système le détruit et un autre agent AI est créé au besoin et ainsi de suite.

L’agent AI envoie la commande à l’agent AId disponible, associé à une société disponible préalablement créé et tenue en état d’attente. S’il n’existe encore pas d’agent AId disponible dans le système, un nouvel agent AId est automatiquement crée, au sein d’une nouvelle société d’agents.

L’agent AI reçoit une réponse de l’agent A2M lui confirmant le bon déroulement de la préparation ou lui signalant une anomalie de la commande (Figure III.2).

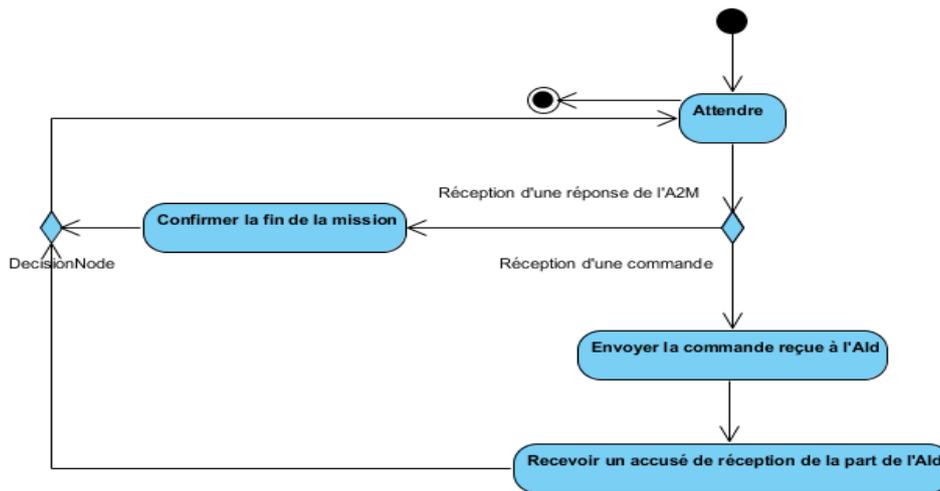


Figure III-2. Comportement de l'agent AI

### III.2.2.2 Agent Identificateur AId

Un agent Identificateur peut recevoir un ensemble de requêtes simultanées et les décompose en un ensemble de tâches indépendantes. L'agent AId attend la réception de la commande de l'agent AI. Une fois la réception faite, l'agent AId affecte les supports (chariots ou palettes) aux commandes. Il reçoit de la part de l'agent A2M la commande qui n'a pas été effectuée à cause des manquants afin de la relancer. Le comportement de l'agent AId est illustré par le diagramme d'activité de la figure III.3).

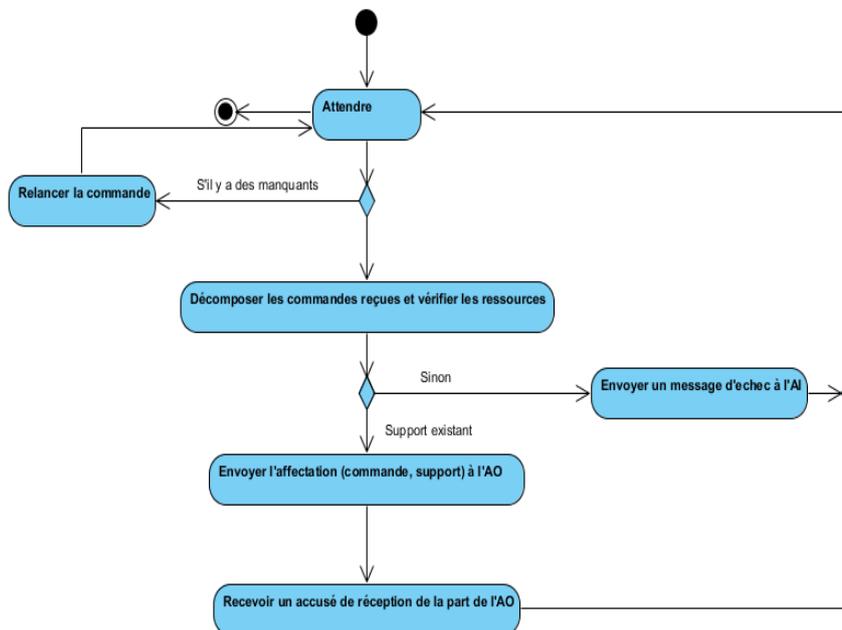


Figure III-3. Comportement de l'agent AId

### III.2.2.3 Agent Optimisateur AO

Connaissant les emplacements des articles dans l'entrepôt, l'agent AO affecte une mission à chaque agent AM selon la localisation de ce dernier. Une fois l'agent AId, issu de la même

société, lui procure un certain nombre de données, l'agent AO déclenche le processus d'optimisation. Il compose donc des missions à affecter aux agents AM. Les missions peuvent contenir une commande ou plus. L'agent AO a pour objectif d'optimiser les missions des opérateurs en utilisant les algorithmes d'optimisation proposés. Il envoie donc aux agents AM l'ordre de préparation avec des parcours optimisés des préparateurs. Le comportement d'un agent AO est illustré par le diagramme d'activité de la figure III.4.

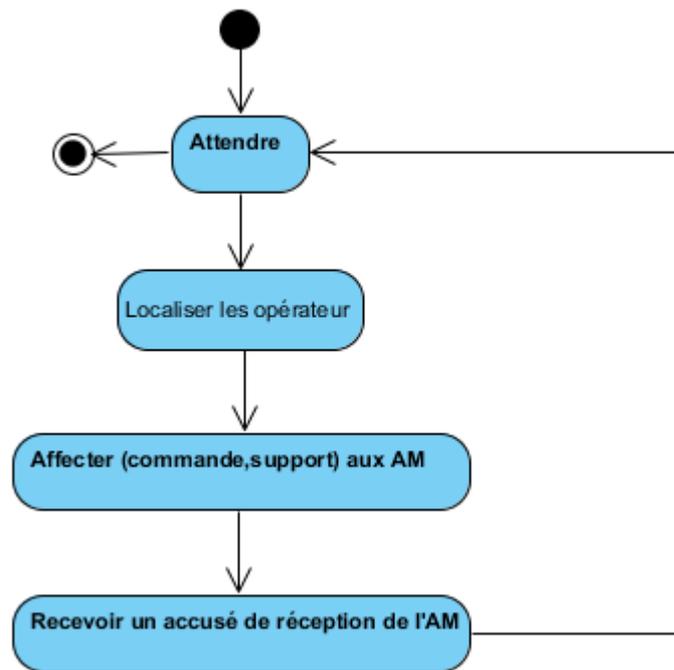


Figure III-4. Comportement de l'agent AO

#### III.2.2.4 Agent Mobile AM

Les Agents AM sont des agents physiques. Ils disposent de la capacité de migrer d'un emplacement à un autre dans un entrepôt pour s'y exécuter et donc accomplir un certain nombre de tâches en utilisant les données reçues. Ils sont donc capables de se déplacer intelligemment d'une allée à une autre dans un entrepôt dans le but de préparer la commande. L'AM représente ainsi le préparateur de commandes doté de lunettes à RA. En effet, l'interaction avec le SAD se fait avec les lunettes connectées qui localisent en temps réel les opérateurs et reçoivent de l'agent AO des commandes optimisées en fonction de leur position. S'il y a des manquants au moment du picking ou du putting, l'agent AM le signale à l'A2M afin de remédier à ce problème en lui envoyant le statut de la commande (Figure III.5).

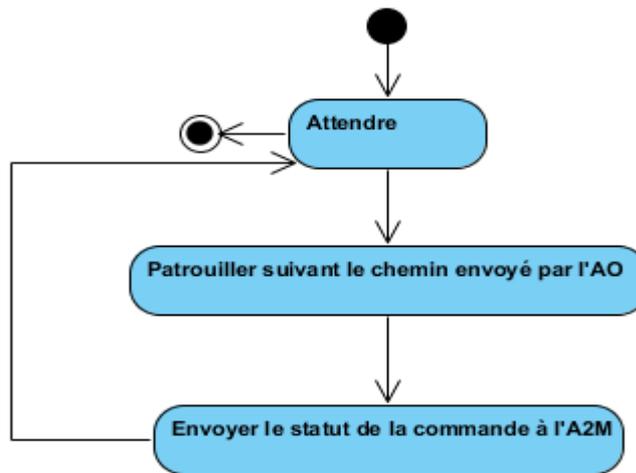


Figure III-5. Comportement de l'agent AM

### III.2.2.5 Agent Analyse des manquants A2M

L'agent A2M assure le contrôle et la validation de la préparation de commandes. Il reçoit le statut de la commande de la part de l'agent AM. Si le statut est soldé, une réponse favorable est envoyée à l'agent AI. Sinon, il signale le problème et la commande sera de nouveau relancée en l'envoyant à l'agent AId. L'agent A2M règle ainsi les problèmes des manquants que peuvent rencontrer les agents AM lors de la préparation de leurs commandes (Figure III.6).

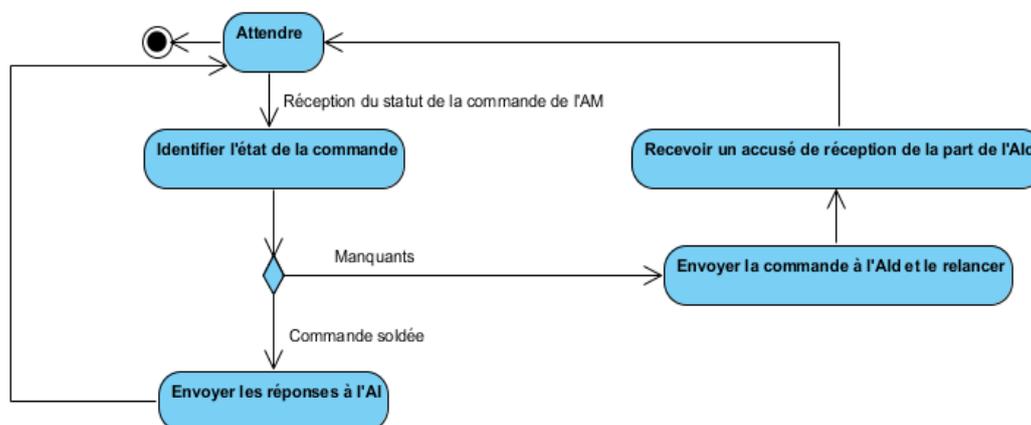


Figure III-6. Comportement de l'agent A2M

## III.2.3 Diagrammes représentant le fonctionnement global détaillé du système

Dans ce paragraphe nous présentons à travers différents diagrammes les fonctionnements dynamiques et statiques du système.

### III.2.3.1 Diagramme de séquence (Aspect dynamique)

Le diagramme de séquence suit une chronologie de haut en bas. Il montre le flux de contrôle d'un participant à un autre. Le comportement d'une société, en interaction avec les agents AI, composée d'un agent AId, un agent AO, un agent A2M et un certain nombre d'agents AM est illustré par le diagramme de séquence de la figure III.7.

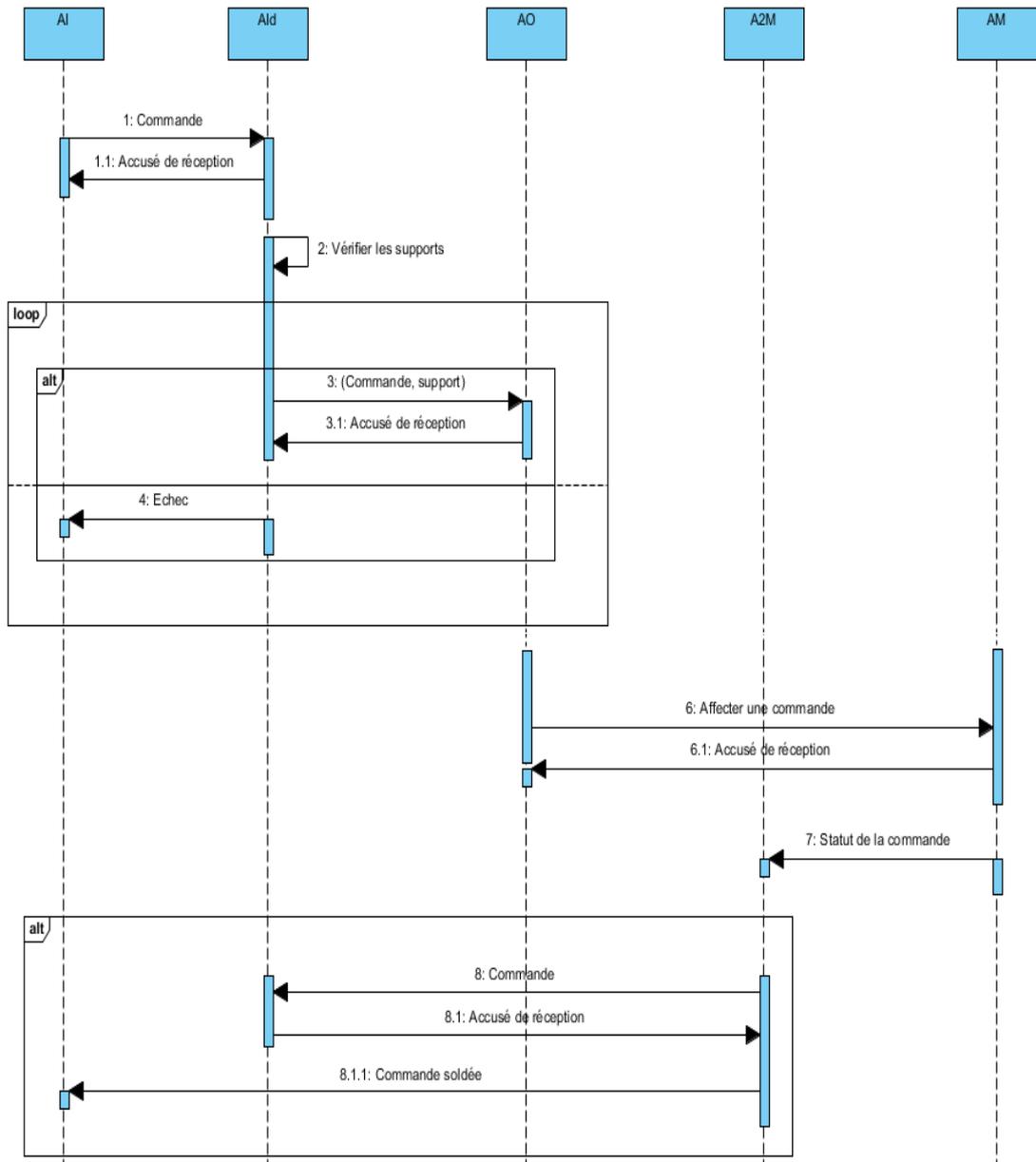


Figure III-7. Diagramme de séquence

L'agent AI envoie des commandes à l'agent AId afin de les traiter. En effet, ce dernier se charge de l'affectation des supports aux commandes. Il envoie par la suite les commandes affectées chacune à un support à l'agent AO qui procède à l'étape d'optimisation. L'AO reçoit ainsi des commandes « en vrac » non optimisées venant à la base du WMS. Il optimise ensuite les parcours des opérateurs pour effectuer les opérations de picking et de putting. Il

compose des missions contenant plusieurs commandes en se basant sur le même principe et prenant en compte la localisation des opérateurs en temps réel. Une fois les agents AM (représentant les opérateurs) créés, ils suivent les parcours optimisés envoyés par l'agent AO et pilotés par les lunettes à RA. Ces lunettes affichent pour les opérateurs les données de la commande et les guident jusqu'aux bons colis grâce à des symboles comme des flèches de direction. Une fois la mission terminée, l'agent AM envoie le statut de la commande à l'agent A2M afin qu'il la relance en cas de manquants en informant l'agent AId.

### **III.2.3.2 Diagramme d'activité à couloir (comportements interconnectés des agents)**

Ce diagramme regroupe les activités interdépendantes des différents agents de notre système lorsque ces derniers ont des affinités sémantiques. Dans chaque couloir, nous identifions les activités propres à un agent du système. Les transitions peuvent franchir les couloirs pour lier les différents comportements de ces agents. Le but de ce diagramme d'activité à couloir est donc de montrer les interactions et la communication entre les différents agents (Figure III.8).

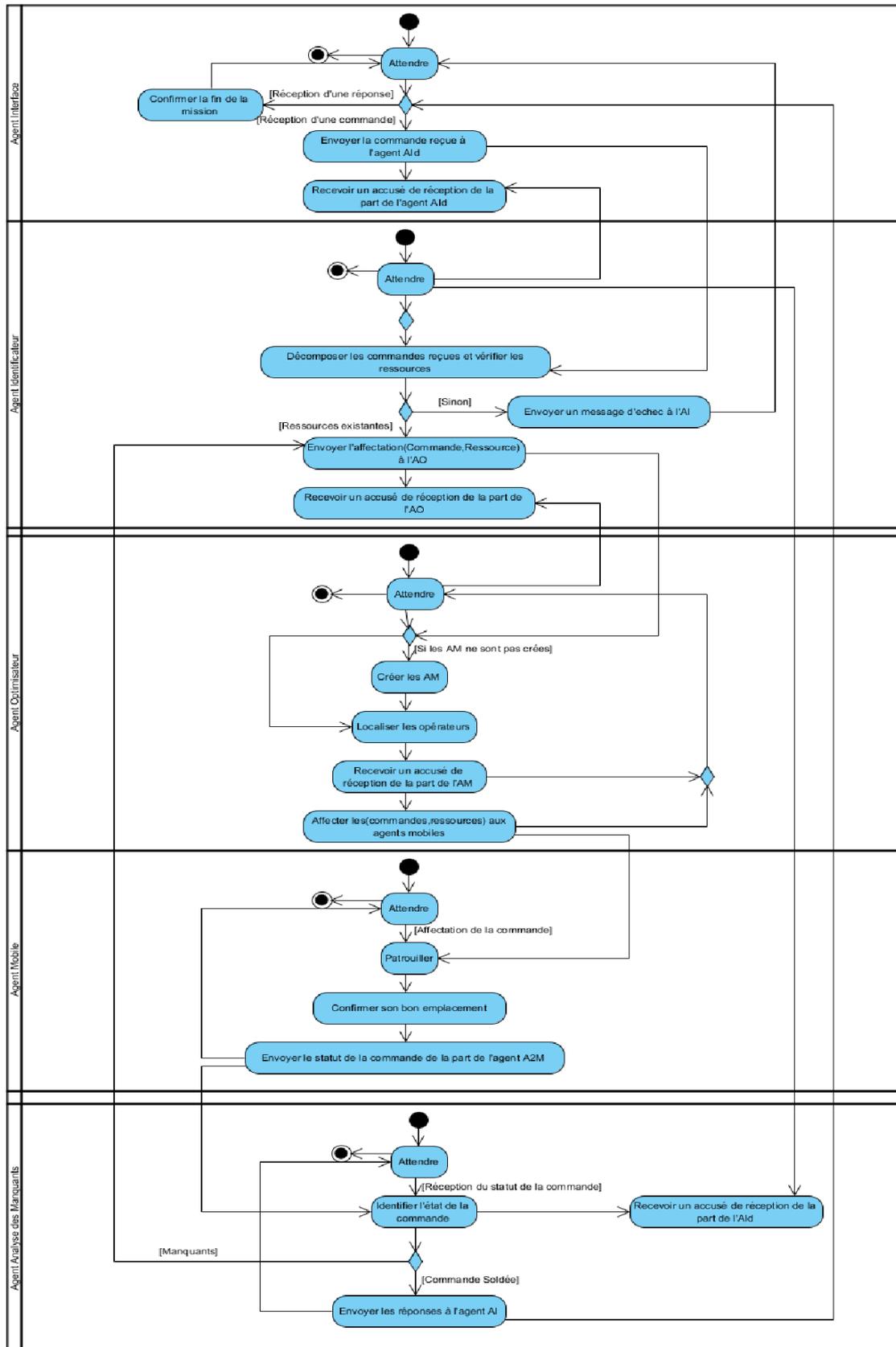


Figure III-8. Diagramme d'activités à couloir

### III.2.3.3 Diagramme de classe (aspect statique)

Un diagramme de classe fait abstraction aux aspects dynamiques et temporels. Il décrit les classes et leurs relations (associations, généralisation/spécialisation, etc). Il est la collection d'éléments de modélisation statique (classes, paquetages...) qui montre la structure d'un modèle (Figure III.9).

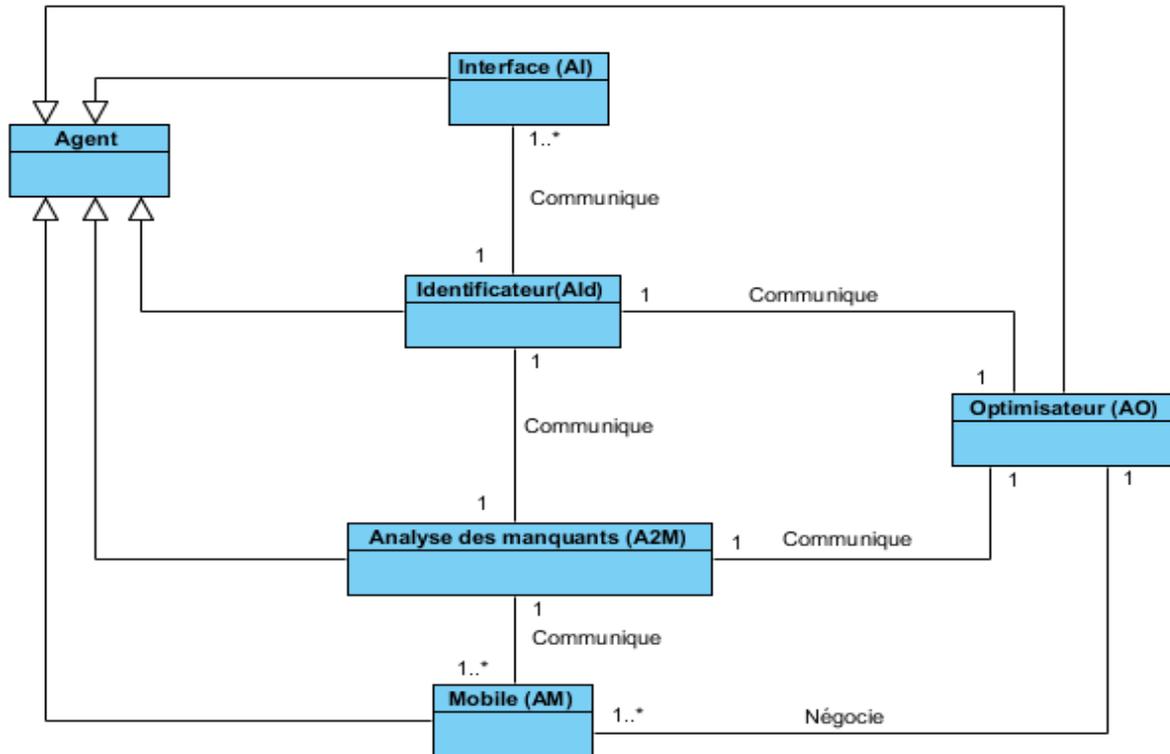


Figure III-9. Diagramme de classe

Les agents AM reçoivent les données nécessaires pour exécuter la commande. Les itinéraires optimisés sont construits par l'agent AO suivant une approche d'optimisation que nous présentons dans le paragraphe qui suit.

## III.3 Approches et algorithmes d'optimisation proposés

L'agent AO permet d'élaborer les parcours de préparation des commandes au profit des agents AM grâce à l'intégration d'algorithmes d'optimisation dans son comportement. Ce dernier est illustré par le diagramme d'activité de la figure III.5.

Le problème d'affectation des missions aux opérateurs consiste à attribuer une série de commandes à un ensemble d'opérateurs avec la prise en compte des contraintes temporelles, de disponibilité, de localisation, etc. Une solution est réalisable si toutes les contraintes sont respectées. Le problème que nous résolvons ici est comparable au problème bien connu du Voyageur de commerce (PVC) mais avec plusieurs opérateurs (voyageurs) et plusieurs

missions par opérateur. Nous avons ainsi identifié un nouveau problème que nous baptisons : PVC Multiple et Dynamique (PVCMD).

Les problèmes de type PVC et par extension PVCMD appartiennent à la classe des problèmes NP-complets. Pour les petites instances, ces problèmes peuvent être résolus avec des méthodes exactes. Cependant, pour les problèmes de grande taille (ex. nombre important d'opérateurs et de commandes), l'espace de recherche est hautement combinatoire et le temps de calcul devient donc très long. D'où le recours à des heuristiques et métaheuristiques qui permettent de trouver des solutions approchées de qualité dans un temps raisonnable.

### III.3.1 Notations

Pour une journée J dans l'entrepôt, nous posons :

- $[B, E]$  : Fenêtre temporelle de la journée où B est le début de la journée et E est la fin de la journée.
- $E = \{O_o \text{ tel que } o \in [1, N]\}$  avec o l'indice de l'opérateur} est l'ensemble des opérateurs avec N le nombre total des opérateurs.
- $F = \{C_{c,a} \text{ tel que } c \in [1, M], a \in [1, R]\}$  avec c l'indice d'une commande et a l'indice d'un article} est l'ensemble des commandes qui sont à leur tour composées de plusieurs articles avec M le nombre total de commandes et R le nombre total d'articles.
- I est l'ensemble des missions sachant que chaque mission est composée d'au moins une commande.
- T est le temps total estimé pour exécuter une mission (i) appartenant à I
- $[b_c, e_c]$  : Fenêtre temporelle de la durée d'une commande c.
- $d_{o,a,c}$  est la distance euclidienne entre un opérateur o et un article a de la commande c
- $d_{o,a,c}^* = \text{Min}_{o \in [1,N]}(d_{o,a,c})$  est la distance minimale entre tous les opérateurs o et l'article a appartenant à la commande c.
- $t_c$  est la durée estimée d'une commande c
- $a_i = (a_{i1}, \dots, a_{iM})$  est un vecteur de booléens  $a_{ic}$  déclarant quelle commande c ( $c \in [1, M]$ ) est incluse dans la mission i ( $a_{ic} = 1$ ) ou ( $a_{ic} = 0$ )
- $G = \{S_s \text{ tel que } s \in [1, P]\}$ , avec s l'indice du support} est l'ensemble des supports avec P le nombre total des supports avec  $P = \text{Card}(G)$ .
- $Cap_s$  : capacité du support s
- $cap_c$  : capacité requise pour la commande client c
- L'ensemble des commandes d'une mission (i) doit respecter les contraintes de capacité et durée comme suit :
  - la contrainte de capacité:

$$\sum_{c \in F} cap_c a_{ic} \leq Cap_s \quad (C1)$$

- la contrainte de la durée :

$$\sum_{c \in F} t_c a_{ic} \leq T \quad (C2)$$

- $(x_a, y_a)$  représente les coordonnées de l'article a dont l'emplacement est une donnée
- $(x_o, y_o)$  représente les coordonnées de l'opérateur o avec  $(x_o, y_o) = (0, 0)$  est la position initiale de l'opérateur.

### Variables de décision

$s_{op_o}$  : représente le statut de l'opérateur o avec  $s_{op_o} = 1$  si l'opérateur o est disponible et 0 sinon

$x_{c,a}$  = 1 si l'article a appartient à la commande c et 0 sinon

$x_{o,c}$  = 1 si la commande c est affectée à l'opérateur o et 0 sinon

### Fonction Objectif

- Minimiser le parcours de picking des opérateurs

$$\text{Min} \left( \sum_o \left( \sum_c \left( \sum_a d_{o,c,a} x_{c,a} x_{o,c} \right) \right) \right)$$

Le but de nos travaux est de proposer un SAD qui permet de piloter efficacement les opérateurs dans leurs missions en entrepôt. L'idée est de développer une bibliothèque d'algorithmes pour couvrir tous les niveaux de complexité du PVCMD présenté ci-dessus. Nous nous focalisons dans cette thèse sur une méthode évolutionnaire permettant de proposer un ensemble de solutions optimisées et prêtes à être exploitées à tout moment.

### III.3.2 L'algorithme de picking proposé

La figure III.10 représente le découpage de l'entrepôt en zones de localisation des opérateurs en mission. L'algorithme de picking ci-dessous représente le cœur logiciel de notre SAD. Dans ce cadre, l'AO adopte l'algorithme d'optimisation (**Parcours\_optimal\_picking**) en fonction de la situation en cours (méthode exacte, métaheuristique, ect.).

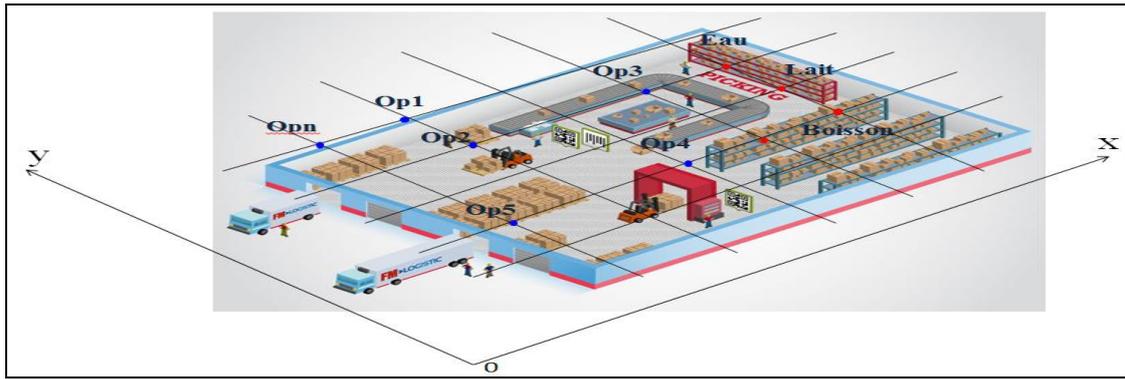


Figure III-10. Disposition des opérateurs et des articles dans un entrepôt

L'algorithme de picking suivant est déclenché dès qu'il y a une mission (i) en attente:

---

### Algorithme2. Algorithme de Picking

---

#### Début

Pour chaque mission i en attente

Identifier tous les opérateurs disponibles ODisp ( $s_{op_o} = 0$ )

$o^* \leftarrow$  indice du 1er opérateur disponible

Pour tout opérateur  $o \in ODisp - \{o^*\}$

Localiser l'opérateur o

Si o n'a pas de support de travail

Alors affectation d'un support s disponible à l'opérateur o avec une capacité  $Cap_s$

Fin Si

Si ( $\sum_{c \in C} cap_c a_{ic} \leq Cap_s$  et  $\sum_{c \in C} t_c a_{ic} \leq T$ ) &&  
(o est mieux positionné que  $o^*$  pour la mission i)

$o^* \leftarrow o$

Fin Si

Fin Pour

Affecter la mission i à l'opérateur  $o^*$

$s_{op_{o^*}} \leftarrow 1$

Fin Pour

Parcours\_optimal\_picking

**Fin**

---

Dans le paragraphe qui suit, nous développons l'algorithme **Parcours\_optimal\_picking** qui s'appuie sur une méta-heuristique se basant sur une approche évolutionnaire.

### III.4 Méthode évolutionnaire proposée

La méthode proposée est basée sur la transformation itérative d'une population de chromosomes représentant l'ensemble des solutions possibles au problème donné [105].

L'évolution consiste en la création de générations successives de chromosomes, en utilisant des opérateurs génétiques (croisement et mutation) suivant un processus de sélection. Le processus d'évolution devrait permettre de générer de bonnes solutions au problème traité.

Les algorithmes évolutionnaires de base peuvent souffrir d'un manque d'intensification. Rappelons que l'intensification augmente la qualité de la solution ou la probabilité d'aller vers une bonne solution, et que la diversification consiste à éviter de stagner dans une région (Optima locaux). Pour remédier donc à ce problème, une idée consiste à ajouter un mécanisme de réparation (opérateurs génétiques) après les étapes d'initialisation et de reproduction. D'où l'intérêt de la recherche locale dont l'ingrédient de base est un bon équilibre entre l'intensification et la diversification. Nous avons donc choisi d'adopter une approche hybride entre les algorithmes de recherche locale et les algorithmes génétiques. Cette approche hybride s'appelle les algorithmes **mémétiques**.

En effet, des recherches [106] ont montré que la performance peut être améliorée si les solutions évoluent au cours de leur construction. Dans notre problème, nous utilisons un codage direct dans lequel la solution est directement représentée par le chromosome et où aucune procédure de décodage n'est nécessaire ; à la différence d'un codage indirect qui signifie que la procédure de décodage est nécessaire pour récupérer la solution à partir du chromosome.

### III.4.1 L'algorithme mémétique

Nous présentons dans ce qui suit les étapes de base de notre algorithme mémétique (Figure III.11)

---

#### Algorithme1. Algorithme mémétique :

---

INPUT :

P : l'ensemble des chromosomes de la population en cours

V : taux de diversification

OUTPUT :

P\* : l'ensemble des meilleures solutions générées

---

1. Générer une population initiale P de n chromosomes d'une manière aléatoire
  2. Pour chaque chromosome  $x \in P$  faire  $x \leftarrow$  Recherche Locale (x)
  3. Tant que (la condition d'arrêt n'est pas satisfaite) faire
  4.  $P \leftarrow$  Sélection aléatoire de deux parents  $x_a$  et  $x_b \in P$
  5.  $x_{c1}, x_{c2} \leftarrow$  Croisement ( $x_a, x_b$ )
  6.  $x_{m1} \leftarrow$  Mutation ( $x_{c1}$ )
  7.  $x_{m2} \leftarrow$  Recherche Locale ( $x_{c2}$ )
  8. Ajouter  $x_m$  à P\* si  $\text{Fitness}(x_m) > \text{Fitness}(x), \forall x \in P$  et  $m \in \{1,2\}$
  9. Si P converge alors
  10. Choix aléatoire de v dans  $[1 \dots V]$
  11. Diversifier (P, v)
-

- 12. Fin Si
- 13. Fin Tantque
- 14. Fin

Méthode Diversifier(P,v)  
 Pour i de 1 à v faire  
 Choix aléatoire de x dans P  
 Mutation(x)  
 Recherche Locale(x)  
 Fin Pour  
 Fin

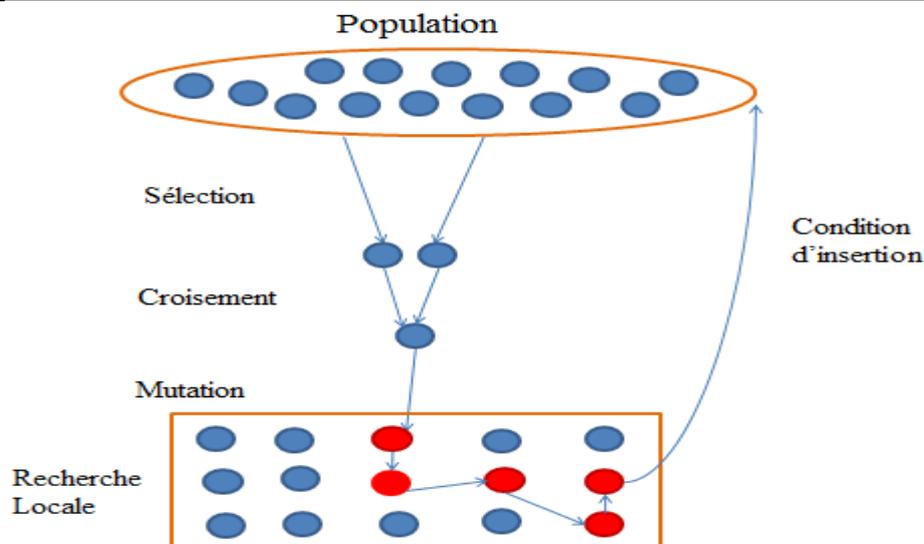


Figure III-11. Schéma d'un algorithme mémétique

L'affectation est codée dans un chromosome représenté par une matrice (M, N). La matrice représente l'affectation d'une commande c à un opérateur o pour une mission de picking (Tableau III.1). Les lignes de cette matrice représentent les commandes. Les colonnes représentent les opérateurs. Chaque élément de la matrice indique l'affectation d'une commande c à un opérateur o.

$$Ch_{o,p} = \begin{cases} * & \text{commande c peut être affectée à l'opérateur o} \\ \mathbf{X} & \text{commande c ne peut pas être affectée à l'opérateur o} \\ r & \text{commande affectée à l'opérateur avec un rang r} \end{cases}$$

Tableau III-1 : Exemple de chromosome

CH	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
C <sub>1</sub>	X	X	2
C <sub>2</sub>	*	1	X
C <sub>3</sub>	X	*	3
C <sub>4</sub>	1	X	*
C <sub>5</sub>	X	3	*
C <sub>6</sub>	*	2	X
C <sub>7</sub>	2	*	X
C <sub>8</sub>	3	X	X
C <sub>9</sub>	*	X	1

Pour que le codage soit cohérent :

- Une commande ne peut être affectée qu'à un seul opérateur, c'est-à-dire qu'on ne peut avoir qu'une seule affectation par ligne, ce qui signifie qu'on ne peut avoir qu'un seul rang par ligne.
- Sur les colonnes, l'ordre des rangs doit être cohérent avec le nombre de commandes affectées à chaque opérateur. Le nombre de commandes est une donnée qu'on peut déduire à partir de la capacité requise des supports et la durée estimée de chaque commande.

Pour que la solution soit viable, il faut que :

- La somme des capacités requises pour chaque commande soit inférieure ou égale à la capacité de la palette (Contrainte C1) ;
- La somme des durées des commandes pour une mission soit inférieure ou égale à la durée d'une mission (une heure) (Contrainte C2) ;

### III.4.2 Fonction Fitness d'évaluation

À chaque itération, un chromosome Ch est évalué par la fonction Fitness. La fonction calcule la distance parcourue par tous les opérateurs pour la préparation des commandes lors d'une journée de travail. La notion de distance peut-être remplacée par d'autres notions comme le temps ou le coût. La figure III.10 représente une disposition possible des articles dans l'entrepôt. L'agent AO envoie les parcours de picking optimisés aux agents AM. Chaque chemin est composé d'une mission de préparation de commande. La mission est composée de plusieurs commandes. L'approche et les algorithmes d'optimisation proposés ont pour objectif de tracer ce chemin afin qu'il soit le plus optimal possible. Pour préparer une seule commande, l'agent AM passe devant les emplacements des articles dans l'ordre de prélèvement envoyé par l'agent AO. À la fin de cette commande, l'agent AO repère

l'opérateur pour lui affecter une nouvelle commande à rajouter à sa mission en prenant en compte sa localisation et les contraintes imposées; c'est-à-dire tant que la capacité de la palette le permet et le temps restant de la durée totale d'une commande est inférieur ou égal à la durée estimée de la commande à affecter. En début et à la fin de chaque mission, les opérateurs se retrouvent sur le quai.

### **III.4.3 Les opérateurs génétiques adoptés**

#### **III.3.4.1 Opérateur de croisement**

L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existants dans la population. Il crée des nouvelles solutions en combinant des parties de deux (ou plusieurs) solutions. D'une manière générale, le croisement consiste à appliquer des procédures avec une certaine probabilité (qui s'appelle le taux de croisement [ $P_c \in (0, 1)$ ] sur les individus sélectionnés pour donner naissance à un ou plusieurs (généralement deux) enfants. Ces derniers doivent hériter, par croisement, de certaines caractéristiques des parents. Le taux de croisement représente la proportion de la population de parents qui sera utilisée par un opérateur de croisement. Il est lié à d'autres paramètres comme la taille de la population, le taux de mutation et la procédure de sélection. La mise en œuvre de ce procédé consiste à générer aléatoirement un masque c'est à dire une chaîne binaire de même longueur que les commandes.

Ce masque est destiné à savoir de quel parent le premier fils devra hériter du gène s'y trouvant :

- Si c'est 0 E1 hérite de P2
- Si c'est 1 E1 hérite de P1

Pour E2 c'est la procédure inverse.

P1	$o_1$	$o_2$	$o_3$
$c_1$	X	X	2
$c_2$	*	1	X
$c_3$	X	*	3
$c_4$	1	X	*
$c_5$	X	3	*
$c_6$	*	2	X
$c_7$	2	*	X
$c_8$	3	X	X
$c_9$	*	X	1

P2	$o_1$	$o_2$	$o_3$
$c_1$	X	1	*
$c_2$	X	*	2
$c_3$	1	X	*
$c_4$	*	X	3
$c_5$	3	*	X
$c_6$	X	2	X
$c_7$	*	3	X
$c_8$	2	X	*
$c_9$	*	X	1

M
0
0
1
0
1
1
0
1
1

E1	$o_1$	$o_2$	$o_3$
$c_1$	X	1	*
$c_2$	X	*	2
$c_3$	X	*	3
$c_4$	*	X	3
$c_5$	X	3	*
$c_6$	*	2	X
$c_7$	*	3	X
$c_8$	3	X	X
$c_9$	*	X	1

E2	$o_1$	$o_2$	$o_3$
$c_1$	X	X	2
$c_2$	*	1	X
$c_3$	1	X	*
$c_4$	1	X	*
$c_5$	3	*	X
$c_6$	X	2	X
$c_7$	2	*	X
$c_8$	2	X	*
$c_9$	*	X	1

Nous proposons un opérateur de croisement qui effectue le croisement de deux chromosomes parents pour donner naissance à deux chromosomes enfants (Algorithme Croisement).

---

**Algorithme9. Croisement**

---

1. Sélectionner aléatoirement 2 chromosomes parents : Parent1, Parent 2 (P1 et P2)
  2. Initialiser deux chromosomes enfants Enfant1, Enfant2 (E1 et E2)
  3. Générer un masque aléatoire M de longueur n
  4. Procéder aux affectations de gènes parents aux gènes enfants.  
 Pour k=1 à n faire  
     Si  $M[k]=0$  (E1 prend les gènes de P2) et (E2 prend les gènes de P1)  
     Sinon (E1 prend les gènes de P1) et (E2 prend les gènes de P2)
- 

**III.3.4.2 Opérateur de correction**

Suite au croisement, des erreurs peuvent survenir et nous pouvons perdre la cohérence des solutions. D'où la nécessité d'un opérateur de correction qui va transformer une solution non viable en une solution viable (Figure III.12).

E2	$o_1$	$o_2$	$o_3$
$c_1$	X	X	2
$c_2$	*	1	X
$c_3$	1	X	*
$c_4$	1	X	*
$c_5$	3	*	X
$c_6$	X	2	X
$c_7$	2	*	X
$c_8$	2	X	*
$c_9$	*	X	1

Figure III-12 : Chromosome non viable

Sur cet exemple, il y a des erreurs sur les rangs pour l'opérateur 1. Nous proposons donc un opérateur de correction décrit par l'algorithme suivant.

---

**Algorithme10. Correction**

---

1. Vérification du chromosome (CH)

Vérifier si le chromosome nécessite une correction

- Si oui (Sélection des opérateurs qui présentent un problème) → Correction
- Sinon Vérification pour la solution suivante

2. Correction (opérateur  $o$ )

- Calculer  $N_o$  le nombre de commandes par opérateurs ( $N_o = 1..o$ )
- Pour  $k=1$  à  $N_o$  faire

Chercher les commandes  $c$

- Quand  $k$  existe plus qu'une fois → Marquer les CH  $[k,o]$  de trop
- Quand CH  $[k,o] > N_o$  → Marquer CH  $[c,o]$

Fin

- Pour  $k=1$  à  $N_o$  faire

Chercher sur les commandes  $c$

- Si  $k$  n'existe pas → Chercher CH  $[c,o]$  marquée et lui affecter  $k$

Fin

Fin correction

---

L'opérateur de correction appliqué à  $E_2$  donne le résultat suivant (Figure III.13):

E2	$o_1$	$o_2$	$o_3$
$c_1$	X	X	2
$c_2$	*	1	X
$c_3$	1	X	*
$c_4$	4	X	*
$c_5$	3	*	X
$c_6$	X	2	X
$c_7$	2	*	X
$c_8$	5	X	*
$c_9$	*	X	1

Figure III-13 : Chromosome enfant viable après correction

### III.3.4.3 Opérateur de mutation

La mutation représente un opérateur génétique important après le croisement. L'opérateur de mutation a pour rôle de modifier aléatoirement, avec une certaine probabilité, la valeur d'un composant de l'individu. Il introduit une certaine variation dans les gènes des individus. Un opérateur de mutation est également appliqué à une certaine proportion de la population (probabilité  $P_m$ , généralement très inférieure à  $P_c$ )

Avant Mutation				Après Mutation			
E2	$o_1$	$o_2$	$o_3$	E2	$o_1$	$o_2$	$o_3$
$c_1$	X	X	2	$c_1$	X	X	2
$c_2$	*	1	X	$c_2$	*	2	X
$c_3$	1	X	*	$c_3$	1	X	*
$c_4$	4	X	*	$c_4$	4	X	*
$c_5$	3	*	X	$c_5$	3	*	X
$c_6$	X	2	X	$c_6$	X	1	X
$c_7$	2	*	X	$c_7$	2	*	X
$c_8$	5	X	*	$c_8$	5	X	*
$c_9$	*	X	1	$c_9$	*	X	1

Figure III-14 : Exemple de mutation

### III.3.4.4 Opérateur de recherche Locale

Une fois l'enfant est obtenu après la mutation, l'étape de la recherche locale est appliquée avec une probabilité  $P_r$ . Nous utilisons le Swap comme opérateur de recherche locale.

La recherche locale consiste à explorer l'espace des combinaisons de proche en proche, en partant d'une combinaison initiale et en sélectionnant à chaque itération une combinaison voisine de la combinaison courante, obtenue en lui appliquant une transformation élémentaire [106] (Figure III.15).

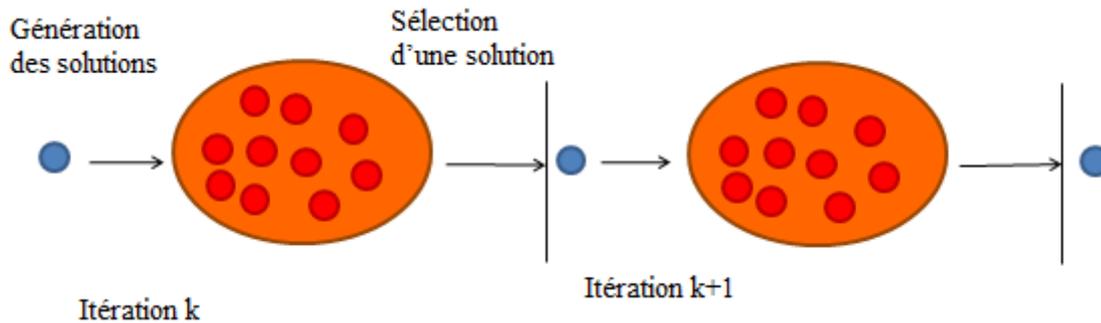


Figure III-15. Principe de la recherche locale

La recherche locale se caractérise par trois éléments : une fonction d'évaluation, une fonction de voisinage et une stratégie de mouvement.

Soit  $E$  une espace de recherche, une fonction de voisinage est une fonction :

$$V : E \rightarrow V(S)$$

Qui associe un ensemble de voisins à chaque élément  $s$  de l'espace de recherche  $E$ .  $V(s)$  est le voisinage de  $s$ . Pour le choix du voisin, une évaluation doit être effectuée.

Soit  $f : E \rightarrow \mathbb{R}$  la fonction d'évaluation ou fonction fitness qui définit la qualité de la solution et guide la recherche dans l'espace de recherche.

---

#### Algorithme11. Algorithme de recherche locale

---

$s \leftarrow$  solution initiale

Répéter

$V(E) \leftarrow$  générer des solutions voisines

$s' \leftarrow$  choisir une solution dans  $V(s)$  tel que  $f(s') < f(s)$

$s \leftarrow s'$  //remplacer  $s$

Jusqu'à Condition d'arrêt

---

#### Descente par recherche locale

Cette méthode consiste à se déplacer dans l'espace de recherche en choisissant à chaque fois, parmi le voisinage de la solution, la meilleure solution. Les étapes de cette méthode appelée aussi, Hill Climbing (HC), sont les suivantes :

1) Générer le voisinage  $V(s)$  de  $s$

2) Trouver  $m \in V(s)$  tel que

$$f(s') = \min_{s \in V(s)} f(s)$$

3) Si  $f(s') < f(s)$  alors  $s := s'$  et retour à l'étape 1 sinon Fin

La condition d'arrêt du HC est le nombre maximal d'itérations sans amélioration. L'opérateur de permutation que nous avons choisi est appliqué pour permuter les commandes de même rang entre les opérateurs. Notre algorithme est d'une complexité en  $O(n^2)$ .

---

**Algorithme12. Algorithme de permutation**

---

Sauvegarder (s)

$s' = s$

Sélectionner aléatoirement deux opérateurs  $o_1$  et  $o_2$

Permuter les commandes entre les deux opérateurs

Si  $s' > s$

$s' = s$

Si  $s'$  n'est pas améliorée

Restituer la solution source

Fin

---

### III.4.4 Convergence des algorithmes évolutionnaires

L'application des algorithmes évolutionnaires ne nécessite pas une connaissance de la particularité du problème étudié, d'où la modularité de ces algorithmes. Cependant, le choix des paramètres tels que le nombre maximal de générations, l'effectif de la population, la probabilité de croisement  $p_c$  et la probabilité de mutation  $p_m$  est important.

L'effectif de la population et le nombre maximal de générations dépendent de la complexité du problème. Il est clair que choisir une population de faible effectif conduira à l'obtention d'un minimum local et donc à une convergence prématurée. Par contre, une grande population engendrera un temps de calcul excessif. Il s'en déduit que le bon choix se fait par la détermination d'un bon compromis. De même, le nombre maximal des générations doit représenter un compromis de la qualité des solutions et du temps de calcul.

Dans la littérature, une règle générale a été proposée pour la détermination des deux probabilités  $p_c$  et  $p_m$  en attribuant une petite probabilité de l'opérateur de mutation (exemple  $p_m = 0.05$  et  $p_c = 0.95$ ). En effet, l'étude de l'influence de ces taux montre qu'avec une probabilité très élevée, la convergence est perturbée en induisant une oscillation de la valeur moyenne du critère optimisé [108]. En revanche, un faible taux de mutation permet d'assurer une bonne exploration de l'espace de recherche sans d'autant perturber la convergence.

Le comportement de l'agent AO permet d'élaborer les parcours de picking et putting des agents AM grâce à la méthode évolutionnaire proposée. Munis de lunettes à RA, les agents AM parcourent l'entrepôt afin d'accomplir leur tâche. Le but d'utiliser ces lunettes connectées est la supervision et le pilotage temps réel de parcours des opérateurs pour accomplir leur mission de picking ou putting en exploitant la solution optimisée proposée. Dans ce qui suit, nous présentons l'apport des lunettes à RA en entrepôt et plus particulièrement dans la préparation des commandes.

### **III.4 Apport des lunettes à RA dans l'optimisation de la préparation de commandes**

Les opérateurs, représentés par les agents AM, communiquent avec notre SAD à travers les lunettes à RA. Il se sert donc de cette technologie pour le guider dans sa préparation de commandes. La TIC a toujours été un facteur déterminant dans le domaine de la logistique. Aujourd'hui, les objets connectés jouent un rôle majeur dans le domaine de la logistique de distribution. Comme la RA et les technologies portables continuent à progresser, leur combinaison représente un succès dans l'industrie. La RA représente un nouveau défi dans les entrepôts.

En logistique, les solutions les plus tangibles basées sur la RA sont des systèmes pour optimiser le processus de picking. Après les smartphones, de nombreuses entreprises de l'industrie s'attendent à ce que les lunettes intelligentes soient le nouveau succès de la consommation mondiale. Avec ces dispositifs, la vision réelle de l'utilisateur est intercepté et une vue augmentée est affichée dans son champ de vision.

Les Google Glass sont plus orientées vers le marché de la consommation et moins sur l'environnement industriel de l'entreprise, alors que d'autres sociétés comme Vuzix ont pu offrir une solution plus industrielle utilisant la technologie des lunettes intelligentes. Les systèmes proposés par Knapp, SAP et Ubimax sont en phase de test sur le terrain pour une mise en œuvre commerciale complète. Il s'agit de systèmes mobiles de RA. Actuellement, des chercheurs étudient même les possibilités d'exploiter des lentilles intelligentes qui peuvent afficher de l'imagerie grâce à la RA. Les entreprises telles que Microsoft et Google sont en train de travailler sur leurs propres projets de lentilles intelligentes.

La technique du pick-by-vision ou du put-by-vision offre une reconnaissance d'objet en temps réel, la lecture du code-barres, et une intégration de l'information avec le WMS, sans oublier la possibilité de travailler les mains libres qui est l'un des avantages clés pour les opérateurs lors du processus de la préparation de commandes.

Pour la première fois en France, des lunettes connectées ont été testées dans la logistique. Oscar<sup>16</sup>, leader de la vente de pièces détachées sur Internet, et notre partenaire Generix Group ont conduit cette expérimentation qui vise à apporter des solutions aux difficultés rencontrées par les opérateurs logistiques. Le travail de préparation de commandes est

---

<sup>16</sup> <http://www.oscaro.com/>

effectué habituellement à l'aide d'un terminal que l'opérateur tient dans la main durant tout le processus de préparation. Ce système trouve ses limites quand il s'agit de préparer de grosses commandes, des objets lourds ou volumineux. Pour y remédier, un nouveau mode d'interface permet de relier les systèmes de gestion d'entrepôts (WMS) aux opérateurs en affichant, à travers des lunettes connectées, des informations tout au long de leur parcours.

Que la préparation de commandes soit en mode « pick » ou « put », l'opérateur scanne l'article et inscrit ce processus simultanément dans les WMS, ce qui permet les mises à jour des stocks en temps réel.

Grâce aux informations envoyées par le WMS sur les lunettes à RA, les mains du préparateur sont libérées et ce dernier est guidé dans l'entrepôt en suivant le parcours optimisé proposé par l'AO. Ainsi, grâce à l'optimisation du parcours de picking/putting, le meilleur itinéraire s'affiche dans son champ de vision, ce qui permet de réduire notamment le temps passé dans la préparation de sa commande. Tout ce processus s'améliore donc grâce à une planification efficace du chemin du préparateur de commandes. Les QR Codes sont placés sur les étagères devant chaque article permettent de vérifier si l'opérateur est arrivé au bon endroit, et de le guider pour localiser rapidement le bon article.

Le temps de formation des préparateurs à la maîtrise de la localisation dans l'entrepôt s'en trouve aussi réduit par un affichage instantané sur les lunettes. Ce dernier point est un vrai plus pour ce secteur où, en raison des pics d'activités, le recours aux intérimaires est fréquent. Ça permet aussi de créer des emplois pour des étrangers puisque l'affichage de l'information sur les lunettes connectées brise les barrières linguistiques.

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons proposé une approche d'optimisation pour la gestion de la préparation des commandes dans les entrepôts. L'approche adoptée, qui se base sur l'alliance entre les SMA et l'optimisation, vise à réduire le temps de la préparation de commandes en optimisant le parcours de l'opérateur lors des opérations de picking et de putting.

Ce système permet l'interaction entre des entités logicielles encapsulées, que nous avons appelées « agents ». Par exemple, l'agent AO envoie les itinéraires de picking ou putting, construits grâce à l'approche d'optimisation proposée, aux agents AM qui va parcourir par la suite les différentes allées afin de réaliser sa tâche, tout en ayant les mains libres.

Dans notre système, les palettes représentent des ressources partagées par les opérateurs et leur affectation peut dans certaines situations créer des perturbations et des aléas capables de

dégrader le fonctionnement du système. Nous développons donc dans le chapitre IV un protocole de négociation pour la gestion de l'allocation des ressources.

Dans cette thèse, l'alliance entre l'optimisation et les systèmes multi-agents plus l'intégration des lunettes à RA a pour but d'améliorer la préparation des commandes qui représente une des tâches les plus importantes au sein de l'entrepôt. La notion de productivité est indissociable d'une bonne gestion des ressources humaines. C'est pour cette raison que le confort de l'opérateur est un critère à ne pas négliger. En recevant le circuit de préparation directement sur son champ de vision à travers les lunettes connectées, l'opérateur pourra travailler les mains libres et le risque des erreurs est réduit puisqu'il sera guidé jusqu'au bout de sa mission. L'interface Homme/Technologie ainsi que l'affichage tête haute en entrepôt seront détaillés dans le chapitre suivant.

## **CHAPITRE IV. La RA pour la coordination de la préparation des commandes dans les entrepôts**

## **IV.1 Introduction**

La technologie de la RA représente la prochaine grande vague de changement dans le secteur de la logistique. Le passage des ordinateurs personnels à des appareils mobiles prouvent que la technologie peut modifier profondément la façon dont nous communiquons et interagissons avec le monde [109]. Le recours à la RA dans les entrepôts a pour objectif d'optimiser le processus de la préparation des commandes. Qu'elle soit intégrée sur des lunettes ou tablettes, la RA permet de guider l'opérateur au bon endroit pour lui indiquer les bonnes quantités à prélever/déposer et par conséquent libérer les deux mains et optimiser son parcours en ordonnant les tâches de façon intelligente. Elle permet également une assistance pour le contrôle qualité, la maintenance, la réparation ou la formation.

Generix Group et l'École Centrale de Lille ont conclu un partenariat croisé école-entreprise afin de réaliser un système d'aide aux déplacements pour guider les opérateurs dans les entrepôts. Grâce aux lunettes connectées, les conditions de travail des opérateurs se sont améliorées ainsi que la productivité en entrepôt. Ce nouveau mode innovant d'Interface Homme/Technologie permet de relier le WMS aux opérateurs en affichant des informations tout au long de leur mission de préparation de commandes. En effet, l'agent AO envoie le parcours optimisé pour la préparation de commandes aux agents AM. Ces derniers, représentant les opérateurs munis de lunettes à RA, exécutent la commande en suivant la tournée optimisée proposée par le système.

Nous présentons dans ce chapitre une architecture à 3 couches connectée au WMS et intégrant les différentes approches proposées dans le chapitre III. Cette architecture dynamique et évolutive, permet d'avoir une gestion optimisée des entrepôts en aidant les opérateurs à travailler dans des meilleures conditions.

## **IV.2 Architecture à trois couches**

La complexité des systèmes industriels et économiques en termes d'expansion, d'hétérogénéité et de décentralisation entraîne de plus en plus de contraintes de conception et de fonctionnement. L'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) concerne la modélisation de systèmes dynamiques, décentralisés et complexes. La conception de tels systèmes de résolution de problèmes entraîne la décomposition de la représentation du monde réel en entités autonomes, les agents, qui interagissent dans le but de réaliser une tâche donnée [110] [37] (§ II).

L'intelligence artificielle permet de reproduire le plus fidèlement possible le comportement humain. Elle permet également de donner aux machines des capacités pour résoudre des

tâches difficiles. La façon dont les machines réalisent ces tâches peut différer de celle des humains. En effet, le recours à des modèles mathématiques rend possible la simulation et les prédictions puisqu'il s'agit d'une abstraction qui a pour but de simplifier le système réel.

Dans ce cadre, la proposition de recherche que nous faisons consiste plus précisément en un ensemble d'outils et de démarches permettant l'optimisation de la préparation des commandes dans les entrepôts. Cet ensemble est matérialisé en une architecture à trois couches interconnectées. L'idée directrice de cette architecture est d'identifier une situation logistique de référence en entrepôt par des modèles mathématiques et algorithmiques. En cas de perturbation de l'environnement associé à la situation logistique réelle du terrain (l'entrepôt), l'architecture à 3 couches, baptisée A3C-2SL (Architecture à 3 Couches au Service des Systèmes Logistiques), que nous proposons permet, grâce à l'**optimisation collaborative** entre les agents de la 2<sup>ème</sup> couche, d'atteindre le plus rapidement possible la situation logistique de référence (Figure IV.1).

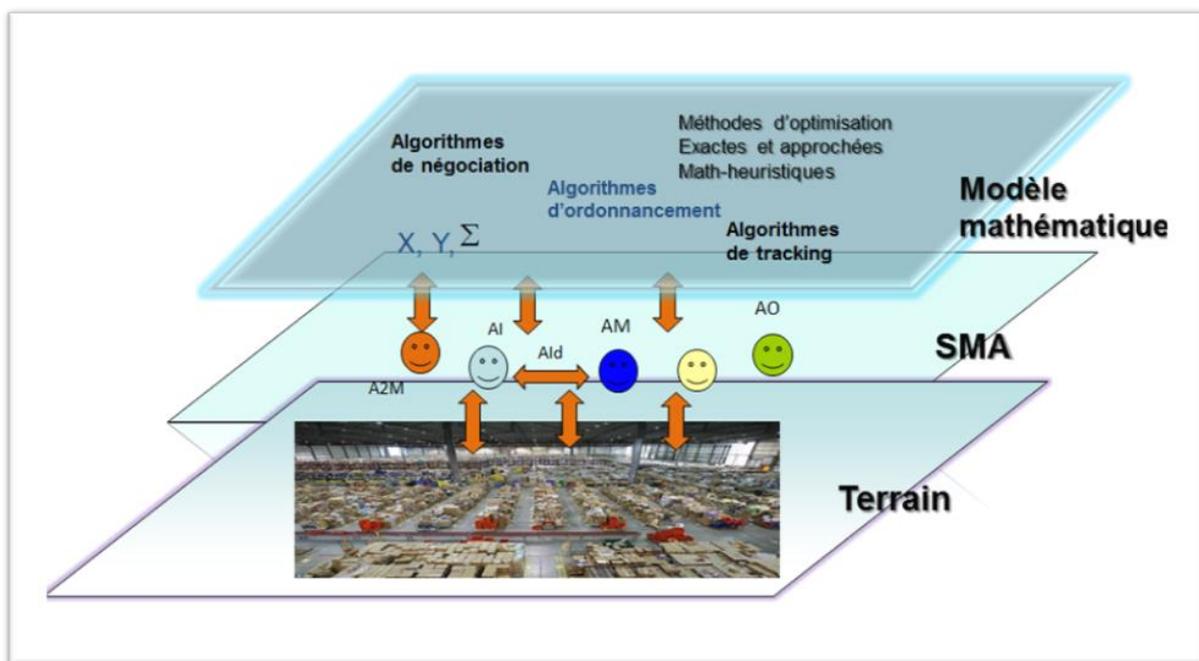


Figure IV-1. Architecture A3C-2SL pour l'optimisation des Systèmes Logistiques

- **Une 1<sup>ère</sup> couche** composée des modèles mathématiques et algorithmiques (méthodes exactes, méthaheuristique, etc.) permettant de caractériser une situation logistique de référence en entrepôt.
- **Une 2<sup>ème</sup> couche** basée sur des agents communicants permettant d'identifier la situation réelle de l'entrepôt, la situation logistique de référence devrait être atteinte grâce à un processus d'optimisation collaborative entre les agents.

- **Une 3<sup>ème</sup>** couche « terrain » représentant la situation logistique réelle. Cette dernière varie selon le domaine. Dans le cadre de cette thèse, le terrain correspond au domaine de la logistique des entrepôts.

Cette architecture, qui est innovante et générique, se base sur des agents communicants. Ces derniers représentent les différents acteurs de la chaîne logistique qui sont en liaison directe avec ce qui se passe sur le terrain. Ces agents scrutent (grâce aux lunettes à RA) en continu les informations de la couche terrain en comparant la situation réelle à la situation logistique de référence. Par exemple, une situation de référence en entrepôt correspond à: 1) équilibrer la charge de travail entre les opérateurs et 2) honorer toutes les commandes envoyées par le WMS. En fonction de ces informations ainsi que des divers modèles mathématiques à disposition (1<sup>ère</sup> couche), ces agents vont devoir adapter leurs rôles et leurs comportements afin de réagir au mieux aux différentes perturbations du terrain. Ces perturbations (ou « conflits ») sont détectées et gérées par les agents du système qui vont devoir collaborer pour atteindre une situation logistique de référence le plus rapidement possible. Lorsqu'il s'agit d'une situation de conflit (agents antagonistes), il faut mettre en place un protocole de négociation pour éviter les situations chaotiques.

Les opérateurs partagent des ressources afin de réaliser différentes tâches. L'affectation de ressources matérielles tels que les chariots élévateurs ou les machines d'emballage aux différentes tâches peut faire l'objet de perturbations, d'où l'intérêt du protocole de négociation proposé (§ IV.3). La négociation correspond à la coordination dans un univers compétitif entre les agents. Il s'agit d'un mécanisme puissant pour gérer les dépendances inter-agents ou le processus par lequel un groupe d'agents arrive à une décision mutuelle acceptable sur un sujet donné.

Nous proposons un système réactif basé sur des modèles d'interactions et des approches de négociation.

Concernant la 3<sup>ème</sup> couche, l'environnement représente le contexte dans lequel évoluent les agents mobiles (les opérateurs). Dans notre architecture multi-agent (§ III), l'agent AO est chargé d'optimiser les déplacements des opérateurs. La nouvelle technologie trouve tout son intérêt à ce stade. En effet, l'agent AM, qui représente le préparateur de commandes en entrepôt, est muni de lunettes à RA afin d'assurer le guidage et le pilotage lors de la préparation des commandes dans les modes « pick » et « put ». L'agent AO transmet le parcours de préparation des commandes optimisé aux agents AM portant les lunettes connectées. L'agent AM sélectionne les produits en suivant l'ordre de prélèvement qui s'affiche sur son champ de vision. L'utilisation des lunettes à RA dans la préparation des

commandes permet de gagner en rapidité, de réduire les erreurs de picking ou de putting puisque l'opérateur sera guidé tout au long de sa mission.

Sur la partie optimisation des déplacements, nous prouvons dans cette thèse le gain en termes de productivité mais aussi de capacité, et pour les opérateurs, une grande souplesse de préparation.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux ressources matérielles et humaines dans l'entrepôt, à savoir les supports de travail et les ressources humaines. En effet, nous présentons dans un premier temps le protocole de négociation proposé pour gérer les différentes situations perturbations.

Ensuite, nous nous intéressons par la suite aux différentes techniques et technologies utilisées pour mettre en œuvre la communication au sein de notre système proposé (protocole de négociation), en assurant le guidage de l'opérateur dans l'entrepôt.

### **IV.3 Protocole de négociation pour la gestion des situations de perturbation dans les entrepôts**

Dans l'architecture multi-agent proposée dans le chapitre III, nous décrivons le processus de préparation de commande à partir de l'envoi de la commande par le WMS jusqu'à la dépose à quai. L'agent AId a pour rôle d'affecter les ressources aux commandes pour la mission de picking ou putting. Il existe différentes ressources dans l'entrepôt selon le type de la tâche de l'opérateur. L'affectation des ressources doit donc être adéquate à la nature de la mission. La préparation de la commande est une étape à part entière parmi tout le processus de traitement de commandes. En effet, les différentes étapes de ce dernier sur lesquelles nous nous focalisons dans cette section sont : le picking, l'emballage et la livraison.

Le processus de traitement des commandes dans les entrepôts est susceptible de rencontrer des imprévus en termes de coûts et de retards qui se produisent lors de l'exécution des plans de livraison en raison de conditions défavorables issues de clients et de véhicules de livraison [111]. Nous expliquons dans ce qui suit le mécanisme de négociation intégré à notre système pour le processus de traitement des commandes en utilisant un système d'allocation dynamiques des ressources.

#### **IV.3.1 Définition Protocole de négociation**

Un protocole de négociation est un ensemble de règles utilisées pour organiser la négociation, la communication, la séquence de la conversation et de la prise de décision entre les agents [112] [113]. Nous rappelons qu'un agent est une entité autonome, proactive et intelligente. Il peut négocier avec d'autres agents et prendre des décisions en utilisant des protocoles et des

stratégies pour faire face aux contraintes du système et avancer pour atteindre ses propres objectifs. L'échange d'informations en temps réel entre les agents et l'environnement permet à l'agent d'être plus rationnel. La nature hybride d'un agent est révélée par ses interactions avec son environnement et ses stratégies qui peuvent inclure la coopération et la concurrence.

La figure IV.2 montre les différentes catégories de négociation qui peuvent être adoptées par un agent dans un système. Les différents protocoles d'interaction des agents peuvent être résumés en la coopération et la concurrence. Dans le cas de la coopération, les agents prennent en compte les priorités des autres agents. Leurs décisions peuvent être altruistes ou consensuelles. Dans le second cas, celui de la concurrence, les décisions sont « égoïstes » et peuvent être basées sur les règles de dispatching tels que le "First Come First Served" (FCFS), le "Shortest processing time" (SPT), ou même sur des formules heuristiques [112].

Dans un SMA, un objet est considéré comme un sujet de négociation entre un groupe d'agents, s'il se retrouve dans une situation de désaccord pour la réalisation d'un objectif commun (ressource rare partagée). Ainsi, la négociation est la forme de contribution la plus appropriée pour la résolution de conflits car elle garantit un pouvoir équitable des agents, ce qui permet la décentralisation du contrôle. Le principe de base pour mettre en place un mécanisme de négociation est de faire, pour les agents négociants, des propositions, des choix, et des concessions d'offres, pour éventuellement atteindre une décision commune acceptable. Dans les SMA, l'objectif est de construire des agents négociants avec l'intervention humaine la plus réduite possible. Les agents engagés dans un processus de négociation doivent prendre certaines initiatives qui peuvent conduire à un accord entre les différentes parties [64].

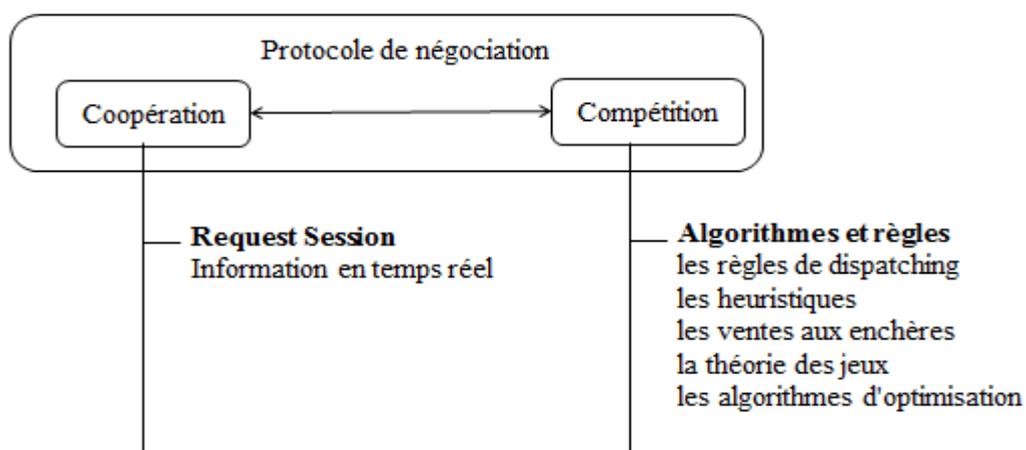


Figure IV-2. Catégories des négociations et des décisions utilisées par les agents

## **IV.3.2 Méthodologies de négociation pour le traitement des commandes**

La méthodologie de négociation que nous avons choisie utilise la nouvelle technologie de l'internet des objets. Elle est inspirée des travaux de Reaidy et al [114] qui travaillent sur l'allocation des ressources au sein des entrepôts.

L'Internet des objets (IdO), également appelé l'Internet industriel, est un nouveau paradigme technologique envisagé comme un réseau mondial de machines et d'appareils capables d'interagir entre eux. Il s'agit de l'extension de l'internet à des objets et lieux du monde physique. L'IdO représente les échanges d'informations et de données provenant de dispositifs présents dans le monde réel vers le réseau Internet. L'IdO est reconnu comme l'un des domaines les plus importants de la technologie de l'avenir et elle est en train de susciter l'attention d'un large éventail d'industries. La vraie valeur de l'IdO pour les entreprises peut être pleinement réalisée que lorsque les appareils connectés sont capables de communiquer les uns avec les autres. Cinq technologies IdO sont largement utilisées pour le déploiement de produits et services basés sur l'IdO [115] : La RFID, le wireless sensor networks (WSN), le middleware, le cloud computing, l'IoT application software.

Pour la cohérence de notre SMA et dans le but de palier aux perturbations possibles, nous proposons dans cette section de représenter tous les agents « ressources » par une méta-entité : ARes (Agent Ressource). Nous identifions donc toutes les entités qui « héritent » de ARes représentant les ressources : Nous identifions ainsi les agents AM qui représentent les ressources humaines (les opérateurs) et les agent AS (Agent Support) représente les palettes de l'entrepôt.

### **IV.3.2.1 Négociation à délai fixe**

La prise de décision de l'agent AS dans un système d'allocation des ressources est basée sur un comportement « égoïste » qui est celui du « First arrived, First served » (premier arrivé, premier servi). À cause des contraintes temporelles dans cet environnement dynamique, le recours aux informations exactes et en temps réel entre les agents à la place des informations attendues ou estimées paraît plus pertinent. D'où l'utilisation du principe des requêtes de session appelé « Request Session ». L'objectif principal de la « Request Session » est de fournir aux agents négociateurs des informations en temps réel sur une période donnée de temps avant que la prise de décision finale ne soit terminée.

Un agent AS émettant une demande à l'agent ADS (Agent Demande de Session) pour une action donnée, tel que le picking, le transport ou l'emballage, peut trouver sa réponse de la part de différents agents ARes et va collaborer et participer avec d'autres agents AS durant une « Request Session » (RS).

Dans un scénario de picking par exemple, l'agent ADS-picking organise l'affectation des tâches de picking aux supports lors de la « Request Session » et de la négociation entre les agents. Les agents dans la RS vont partager des informations en temps réel sur leur statut. La période de temps considérée lors d'une RS pour chaque agent AS correspond à son temps de traitement et est limitée par « l'heure du début de la requête » et « l'heure de la fin de la requête » ou par le temps de décision demandé fixé par les agents AS ou les agents ARes. Un agent AS termine sa tâche de picking et rend une décision sur une prochaine tâche qui doit être l'emballage (si on raisonne par rapport à un processus de préparation de commande complet), en tenant compte du statut des autres agents AS dans la « Request Session ». Ainsi, la prise de décision de AS prend en compte le traitement simultané des agents AS et ceux qui arrivent juste avant et après le AS.

#### **IV.3.2.2 Méthodologie de négociation pour le traitement des commandes dans un entrepôt**

Nous considérons que l'entrepôt est composé de palettes, de chariots élévateurs, de camions et de machines de conditionnement automatique qui sont équipés de lecteurs RFID et de capteurs. Les différentes tâches sont le picking (P), l'emballage (Em) et l'expédition (Ex). Les missions de picking sont exécutées par des chariots élévateurs. Les missions d'emballage sont effectuées par des machines d'emballage automatique. Les missions d'expédition sont faites par des camions. Chaque ressource peut fournir qu'un seul type de tâche.

La négociation est utilisée pour sélectionner la prochaine tâche à attribuer à une ressource basée sur le temps comme paramètre ultime. Les agents représentent les palettes et les ressources du système. Quand une tâche commence, l'agent AS affecté tente de planifier la prochaine tâche en participant à une demande de session (RS). Pour cette raison, l'agent AS demande à l'agent A2M la RS à utiliser dans la prochaine tâche; après qu'une demande de participation est envoyé à l'agent ADS avec des informations sur le temps restant du planning de livraison (TRPL), le temps de traitement restant (TTR) de la tâche en cours, le temps de traitement autorisés (TTA) de la tâche suivante et le coût de la pénalité de retard. Le temps de traitement de la tâche (TTT) pour chaque agent AS pour les différentes zones de l'entrepôt

peut être calculé en utilisant un temps de traitement nominal comme une estimation du temps de traitement pris par le plus lent agent AS.

L'agent AS utilise des algorithmes de base et les protocoles de négociation pour choisir la meilleure réponse de l'agent ARes selon ses critères. Dès que l'agent AS met en place une décision, il alloue un temps de traitement donné à l'agent ARes et fournit ce fait à l'agent ARS pour le supprimer de la session.

### **IV.3.3 Protocole de négociation proposé**

Le protocole de négociation entre agents pour l'allocation dynamique des ressources est basée sur le Protocole Réseau Contractuel (« contract-net-protocol ») [117]. Dans notre contexte, les ressources correspondent à des chariots élévateurs, machines d'emballage et des camions.

Le mécanisme de négociation pour la génération des plannings d'exécution des commandes dans le Protocole Réseau Contractuel est développé comme étant un processus d'appel d'offres dans un système d'entreposage. Les agents peuvent négocier (en coopération et / ou en compétition) avec d'autres agents et prendre des décisions en utilisant des protocoles et des stratégies pour faire face aux contraintes du système. Le protocole que nous proposons est fondé sur le scénario suivant : Les agents ARes adoptent tout d'abord certaines stratégies concurrentielles pour assurer leurs intérêts individuels (camions complets) en utilisant le Protocole Réseau Contractuel. Ils essayent de gagner chaque processus d'appel d'offres en fournissant leurs meilleures offres. Ces mêmes agents ARes adoptent progressivement plus de stratégies de collaboration avec des ressources ayant certains problèmes de traitement des commandes comme des défaillances de camions, des difficultés de chargement des palettes et le temps de planification de la livraison. Les agents ARes participeront ensemble à la même demande de session (RS) pour redistribuer les tâches de palettes entre elles. L'agent ADS va utiliser un algorithme de branch-and-bound pour résoudre les problèmes déclarés d'allocation des ressources au niveau local. La fonction objectif pour minimiser correspond au temps de retard total ou le coût total de l'expédition de l'exécution des commandes. Dans la figure IV.3, les agents ARes coopèrent entre eux en utilisant une « Request Session » communes et acceptent une nouvelle affectation de tâche proposée par l'agent ARS pour résoudre le problème de l'exécution des commandes déclarée.

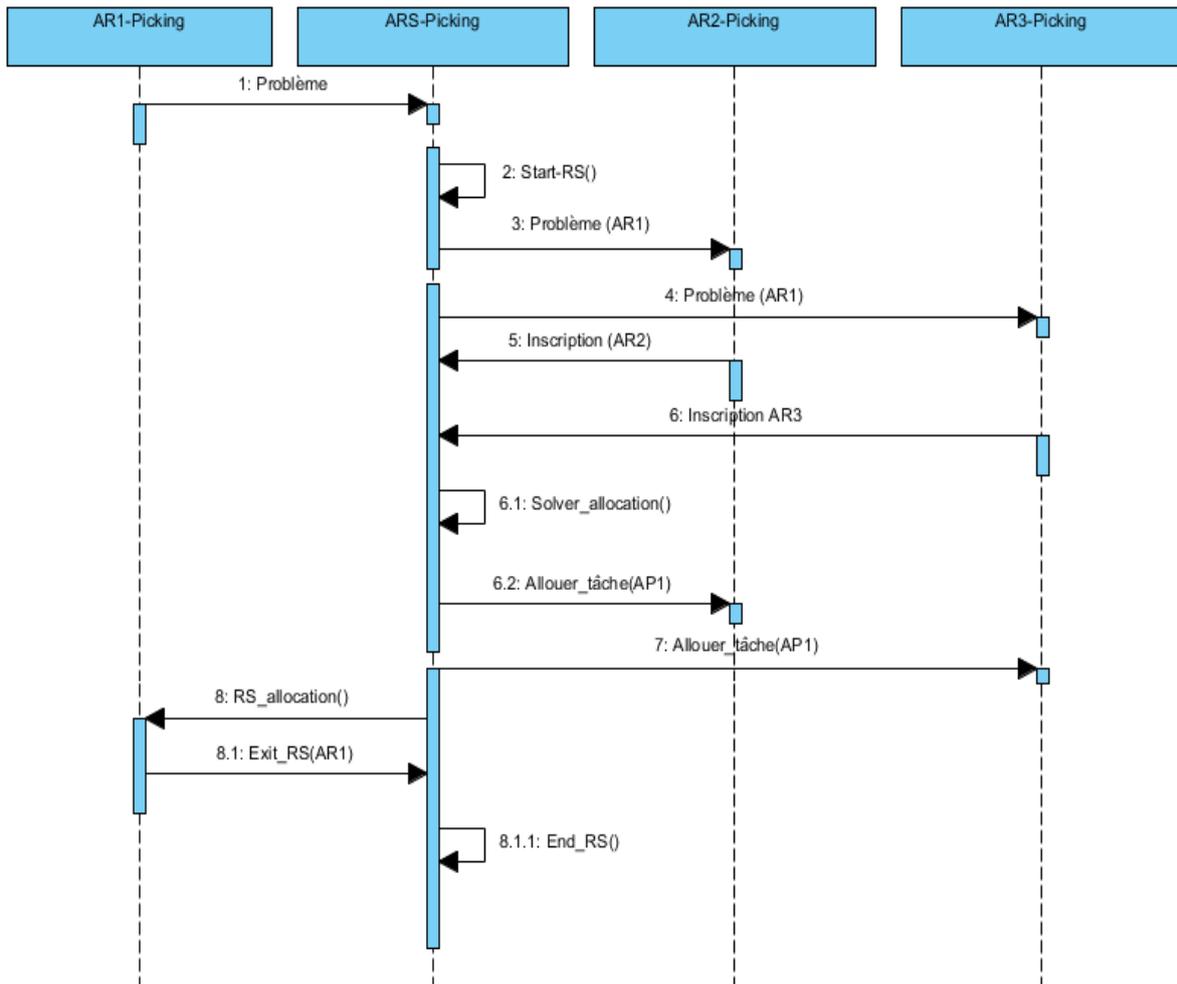


Figure IV-3. Protocole de négociation proposé

Dans ce paragraphe, nous avons proposé un protocole de négociation qui vise à générer des plannings d'exécution des commandes. La négociation est utilisée pour sélectionner une tâche suivante à attribuer à une ressource.

#### IV.4 Architecture générale du déploiement du système proposé

Le déploiement informatique du système proposé sur le terrain est élaboré par l'architecture représentée par la Figure IV.4. Le WMS s'occupe de l'envoi des commandes. Il diffuse toutes les informations nécessaires pour le processus de préparation de commande en mode « pick » ou « put » telles que l'index de la commande, l'adresse exacte de tous ses articles (Allée, Étage, Casier), la quantité à ramasser ou à déposer, etc.

Notre système AOSMA (Alliance Optimisation et Système Multi-Agent) proposée dans le chapitre III reçoit les commandes, optimise les parcours des opérateurs dans les préparations des commandes grâce à l'agent AO. Ce dernier réorganise l'ordre des articles de chaque commande et affecte des missions constituées de tournées optimales aux agents AM. Le

Le système RASL (Réalité Augmentée au Service de la Logistique) permet à l'agent AM, muni de lunettes à RA, d'assurer sa mission de préparation de commandes. Il utilise un serveur central surveillant le processus de préparation de commandes et communiquant avec le WMS. La connexion entre le serveur du WMS et le serveur de RASL se fait à travers un VPN. La communication elle-même est faite par l'intermédiaire de DataQueue utilisée par MQ Series<sup>17</sup>. Les lunettes représentent l'interface avec l'opérateur. Elles affichent les informations sur la commande, les produits à récupérer et les instructions de guidage. Elles permettent également à l'opérateur de valider la commande, de demander une nouvelle commande, de s'authentifier et d'informer l'agent A2M en cas de problèmes tels que les manquants au niveau des produits.

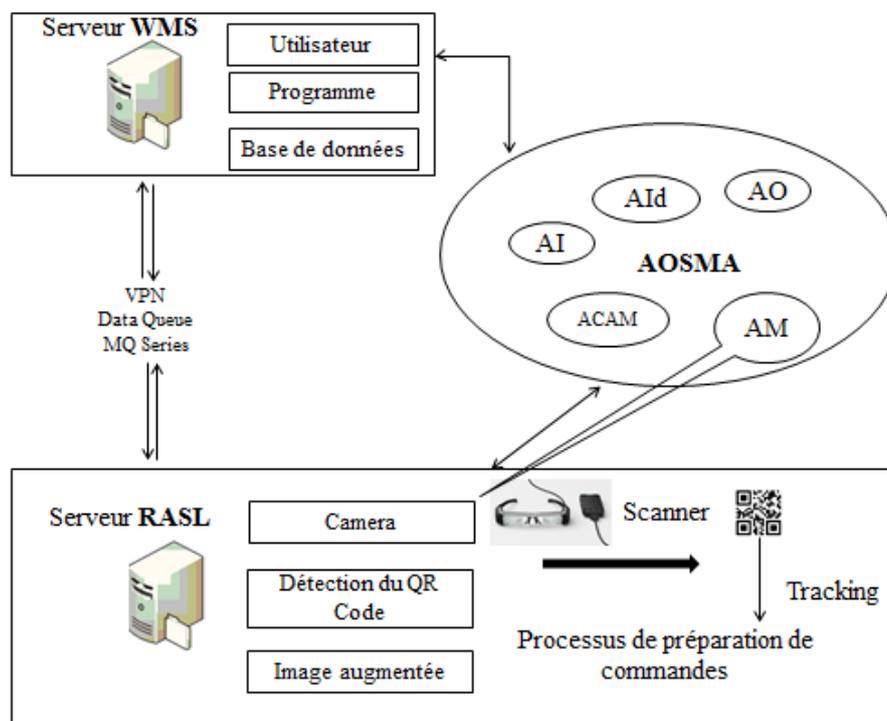


Figure IV-4. Architecture de déploiement informatique du système proposé

Le processus de picking ou putting est présenté dans la figure IV.5. L'opérateur s'identifie à RASL avec sa carte personnelle, et fait une demande de travail. Le WMS reçoit les informations à travers RASL. Une fois l'opérateur authentifié, le WMS génère la mission de préparation de commandes. L'opérateur suit les instructions affichées sur ses lunettes à RA et exécute les commandes envoyées, des commandes optimisées grâce à l'agent AO. Il parcourt les allées et les QR Codes placés sur les emplacements des articles sauront le guider tout au

<sup>17</sup> Websphere MQ (anciennement MQ Series) est une solution de messagerie par file d'attente développée par IBM qui permet à différentes applications de communiquer

long de son travail. Durant ce processus, le WMS reçoit les mises à jour chaque fois qu'un article est collecté ou déposé jusqu'à la fin de la commande. À la fin de sa mission, l'opérateur se déconnecte.

Le bon déroulement du processus de préparation de commandes dépend de l'interface du système. Les lunettes à RA affichent des informations dans le champ de vision de l'opérateur, de manière dynamique, sans aucune intervention de sa part. La qualité de l'information affichée peut alors être fortement augmentée, en vitesse et en pertinence car elle s'adapte à l'environnement de l'utilisateur, mais la quantité et le mode d'affichage doivent être soigneusement et minutieusement choisis. L'objectif principal de cette interface est que toutes les informations affichées puissent être immédiatement comprises par le préparateur de commande. Pour atteindre un tel objectif, il faut faire un choix entre les langues, les symboles, les couleurs, l'emplacement le plus adapté à (chacun) des utilisateurs, surtout face à des tâches répétitives.

La personnalisation de l'interface est rendue possible grâce à notre système puisqu'un choix entre un débutant, intermédiaire et un expert peut être fait. Ce choix n'affectera pas la quantité d'information, mais plutôt le mode d'affichage, avec des mots pour un débutant (Allée X, Étage Y, Casier Z) ou seulement avec des coordonnées pour un expert (X, Y, Z). Pour un débutant, une flèche saura lui montrer la voie à suivre, alors que de telles indications ne sont pas nécessaires pour un utilisateur expert.

L'information affichée pendant le processus est de deux types: le premier concerne la commande, ses caractéristiques et exigences, envoyé par l'AO, le second concerne la position de l'opérateur générée par le système grâce aux QR Codes qui sont dans le champ de vision de l'AM. Au cours de sa mission, l'opérateur est toujours informé de sa progression et de l'emplacement de l'article suivant (dans les coins supérieurs gauche et droit). Lorsque l'opérateur rencontre un QR Code, l'affichage d'une animation est déclenché. Les flèches rouges apparaissent quand une erreur de position est détectée et les flèches vertes permettent d'orienter les opérateurs. Un point bleu apparaît lorsque le bon casier à la bonne allée est identifié. La position de l'animation, ainsi que l'information globale sont affichées en fonction des réglages de l'opérateur.

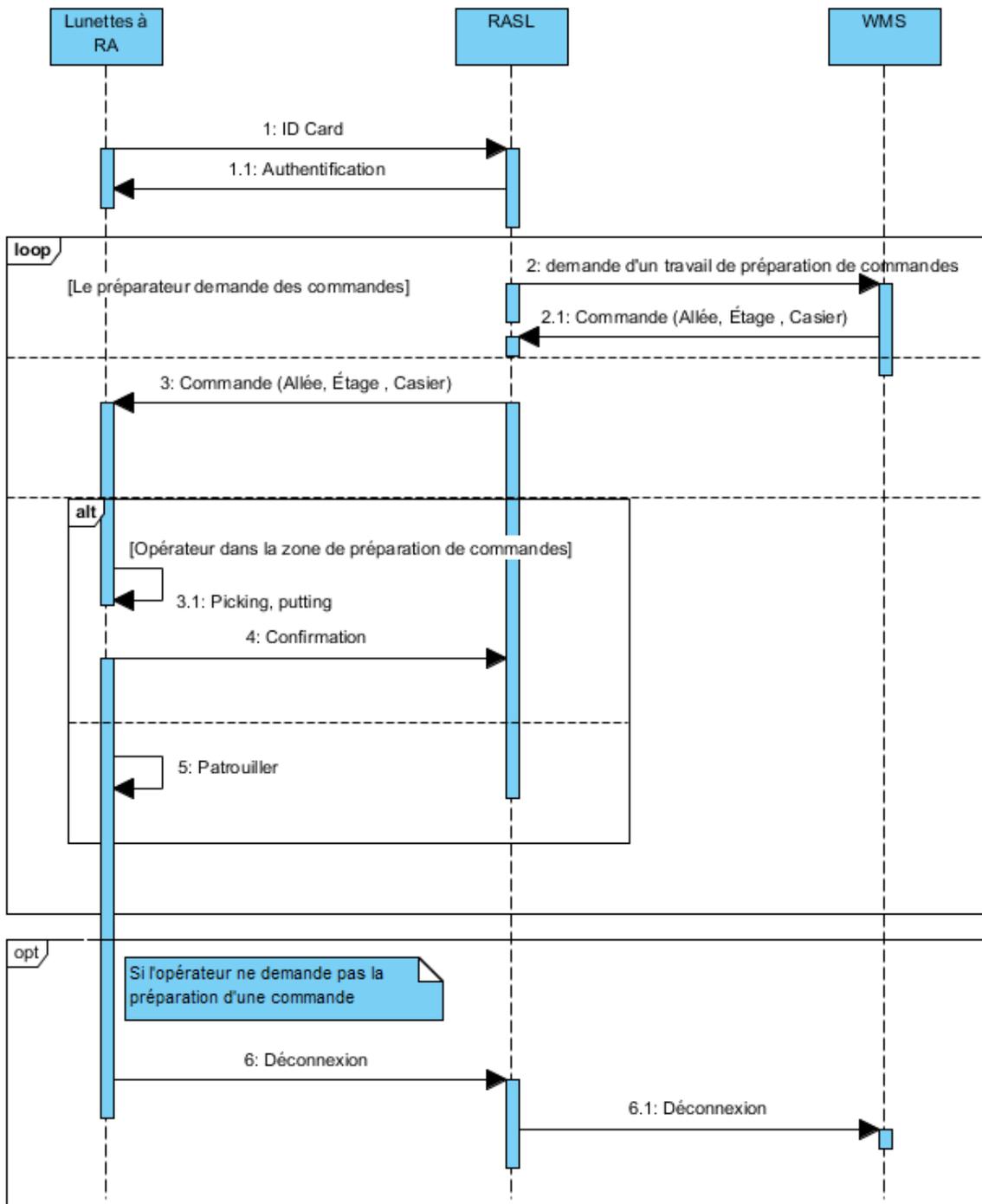


Figure IV-5. Processus de préparation de commandes

Les opérateurs mobiles dans l'entrepôt se déplacent en suivant les instructions de l'AO qui proposent des itinéraires optimisés. Ces instructions sont diffusées grâce aux lunettes à RA libérant les mains de ces opérateurs. Afin de mieux comprendre le fonctionnement des lunettes connectées et de justifier les différents choix effectués, nous proposons dans ce qui suit une étude sur les notions d'IHM (Interface Homme Machine) et de HUD (Head-Up Displays ou affichage tête haute) adaptés aux opérations de picking et de putting.

## **IV.5 Les technologies d'Interfaçage Homme-Technologie dans les entrepôts**

Ce sujet est très innovant, car il est le premier à mettre en place la RA, et plus précisément un affichage tête-haute, en entrepôt. En effet, cette technologie, bien que relativement ancienne puisque la RA est apparue sur les avions de chasse dans les années 1960 (§ I), reste encore assez peu utilisée dans l'industrie. Cela est principalement dû à des coûts trop élevés pour le public ou une utilisation à grande échelle dans un secteur : une paire de lunettes de RA coûte plusieurs milliers d'euros. Pourtant les affichages tête haute tendent à se démocratiser, notamment avec l'arrivée des fameuses Google Glass, premier dispositif grand public portable.

La logistique a beaucoup à gagner de l'usage de cette technologie :

- Les lunettes de RA n'occupent jamais les mains de l'opérateur, contrairement à une interface qui serait réalisée sur un terminal mobile.
- L'information est non intrusive : avec la technologie vocale, toutes les informations sont imposées à l'opérateur lorsqu'elles lui sont dictées. Avec la RA, toutes les informations nécessaires sont affichées dans la périphérie du champ de vision de l'opérateur, qui n'y accède qu'en cas de besoin. Cela permet de lui transmettre plus d'informations qui seront affichées à différents endroits, tout en lui laissant le choix d'accès à une information particulière.
- L'information est accessible : toutes les informations dont l'opérateur aura probablement besoin à un moment donné sont affichées sous différentes formes dans son champ de vision. Leur position, ainsi que leur forme (texte, nombres, symboles) ont été étudiées pour rendre l'information la plus lisible possible. Ainsi, toute information nécessaire au travail de l'opérateur est accessible d'un simple coup d'œil dans son champ de vision. Il peut également y revenir très facilement, contrairement au cas de la technologie vocale où l'utilisateur doit formuler une demande pour qu'elle soit dictée de nouveau.
- L'affichage de l'information est paramétrable : l'utilisateur doit préciser son expertise dans les réglages de son profil, ce qui a une conséquence directe sur la quantité d'informations affichées : le débutant sera guidé à travers l'entrepôt, quand l'expert n'aura que le strict nécessaire, avec l'information affichée sous forme condensée (exemple : « 2 | 1 | 4 » pour « Allée 2, Étage 1, Casier 4 »). L'affichage dépend aussi de l'œil directeur du préparateur, ou de son acuité visuelle (textes et symboles plus ou moins gros et proches).

- Possibilité de faire de l'e-learning : c'est-à-dire permettre à un utilisateur totalement novice d'utiliser le dispositif et d'apprendre la tâche de la préparation de commandes en le guidant à travers l'entrepôt. L'activité en entrepôt étant soumise à une certaine saisonnalité, le recours aux intérimaires est fréquent.

#### **IV.5.1 Les Head-Up displays**

Les HUD ou « affichage tête haute » en français sont des dispositifs qui permettent d'enrichir l'environnement d'un pilote, conducteur ou opérateur en lui superposant directement sur son champ de vision l'affichage de symboles ou d'informations prétraitées, grâce à un dispositif optique particulier. Les premiers systèmes ont vu le jour avec l'armée qui les utilisait pour afficher les informations de bords aux pilotes de chasse. Aujourd'hui, ceux-ci se retrouvent dans de nombreux avions de ligne mais aussi dans des domaines plus variés comme la médecine ou bientôt la logistique. Les HUD ne sont encore que peu présents dans les applications grand public mais la technologie progresse à grande vitesse. Nous travaillons sur des lunettes à RA fournies par le groupe français Laster Technologie<sup>18</sup> ainsi que des lunettes d'Epson. Ces solutions permettent l'affichage d'informations numériques sur un verre transparent qui laisse donc la vision libre.

#### **IV.5.2 Les technologies d'affichage et le suivi (Tracking)**

Ronald Azuma, chercheur à l'université de Caroline du Nord, distingue principalement trois types de dispositifs de visualisation [29].

- Projective[118]: Cette technologie requiert l'emploi de projecteur pour projeter des informations supplémentaires sur un objet. Ce sont donc les objets réels « augmentés ».
- Head worn: dispositifs de types casques ou lunettes portés par l'utilisateur. Ces types de dispositifs sont les plus courants dans les divers projets de RA.
- Handheld [118]: Il s'agit de dispositifs portés à la main par l'utilisateur. Ces dispositifs sont de taille réduite tenant dans le creux de la main. Ils sont très répandus et avec le succès grandissant des smartphones, de nombreuses applications se profilent. Cependant, il subsiste le désavantage de perdre la liberté d'une main.

Dans les travaux de Viirre et al.[119], ces chercheurs ont cité le Virtual Retina Display (VRD) qui est un dispositif de projection qui crée une matrice de points directement sur la rétine de l'utilisateur à l'aide de LEDs ou d'un laser. L'utilisateur voit devant lui un écran flottant. Ce

---

<sup>18</sup> <http://www.laster.fr>

Le système n'a pas encore donné d'applications concrètes car il est plus difficile de mettre en œuvre, bien qu'il semble prometteur tant en termes de résolution que d'angle de vue ou d'encombrement.

Un système à RA doit permettre de mixer le monde réel et le monde virtuel, afin de permettre à l'utilisateur d'accéder à une RM. Ce système doit mettre en correspondance ces deux mondes en cas de mobilité de l'utilisateur ou de l'environnement, et permettre à l'utilisateur d'interagir, en temps réel. Le schéma de la Figure 6 ci-dessous présente le système à RA :

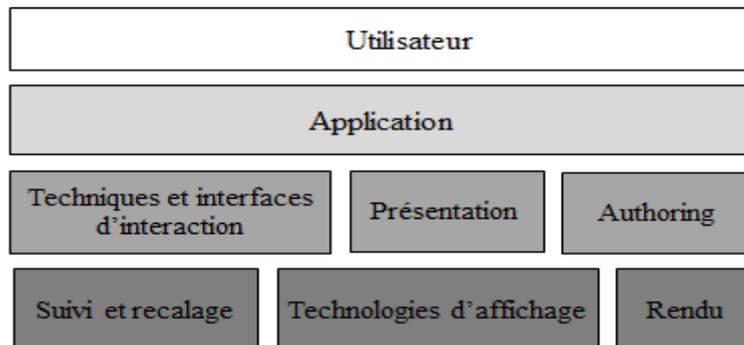


Figure IV-6. Briques d'un système de RA [109]

L'utilisateur se sert de l'application de RA, qui doit gérer plusieurs éléments: les interfaces d'interaction – éléments essentiels de la RA, car ils permettent à l'utilisateur réel d'entrer dans le monde virtuel–, la présentation et « l'Authoring » (Figure IV.6). La présentation est l'ensemble d'informations textuelles, graphiques ou audios utilisées pour augmenter le monde réel ; c'est le point sur lequel nous avons insisté afin d'assurer un confort visuel à l'utilisateur. L'authoring est la scénarisation du monde virtuel associé au monde réel. Il est important de bien prendre en compte ces différents éléments afin de proposer l'application la plus claire possible pour l'utilisateur. Ainsi, cela nécessite un suivi du développement, une réflexion sur la technologie d'affichage, et une vérification du rendu. Pour ce faire, nous avons étudié les principes du rendu et des augmentations dans le paragraphe suivant.

### IV.5.3 Le principe du rendu et des augmentations

Une augmentation consiste en la synthèse par ordinateur d'un élément virtuel destiné à l'un des sens de l'utilisateur. Dans le cadre de cette thèse, il s'agit d'un visuel virtuel. Il existe de nombreux dispositifs permettant d'augmenter le monde réel. La modalité visuelle est privilégiée pour l'être humain, le cortex visuel étant le système le plus imposant du cerveau humain. C'est pourquoi cette modalité a donné lieu à la majorité des développements dans le domaine de la RA.

Nous nous intéressons dans ce qui suit à la technologie que nous utilisons, le Head-Mounted Display. Il existe différents moyens de faire une « augmentation » dans le cas du Head-Mounted. Si nous nous intéressons à la façon dont la réalité est perçue par l'utilisateur, il existe deux solutions.

### La vidéo see-through

Dans ce cas, la vision de l'utilisateur est indirecte, car un moniteur restitue la vue du réel qui a été capturée par une caméra, et auquel on a ajouté les éléments virtuels souhaités. Pour réussir à mixer le réel et virtuel, il est essentiel de synchroniser les mouvements de la tête de l'utilisateur avec les éléments affichés : c'est le rôle du « tracking » ou le « suivi ». Il s'agit de la mise en correspondance du flux vidéo reçu par la caméra avec les coordonnées 3D de l'espace, et celle-ci est réalisée par le Head Tracker incorporé aux lunettes.

En outre, il convient de faire remarquer que ce procédé nécessite une grande puissance de calcul car il faut en permanence synchroniser la vidéo qui s'affiche pour l'utilisateur. Ci-dessous, on peut voir un schéma récapitulatif de la Vidéo see-through (Figure IV.7).

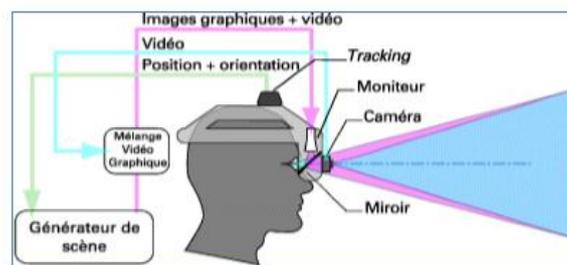


Figure IV-7 RA en vision indirecte (video see-through) [120]

### L'optical see-through

Dans ce cas, la vision de l'utilisateur est directe car les lunettes sont transparentes ou semi-transparentes. Le système a donc uniquement besoin de superposer les éléments virtuels à la vue de l'utilisateur. Bien entendu, on a toujours besoin du même système de tracking pour que les informations soient synchronisées avec la vue de l'utilisateur.

Ci-dessous, un schéma récapitulatif de l'Optical see-through (Figure IV.8).

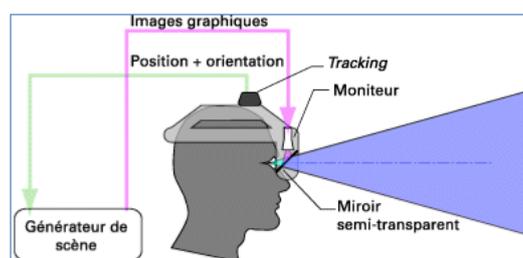


Figure IV-8. RA en vision directe (optical see-through) [120]

Ce système est moins sensible aux temps de latence introduits par les calculs que doit faire le système puisque l'utilisateur aperçoit le monde réel de façon directe. De plus, nous sommes face à un système qui requiert moins d'électronique; ce qui se traduit par un encombrement et un poids réduits.

C'est pour ces raisons que notre choix s'est porté sur cette deuxième option.

Il s'agit ensuite de choisir le produit le plus adapté à notre besoin. Plusieurs éléments sont à prendre en compte dans ce choix, parmi eux :

- Le champ de vision qui oscille entre 15° et 40°
- La résolution de la caméra qui limite la taille des QR Codes à reconnaître
- La résolution de l'affichage qui limite les informations à afficher
- La fatigue visuelle induite par l'utilisation, notamment si la distance de focalisation des lunettes ne correspond pas à celle de l'œil de l'utilisateur, ou si la morphologie de l'utilisateur l'empêche de bien positionner les lunettes
- L'encombrement et le poids du système

A l'heure actuelle, le système idéal ne semble pas exister, et nous avons dû composer avec les lacunes des lunettes choisies, comme une résolution de caméra assez faible qui nous a contraints à utiliser des QR Codes de grandes dimensions.

Nous avons pu voir que ces dernières années ont été particulièrement prolifiques en termes de développement et d'applications de lunettes à RA. D'abord réservés à l'armée ou au médical, ces systèmes sont en train de se démocratiser, sous l'impulsion notamment de Google, qui est le premier à avoir lancé en 2013 les premières lunettes à RA destinées au grand public : les Google Glass.

De nombreux concurrents ont suivi cette annonce et tentent eux aussi de pénétrer ce nouveau marché. Parmi eux, on peut citer par exemple Sony, Epson ou Microsoft, qui a annoncé la sortie d'un casque à RA au courant de cette année, Hololens® (Figure IV.9).



Figure IV-9. Microsoft Hololens®

Nous avons eu l'occasion de tester deux modèles du marché :

- les SeeThru de LASTER Technologies, avec lesquelles nous avons travaillé jusque fin 2014.
- plus récemment, les Epson Moverio BT-200.

Les caractéristiques de ces deux produits sont détaillées dans le paragraphe IV.5.4.

#### IV.5.4 Lunettes à RA utilisées

##### IV.5.4.1 Lunettes monoculaires : Laster Technologies

Les lunettes utilisées en premier temps dans le cadre de nos travaux sont les lunettes proposées par Laster Technologies. Après plusieurs années de recherche en collaboration notamment avec l'Université Paris Sud et l'Institut d'Optique, ils ont développé la technologie EnhancedView™ expliquée sur la figure IV.10 qui, sur un simple verre transparent, permet aujourd'hui d'afficher tout type d'informations (textes, images, vidéos, 3D,...).

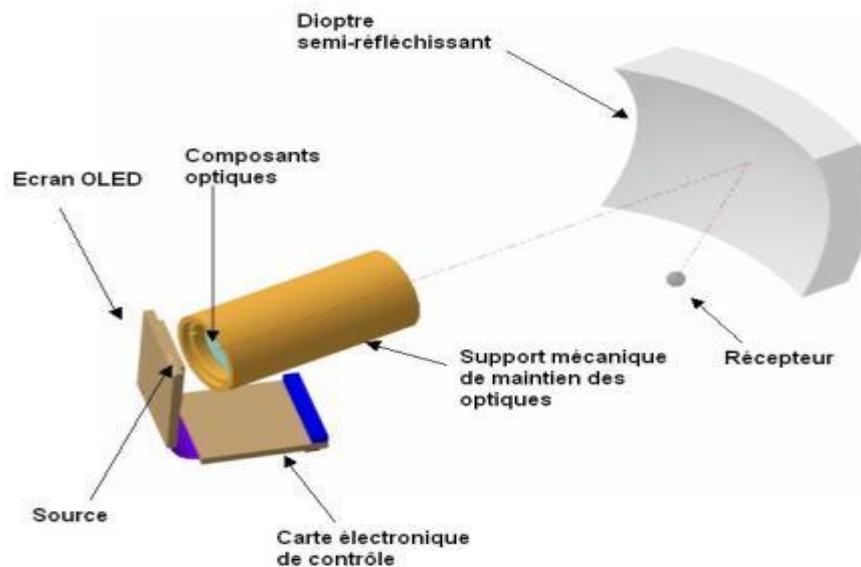


Figure IV-10. La technologie EnhancedView

La technologie EnhancedView™, qui est associée à des algorithmes avancés de reconnaissance d'objets avec ou sans marqueurs, de tracking et de recalage (§ I), va donc nous permettre de mettre en œuvre des applications de RA dans le secteur de la logistique.

##### IV.5.4.2 Lunettes binoculaires Epson

Les lunettes de RA d'Epson ont été commercialisées fin juin 2014. Il s'agit d'un produit abouti à prix abordable à l'inverse des Google Glass vendu à 1500 dollars. Avec un poids de 88 grammes, les lunettes d'Epson se portent même au-dessus d'une paire de lunettes de vue. Contrairement aux lunettes de Laster Technologies, les lunettes d'Epson utilisent un système

binoculaire permettant d'afficher au centre du champ de vision de l'utilisateur un "écran transparent" d'une résolution de 960x540 pixels. Elles sont dotées d'un OS Android 4.0. Avec une batterie déportée dans un boîtier, ces lunettes affichent jusqu'à 6 heures d'autonomie.

Une comparaison entre les deux paires de lunettes est représentée dans le tableau suivant (Tableau IV.1).

**Tableau IV-1. Comparaison entre les lunettes Laster et Epson**

	EPSON	LASTER
Affichage	2 yeux	1 œil
Wi-Fi & Bluetooth	Oui	Oui
Batterie	Jusqu'à 6 heures (2720 mAh)	6 à 8h
Contrôle	Boîtier de contrôle avec touchpad	Lien nécessaire avec un ordinateur
Taille réelle de l'écran	1,07cm de largeur	
Taille apparente de l'écran	2m de largeur à 5m de distance	
Résolution de l'écran	960x540 (résolution 16/9)	800x600
Angle de vision	23°	25°
Nombre de couleurs	16,77 millions	16,77 millions
Technologie de la caméra	VGA <sup>19</sup>	VGA
Gyroscope <sup>20</sup>	Oui	Oui
Accéléromètre	Oui	Oui
Microphone	Oui	Oui
RAM <sup>21</sup>	1 GB	

#### **IV.5.5 L'organisation de l'affichage pour un HUD**

La prise en compte du facteur humain dans la création d'une IHM à base de HUD est primordiale. En effet, la vision tête haute peut vite devenir inconfortable et de nombreuses études ont été réalisées pour comprendre et optimiser l'organisation de l'affichage. Chez l'homme, 70% de la saisie d'informations extérieures est traité par le canal visuel. Il n'est pas nécessaire, pour optimiser l'affichage d'un HUD, de comprendre tout le système optique humain, mais il faut néanmoins revenir sur certains points qui sont utiles pour la compréhension des HUD. Le champ visuel humain correspond au domaine que l'on perçoit autour d'un point net lorsqu'on le fixe, c'est-à-dire en l'absence de mouvement volontaire des yeux. Il est constitué de différentes zones qui possèdent chacune leurs caractéristiques (Figure IV.11). Ainsi, la zone d'acuité centrale diurne ou vision centrale est la zone de vision la plus

<sup>19</sup> Video Graphics Array : un standard d'affichage pour ordinateurs

<sup>20</sup> Un capteur de position angulaire

<sup>21</sup> Random Access Memory : mémoire vive, ou mémoire système

nette et mesure environ deux degrés. On trouve ensuite la zone de vision binoculaire qui mesure environ  $60^\circ$  puis les zones périphériques sur les côtés. Le champ visuel humain est horizontalement de l'ordre de  $180^\circ$  et verticalement de  $130^\circ$  chez l'homme debout.

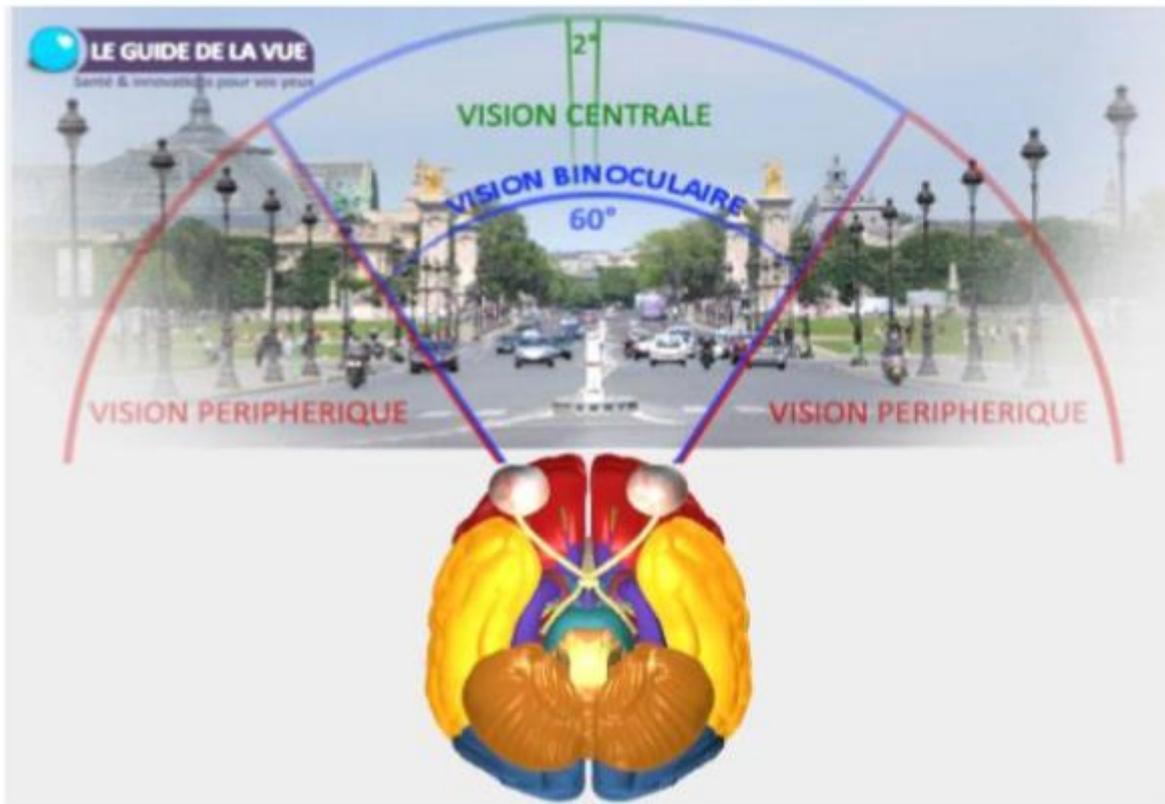


Figure IV-11. Champ de vision

La vision binoculaire doit être laissée au maximum libre, puisque l'opérateur a besoin de se déplacer dans l'entrepôt. C'est donc la vision périphérique qui va constituer le principal support des informations transmises à l'opérateur. Celle-ci a cependant des caractéristiques à prendre en compte. En effet, la vision périphérique fonctionne comme une alarme qui détecte les mouvements. Ainsi un changement ou une rupture dans le champ périphérique de l'utilisateur va l'amener à diriger son regard vers cette zone pour constater le changement. Ces poursuites oculaires sont cependant génératrices de fatigue et une utilisation de la symbolique est préconisée.

Le deuxième point à aborder pour organiser l'affichage dans les zones périphériques de la vision est la latéralité cognitive. Le cerveau humain est composé de deux hémisphères à priori identiques mais qui fonctionnent différemment puisqu'ils sont spécialisés (Figure IV.12). Les aires visuelles du cerveau sont situées dans la partie occipitale et donc dans les deux hémisphères. Il faut donc faire attention à bien organiser les informations transmises. Cependant, l'information qui arrive de l'œil droit n'est pas nécessairement traitée par l'œil

droit et inversement. Le traitement par un hémisphère de l'information visuelle en fonction de sa localisation est représenté sur le schéma ci-dessous [121].

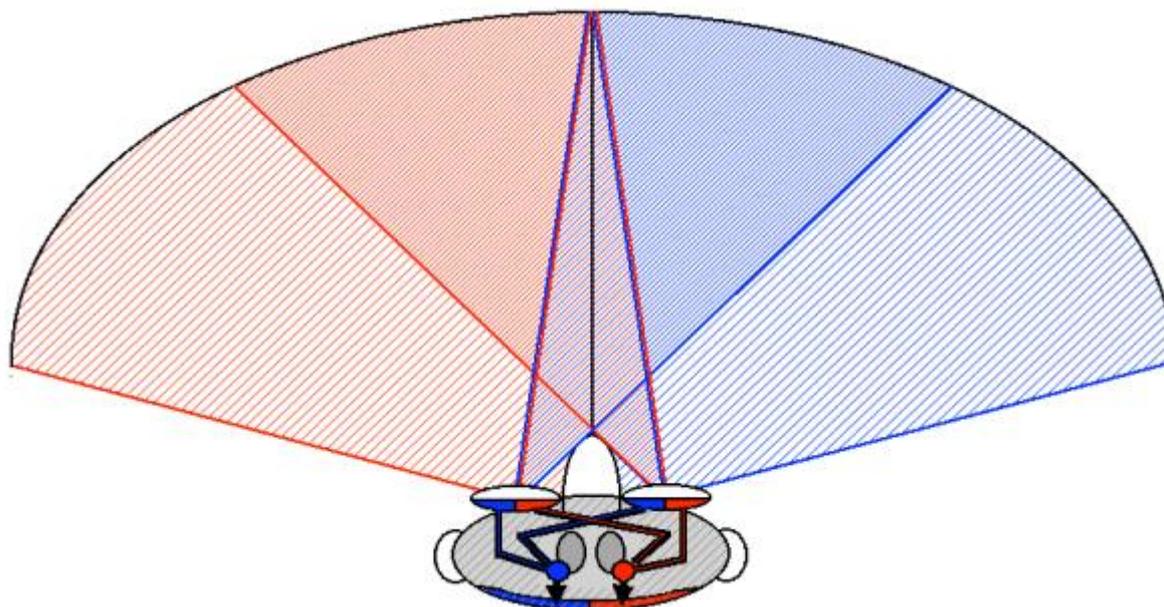


Figure IV-12. Traitement de l'information en fonction de sa localisation dans le champ visuel [122]

On constate ainsi que ce n'est pas parce qu'une information provient de l'œil droit qu'elle va être traitée nécessairement par l'hémisphère droit, cela dépend de sa localisation dans le champ visuel. Or, les études menées par Hellige en 1996 [123] ont montré que le traitement visuel de l'information est d'autant plus facilité qu'il correspond à une spécialisation fonctionnelle de chaque hémisphère. Des informations traitées par l'hémisphère non spécialisé conduisent à des retards et une perte de la robustesse des informations. Il en résulte donc qu'il faut tenir compte de cette latéralité et qu'on ne peut pas afficher les mêmes informations dans les champs périphériques droit et gauche. Le tableau IV.4 suivant indique les spécificités de chaque hémisphère :

Tableau IV-2. Répartition schématique des performances latéralisées [124]

Champ visuel gauche	Champ visuel droit
Hémisphère droit	Hémisphère gauche
Non verbal	Verbal
Visuospatial <sup>22</sup>	Linguistique
Holistique <sup>23</sup> (gestalt)	Analytique
Parallèle	Séquentiel

<sup>22</sup> Les fonctions visuo-spatiales permettent de s'orienter dans l'espace, de percevoir les objets de notre environnement et de les organiser en une scène visuelle cohérente, d'imaginer mentalement un objet physiquement absent.

<sup>23</sup> Une vision holistique de l'être humain tient compte de ses dimensions physique, mentale, émotionnelle, familiale, sociale, culturelle, spirituelle.

Complexe	Linéaire
Intuitif (images mentales ...)	Logique et rationnel
Inconscient	Conscient
Automatique	Contrôlé
Circulaire	Progressif
Concret	Abstrait
Pensée appositionnelle	Pensée proportionnelle
Images	Dessin, lignes
Pictographique	Alphabétique
Métaphore	Dénotation

On note ainsi que les champs visuels droits et gauches ne doivent absolument pas être utilisés de la même manière. Par exemple, il vaut mieux utiliser pour le champ visuel droit des symboles de type flèches ou icônes organisés en séquence.

Il en découle alors ces préconisations sur l’affichage :

Tableau IV-3. Comparaison entre les champs visuels gauche et droit

	Champ visuel gauche	Champ visuel droit
Représentation	Manière imagée (images, vecteurs, niveaux, couleurs, etc.)	Manière symbolique (lettres, chiffres, icônes significantes, etc.)
Disposition	En parallèle	Alternée

La Figure IV.13 représente un exemple d’une organisation type d’un HUD:

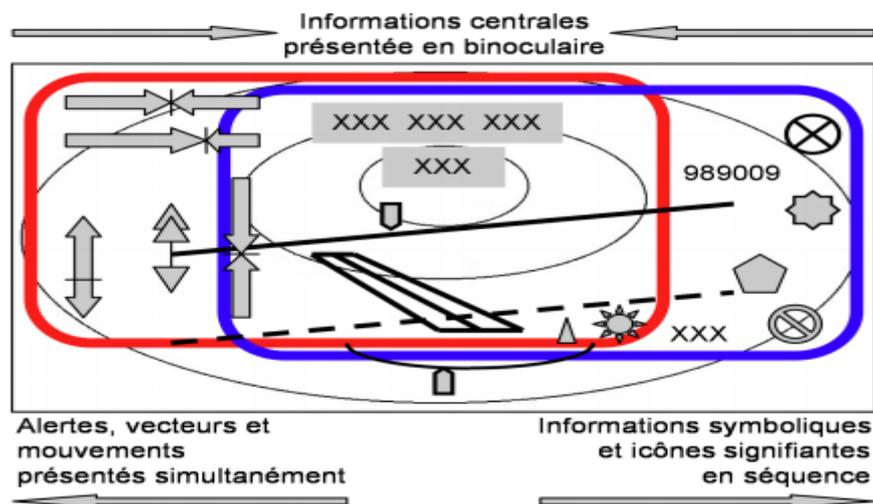


Figure IV-13. Principe de présentation informationnelle périphérique respectant la latéralité périphérique du champ de vision (œil gauche en rouge, œil droit en bleu) [125][126]

On constate que le champ binoculaire est laissé au maximum libre. Le reste étant relégué sur les champs visuels périphériques, où l’information est disponible en permanence mais ne gêne pas la vision.

## IV.6 L'IHM du système

Les interactions homme-machine définissent les moyens et outils mis en œuvre afin qu'un être humain puisse communiquer avec une machine, le plus souvent un ordinateur (par exemple un clavier ou une souris). Les ingénieurs et chercheurs qui travaillent sur ces interactions étudient la façon dont les humains interagissent avec les ordinateurs, ainsi que la façon de concevoir des systèmes qui soient ergonomiques, efficaces, faciles à utiliser ou plus généralement adaptés à leur contexte d'utilisation. L'amélioration de l'ergonomie de l'IHM a notamment pour objectif de limiter les risques du travail sur écran (fatigue oculaire, syndrome d'épuisement professionnel, stress, etc.). Il existe de nombreuses manières pour qu'un humain puisse interagir avec les machines qui l'entourent. Certaines techniques tentent de rendre l'interaction plus naturelle.

On peut citer :

- la reconnaissance automatique de la parole ou de gestes;
- la synthèse vocale;
- les gants de données qui sont plus directes que la souris (Figure IV.14);



Figure IV-14. Exemple de gant de données [127]

- les tables interactives (Figure IV.15).



Figure IV-15. Exemple d'une table interactive

On peut distinguer trois types d'IHM :

- Les interfaces d'acquisition : clavier d'ordinateur, télécommande, capteur de mouvement, microphone, etc.
- Les interfaces de restitution : écrans, haut-parleurs, etc.
- Les interfaces combinées : écrans tactiles par exemple.

La RA désigne les différentes méthodes qui permettent d'ajouter des éléments virtuels à la réalité, et ce de façon réaliste (§ I). Pour cela, on utilise des lunettes à RA (Figure IV.16 et Figure IV.17). La technologie mise en place par ces lunettes repose sur la projection sur leur écran de diverses informations. L'utilisateur peut voir, superposées à la vision du monde qui l'entoure, des informations sur ce monde tel qu'un chemin à suivre. Dans cette thèse, l'Agent Mobile reçoit le parcours de picking optimisé grâce aux approches et algorithmes proposés dans le chapitre III. Sa tournée est affichée sur les lunettes à RA.



Figure IV-16. Lunettes à RA commercialisées par l'entreprise Laster



Figure IV-17. Lunettes EPSON

Si l'on considère cet utilisateur, les lunettes et les conditions d'utilisations du logiciel, on voit clairement apparaître la problématique de l'IHM : Comment rendre l'affichage sur les lunettes le plus confortable possible? Quelles seront les éventuelles conséquences sur la santé? Comment l'utilisateur va communiquer, grâce aux lunettes et avec le logiciel développé? Quels seront les éléments à afficher?

L'esthétique de l'interface doit être visuellement agréable. Cela passe par une police d'écriture épurée, une luminosité adéquate et un nombre minimal d'éléments affichés. Ces derniers doivent prendre le moins de place possible pour ne pas encombrer le champ de vision de l'utilisateur et qui seront placés à des endroits judicieux. Les conséquences sur la santé doivent être nulles, c'est pourquoi l'avis d'experts en ophtalmologie est primordial.

Pour ce qui est de l'interaction avec le logiciel, nous avons choisi d'utiliser les QR Codes dont le plus grand avantage est le fait de pouvoir stocker plus d'informations qu'un code-barres standard, et surtout des données directement reconnues par des applications. Concrètement, la caméra des lunettes va reconnaître le QR Code, le décoder puis transmettre une information à l'utilisateur.

Concrètement, lorsqu'il s'agit de guider l'opérateur lors de la préparation d'une commande, les lunettes peuvent par exemple afficher une flèche pour indiquer la position du QR Code correspondant à l'objet recherché par rapport à la position du QR Code qui vient d'être lu puis un élément graphique qui indiquera que le bon colis a été atteint (un « v » de validation par exemple). Lorsque le préparateur doit collecter un objet dans un carton qui contient plusieurs objets différents, les lunettes pourront afficher, une image de l'objet à prendre ainsi que la quantité à prélever. De même, lorsqu'un opérateur doit placer des objets dans des colis. Nous cherchons à concevoir l'interface de façon à avoir un travail efficace avec un confort optimal. Une réflexion peut également être menée pour savoir comment l'utilisateur pourrait communiquer avec le programme sans utiliser des QR Codes, de façon plus intuitive. La question est d'actualité et de nombreux chercheurs travaillent sur le sujet. Dans le cadre de cette thèse, trois méthodes d'interaction ont été proposées :

- L'utilisation de QR Codes : le principe est simple, sur chaque main de l'opérateur se trouve un QR Code correspondant à la validation/l'annulation. L'opérateur place le code correspondant à l'interaction souhaitée dans son champ de vision, et les lunettes le reconnaissent (Figure IV.18).

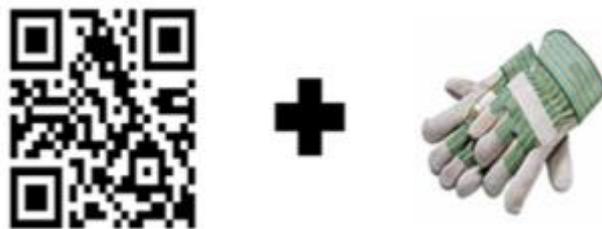


Figure IV-18. Utilisation des QR Codes

- La reconnaissance de formes : L'idée est ici plus audacieuse. Il s'agit d'utiliser les bibliothèques permettant la reconnaissance de forme. Alors, la validation pourrait être effectuée par un signe du pouce par exemple. Cette solution peut ouvrir le large champ du langage des signes pour l'implémentation d'autres actions que la validation/annulation.
- Les carrés de validation : Une dernière solution à laquelle nous avons pensé est l'utilisation de l'affichage des lunettes. Un carré vert pour valider, un carré rouge pour annuler, et le préparateur tourne la tête pour faire l'un ou l'autre.

Afin de réussir à faire le meilleur choix parmi ces 3 solutions, il était nécessaire de les comparer. C'est ce que nous avons fait en nous concentrant sur plusieurs axes :

- La difficulté de réalisation

- La pénibilité physique (effort) et mentale (aspect intuitif, concentration nécessaire) des actions pour l'opérateur
- La durée de l'action, la communication entre le préparateur et les lunettes devant être la plus fluide possible
- L'incertitude sur l'efficacité de la solution

Il est ressorti de cette comparaison qu'aucune solution ne l'emportait haut la main, notamment parce que chacune présente une pénibilité non-négligeable. Après discussion lors des réunions avec notre partenaire Generix Group, il nous a paru plus judicieux de considérer une interaction de type « implicite », se basant sur le bon sens : une fois guidé vers le colis, le préparateur a le colis dans son champ de vision et les lunettes affichent le fait qu'il s'agisse du bon colis. Ainsi, si ce dernier reste suffisamment longtemps dans le champ de vision du préparateur, on pourrait considérer automatiquement que le colis a été pris et que le préparateur peut passer à la tâche suivante.

## **IV.7 L'interfaçage avec le WMS**

L'activité principale de Generix est la commercialisation d'un WMS, qui permet de gérer les stocks dans l'entrepôt, ainsi que les commandes. En tout début de la thèse, nous avons eu accès, via Generix, à une version d'essai de ce WMS, afin de pouvoir générer des commandes, les traiter, puis renvoyer les informations au WMS afin que celui-ci puisse mettre à jour sa base de données.

### **IV.7.1 Présentation du WMS de Generix**

Le WMS de Generix regroupe beaucoup de fonctions nécessaires à l'avancement de nos travaux tels que : le stockage de produits, la création de clients, la création de commandes.

La maîtrise de cet outil est nécessaire à la réussite de cette thèse puisque ça permet de comprendre en profondeur le processus de picking en entrepôt. Ce système de gestion des entrepôts permet également de créer des informations de la commande qui sont récupérées plus tard par l'application.

#### **Connexion**

La Figure IV.19 représente l'interface de connexion au WMS.



Figure IV-19. Connexion au WMS

## Page d'accueil (Figure IV.20)

**Raccourcis :** Il est possible pour naviguer plus rapidement d'utiliser des raccourcis (X8, O82, etc...).

**Extraction Excel :** cet icône vous permet d'extraire les données sous forme d'un tableur Excel.

**Recherche :** Utiliser cette recherche par code produit ou par adresse pour trouver directement le produit voulu. L'adresse se décompose en zone/allée/emplacement/niveau.

Figure IV-20. Page d'accueil du WMS

Le processus de commande doit être méthodique. Il faut respecter les étapes suivantes dans l'ordre chronologique.

### 1) Création d'un client

La création d'un client est la première étape d'une commande. Par défaut, le WMS a dans ses bases de données un client dont le code est 1.

### 2) Création d'un opérateur

Il est nécessaire de créer un opérateur. Là encore, il existe un opérateur par défaut (Figure IV.21).

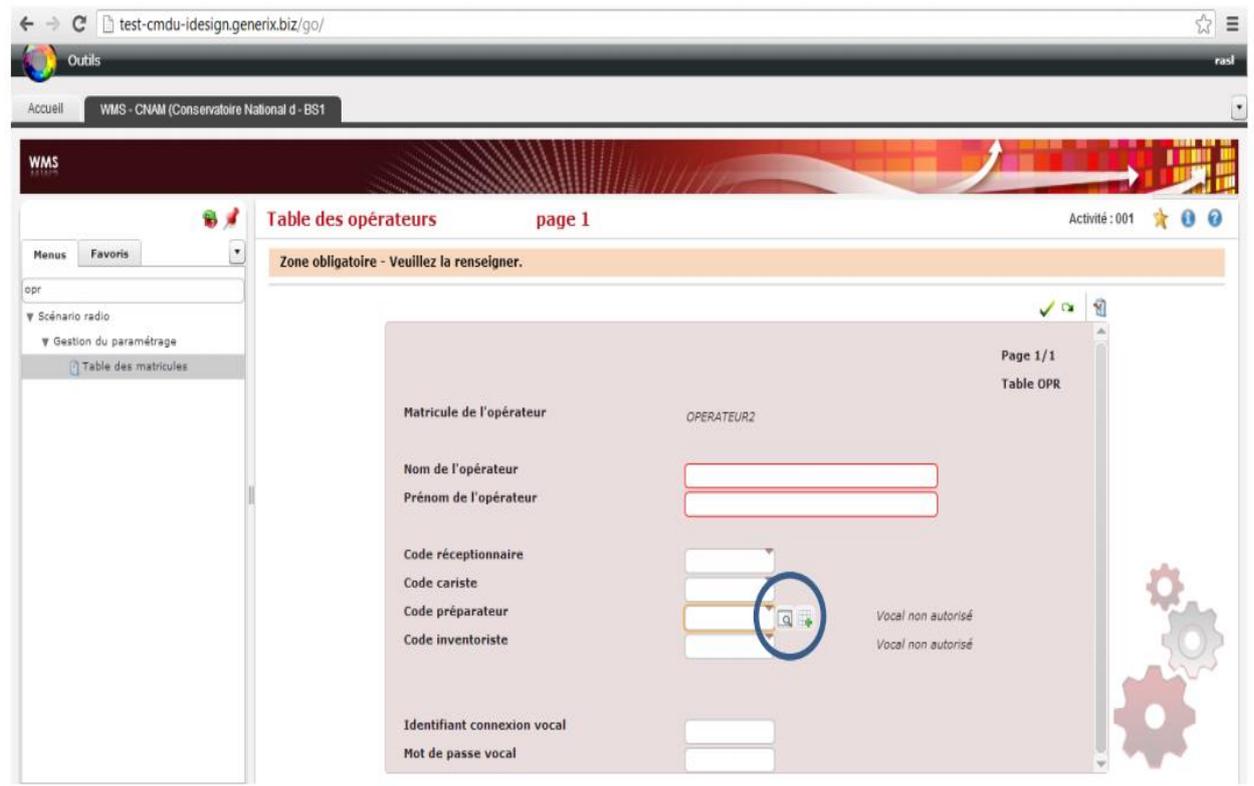


Figure IV-21. Création d'un opérateur

### **Stockage d'un produit**

Il faut savoir que cette démo du WMS a une base de données de plusieurs milliers de produits avec leurs adresses respectives dans l'entrepôt. Pourtant, par défaut, l'entrepôt est vide. Il faut donc avant de passer la commande, stocker les produits concernés en quantités suffisantes. En effet, à chaque fois qu'une commande est préparée, la quantité du produit est décrétementée et il est possible de se retrouver en rupture de stock (Figure IV.22). Le logiciel n'affichant pas de message d'erreur dans ce cas, il faut être vigilant.

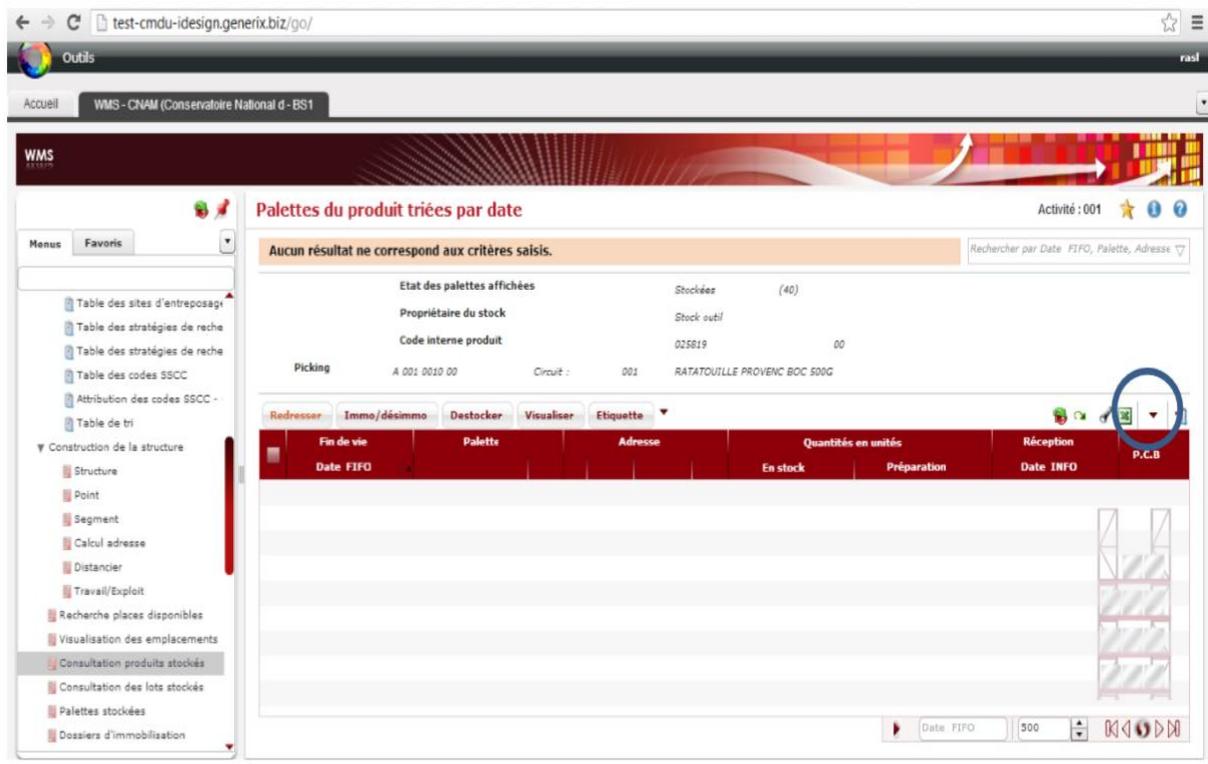


Figure IV-22. Stockage d'un produit

### **Passer une commande**

Maintenant que le WMS a enregistré un client, un opérateur et a stocké un certain nombre de produits, il est possible de faire une commande. Cela consiste à choisir un certain nombre de produits avec leurs quantités respectives pour un client donné.

L'information de cette commande est récupérée par le biais d'un VPN (Virtual Private Network) qui est un système permettant de créer un lien direct entre des ordinateurs distants. C'est ainsi que lorsqu'un opérateur se connecte sur le terminal et qu'il demande un travail, la commande lui sera directement attribuée à travers les lunettes à RA.

A ce stade, la commande est restée en mémoire mais n'a pas été envoyée. Il faut donc l'ajouter dans une file de données (DataQ) qui s'appelle PVI. Donc, la file se remplit et se décrémente dès qu'un opérateur fait une demande de travail. Puisqu'il s'agit d'une file de données, une commande n'est attribuée qu'une seule et unique fois. Pour les phases de test, il est donc nécessaire de créer un grand nombre de commandes à la fois.

### **Demande de travail**

La demande de travail d'un opérateur se fait à partir du terminal qui transmet l'information au WMS. Il est néanmoins possible de simuler une demande de travail directement à partir du WMS. Il faut aussi intégrer cette demande de travail dans la DataQ PVI.

Ci-dessous un tableau récapitulatif des principales informations échangées dans les deux sens afin de concevoir un prototype entre le préparateur et le WMS de Generix Group.

Tableau IV-4. Les principales informations échangées pour une demande de travail

Informations envoyées par le préparateur au WMS via le dispositif	Informations envoyés par le dispositif au préparateur	Informations envoyées par le WMS au dispositif
Signalement d'un produit manquant	Position et quantité de chaque colis	Position et quantité de chaque colis
Position (via la caméra)	Validation ou non de la position de l'opérateur	
Validation de la quantité prélevée	Directions à suivre pour atteindre le prochain colis	
Connexion et configuration du profil et des préférences		
Demande de travail		
Demande de fin de journée		

#### IV.7.2 L'affichage des informations

Comme cela a été énoncé plus haut, l'objectif d'une IHM est de rendre utilisable par un tiers un système ou une machine. L'opérateur est amené à travailler dans un environnement spécifique : l'entrepôt, en suivant les directives du WMS organisant les opérations de la logistique et en particulier la préparation de commande (ou picking).

Pour qu'un prototype soit considéré comme performant, il doit remplir un certain nombre de critères :

- Efficacité : c'est-à-dire que l'objectif annoncé par le système est atteint.
- Efficience : l'objectif annoncé est atteint avec le moindre effort et dans un laps de temps minimal
- Satisfaction : le confort de l'utilisateur est assuré par l'interface et son évaluation subjective est positive. C'est dans cette optique que l'on doit choisir les informations qui seront affichées par l'IHM.

##### Détail des informations disponibles

Le WMS, lorsqu'une commande est générée, transmet un certain nombre d'informations qui pourront être utilisées par l'IHM. Toutes ces informations ne sont pas pertinentes à afficher puisque certaines ne concernent que le WMS dans sa tâche de supervision.

Les informations relatives à la commande dans sa globalité sont : le numéro de l'unité d'œuvre de travail (avec un sous numéro le cas échéant), la date de la requête, le support destinataire (numéro de palette), ou encore le code du matériel de manutention.

Une série d'informations relatives cette fois au détail de la commande est également générée, à savoir : la liste détaillée des articles (chaque type d'article est désigné par un numéro) dans

l'ordre de prélèvement attendu par le WMS ainsi que les adresses de chaque article (allée, rangée, étagère, numéro de casier).

### Les différents niveaux d'expertise

Avant même le début de la conception d'une interface en RA, nous nous sommes intéressés à l'occasion d'une présentation par M. Legros de la société Zetes<sup>24</sup> à ce qui existait déjà en termes d'IHMs dans les entrepôts. Pour mémoire, les interfaces vocales fournies par Zetes sont des systèmes dans lesquels une voix synthétique communique avec l'opérateur à partir d'une grammaire préétablie. Or les interfaces vocales si elles présentent des caractéristiques d'efficacité et d'efficience très élevées (si elles sont bien conçues, l'information peut être délivrée sous une forme très naturelle à l'opérateur sans qu'il ait besoin d'apprendre un langage spécifique particulier) elles sont souvent très inconfortables, du fait notamment de leur caractère répétitif. D'où l'idée de concevoir différents niveaux d'expertise dans lesquels les informations sont plus ou moins « articulées » (la vitesse et la concision augmentent avec le niveau d'expertise).

L'idée des niveaux d'expertise dans le système a été exploitée dans le démonstrateur sous la forme d'un menu qui permet de choisir la concision de l'information délivrée à l'opérateur au cours de sa mission. Dans le niveau Débutant, l'opérateur voit s'afficher les consignes en toutes lettres, notamment l'adresse ce qui ne laisse place à aucune confusion. Néanmoins, l'information prend alors beaucoup plus de place dans le champ de vision de l'opérateur ce qui affecte son confort. Dans le haut niveau d'expertise, c'est le contraire, les informations sont rendues de la manière la plus concise possible. Le niveau intermédiaire quant à lui conserve un système d'initiales, pour les adresses entre autres, pour conserver de la lisibilité à l'interface. Au fur et à mesure que l'on progresse dans les niveaux d'expertise, l'interface devient de moins en moins lisible pour le néophyte tandis que son usage est rendu plus confortable pour l'utilisateur confirmé.

### Affichage des informations au cours du processus de picking

Tout au long du processus de picking, l'opérateur voit son besoin en information évoluer et il doit passer d'une vision globale de sa mission à une vision précise de chaque objectif intermédiaire.

Au cours de la mission, l'intérêt de la RA se fait plus manifeste. En effet en choisissant de remplacer des commandes vocales par un affichage transparent des commandes dans la

---

<sup>24</sup> <http://www.zetes.fr/>

périphérie du champ de vision de l'opérateur, on peut atteindre les standards d'efficacité et d'efficience tout en augmentant sensiblement le confort de l'opérateur.

Nous choisissons en général pour des missions de guidage relativement souple d'utiliser en priorité la périphérie du champ de vision de l'opérateur : en effet, la géographie des entrepôts s'acquiert généralement assez vite (il s'agit d'un système de quadrillage).

La fonction de supervision assurée par la détection des QR Codes préalablement disposés dans l'entrepôt se manifeste également dans son champ de vision périphérique par un signal sous la forme d'une animation lorsque l'opérateur pénètre ou non dans la bonne allée. Ensuite lors de la recherche du bon casier, un processus similaire permettra d'indiquer à l'opérateur s'il se trouve en face du casier correspondant. L'information se présente alors sous la forme d'une animation qui prend son origine à l'emplacement du QR Code détecté puis se déplace dans la périphérie du champ de vision de l'opérateur (l'emplacement exact est déterminé par le choix de l'œil directeur de l'opérateur). L'objectif étant d'attirer l'attention de l'opérateur sur un élément de son environnement sans pour autant le gêner dans sa recherche en polluant son environnement visuel et notamment la partie de son champ de vision où son acuité est maximale (environ 20° d'écartement en face de l'opérateur).

#### Mode d'affichage des informations

Les informations à délivrer à l'opérateur étant identifiées, le mode d'affichage de ces informations dépendra donc de la priorité accordée à chacune d'entre elles.

Tableau IV-5. Mode d'affichage des informations

Type d'information	Niveau de priorité	Mode d'affichage
Adresse du colis	1	Affichage permanent dans le champ de vision de l'opérateur : concision de l'affichage modulable en fonction de l'expertise de l'opérateur.
Progression de la commande	2	Présence dans le champ périphérique de l'opérateur avec un rafraichissement à chaque picking.
Emplacement de l'opérateur	2	Affichage temporaire à chaque détection sous la forme d'un symbole explicite : flèche directionnelle en cas d'erreur, point bleu de confirmation. L'affichage doit juste signaler l'erreur ponctuelle de positionnement et ne pas perturber le confort de l'opérateur. De plus, l'affichage doit être sans ambiguïté.
Détail de la commande	2	Affichage au début de la commande. L'affichage doit être clair, si possible avec une série de symboles permettant d'identifier immédiatement les items que l'on doit récolter.

### **IV.7.3 L'utilisation des QR Codes dans les entrepôts**

Nous prévoyons d'employer des QR Codes pour permettre aux lunettes de se repérer dans l'entrepôt. Pour assurer la viabilité de notre solution, il faut être sûr que les QR Codes soient repérables facilement et de façon fiable par les lunettes.

Nous avons étudié les différentes situations pouvant se présenter en entrepôt lors du travail des préparateurs, que nous avons finalement regroupé en trois situations :

- l'identification d'un préparateur
- le guidage en entrepôt
- le choix d'un produit

Il s'agissait ensuite de déterminer la taille optimale des QR Codes utilisés pour chaque situation. Pour ce faire, nous avons donc étudié la détectabilité des QR Codes en fonction de la taille, ainsi que la distance et l'angle de lecture.

Nous avons ainsi pu déterminer des lois empiriques sur la fréquence de détection, et donc donner des recommandations quant à la taille des QR Codes à utiliser pour chaque situation considérée. En l'occurrence, il vaut mieux utiliser des QR Codes d'une taille maximale pour le guidage dans l'entrepôt, des QR Codes de petite taille pour les cartes d'identification (nous préconisons un QR Code de dimension environ 200x200px) et, pour le choix d'un produit, des QR Codes aussi grands que possible (tant que ceux-ci peuvent être intégrés à l'emballage du produit).

## **IV.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous proposons une architecture à 3 couches connectée au WMS et intégrant les différentes approches proposées. Cette architecture innovante et générique, à base d'agents communicants permet d'avoir une gestion optimisée des entrepôts en aidant les opérateurs à travailler dans des meilleures conditions. Nous présentons également un protocole de négociation pour la gestion des perturbations au niveau des affectations des ressources aux différentes tâches dans l'entrepôt ainsi que les différentes techniques et technologies utilisées pour mettre en œuvre la communication au sein de notre système proposé.

Nous présentons dans le chapitre suivant, la plateforme de développement multi-agent utilisée, avant d'illustrer la pertinence de nos approches par des scénarii de simulations et les résultats obtenus.

## **CHAPITRE V. Simulations et Résultats**

## **V.1 Introduction**

L'objectif principal dans la logistique de distribution est de faire en sorte que le produit souhaité par le client soit au bon endroit, à l'heure convenue, dans la quantité attendue et au meilleur coût [128]. Le déplacement des préparateurs de commandes représente l'un des principaux leviers dans la logistique de la préparation de commandes. La réduction des temps affectés au processus de picking ou putting permet de gagner en productivité et en qualité. Notre système basé sur des agents communicants intègre la technologie de la RA à travers des lunettes connectées qui assurent le guidage de l'opérateur. En recevant un parcours de préparation de commandes optimisé dans son champ de vision, les risques d'erreur qui coûtent cher aux entrepôts sont considérablement réduits.

Dans ce dernier chapitre, nous présentons les différents résultats issus de nos approches d'optimisation, intégrées dans l'architecture proposée (§III.2). En conséquence, nous présenterons dans un premier temps la plate-forme de simulation choisie ainsi que les outils utilisés. Nous présentons par la suite les résultats de simulations appuyés par des scénarii de processus de préparations de commandes dans les entrepôts.

## **V.2 Choix de la plateforme multi-agent**

Le besoin de mettre en œuvre des systèmes à plusieurs composantes autonomes nécessite une infrastructure de logiciels utilisée comme environnement pour le déploiement et l'exécution d'un ensemble d'agents. Cette infrastructure est appelée plate-forme de développement des systèmes multi-agents.

Un langage de programmation orienté agent doit inclure une structure correspondant à un agent et fournir des mécanismes de soutien des attributs supplémentaires d'organismes tels que les croyances, les objectifs, les plans, les rôles et les normes. Une liste de plusieurs langages orientés agent peut être trouvée dans les travaux de Popirlan [129]. Les plateformes logicielles et les frameworks représentent les instruments clés dans le développement de SMA. La plupart d'entre eux fournissent un moyen pour déployer des SMA sur les différents types de matériels et systèmes d'exploitation fournissant habituellement un middleware pour soutenir leur exécution et des opérations essentielles telles que la communication et la coordination. Certains de ces plates-formes et frameworks ont le but

commun de fournir des fonctionnalités du FIPA<sup>25</sup> afin de soutenir l'interopérabilité entre les différents SMA.

Les plates-formes sont un environnement permettant de gérer le cycle de vie des agents et dans lequel les agents ont accès à certains services. Comme le choix d'une plate-forme d'agent a une grande influence sur la conception et la mise en œuvre des agents, FIPA a créé les normes d'une plate-forme agent. Ces normes existent pour assurer une conception uniforme des agents indépendamment de la plate-forme.

Parmi les plateformes multi-agents dédiées à différents modèles d'agent telles que MadKit, JADE, ZEUS, AgentBuilder, Jack, etc, nous avons choisi JADE.

La plate-forme JADE (Java Agent DEvelopment framework) est certainement celle qui est la plus utilisée par la communauté des SMA. JADE permet de développer et d'exécuter des applications distribuées basées sur le concept d'agents et d'agents mobiles. Elle est compatible à la plate-forme FIPA. JADE, présenté par Bellifemine et al.[130], est une plate-forme logicielle qui fournit des fonctionnalités de base de la couche middleware qui sont indépendantes de l'application spécifique et qui simplifient la réalisation d'applications distribuées exploitant l'abstraction d'agent logiciel défini par Wooldridge et Jennings [131]. La plate-forme peut être répartie sur un ensemble de machines et configurée à distance. La configuration du système peut évoluer dynamiquement puisque la plate-forme supporte la mobilité des agents. Un mérite significatif de JADE est qu'il met en œuvre cette abstraction sur un langage orienté objet bien connu, Java, fournissant une API simple et conviviale.

L'un des objectifs de Jade est le fait de simplifier le développement tout en assurant la conformité aux normes grâce à un ensemble complet de services. Au cours du développement du système avec JADE, les types de classes suivants sont créés et mis en œuvre [132]:

- Les classes agent décrivant les divers types d'agents.
- Les classes de l'interface utilisateur pour l'interaction avec le client.
- Les classes d'activité de l'agent pour les comportements.
- Les classes de base de données pour gérer la base de données du système.
- Les classes de communication pour gérer la négociation entre les agents.
- Les classes d'ontologies pour définir les concepts, les prédicats et les actions de l'agent.

Pour le choix de la plateforme, nous avons pris en compte les critères les plus importants :

---

<sup>25</sup> Foundation for Intelligent Physical Agents

- La possibilité d'implémenter des systèmes relativement complexes.
- La portabilité.
- La flexibilité : éviter les plates-formes qui supportent une méthodologie particulière.
- L'accélération de développement grâce à la présence suffisamment importante de briques logicielles pour pouvoir produire une application aboutie,
- Le traitement distribué et notamment la présence d'un support pour le paradigme AM
- Possibilité d'intégration des services web

### V.3 Outils et paramétrages

Chaque instance de l'environnement d'exécution JADE est appelée un conteneur (container) car elle peut contenir plusieurs agents. L'ensemble de conteneurs actifs est appelé une plate-forme. Un conteneur principal (main container) unique doit toujours être actif dans une plate-forme. L'AMS (Agent Management System) fournit le service de nommage et représente l'autorité dans la plate-forme. Le DF (Directory Facilitator) qui fournit un service de pages jaunes (Yellow Pages). À travers ces pages, un agent peut trouver d'autres agents qui fournissent les services dont il a besoin pour atteindre ses objectifs.

JADE offre des outils graphiques permettant d'apercevoir les communications et les comportements des agents.

L'interface d'administration principale est gérée par l'agent RMA (Remote Management Agent) (Figure V.1).

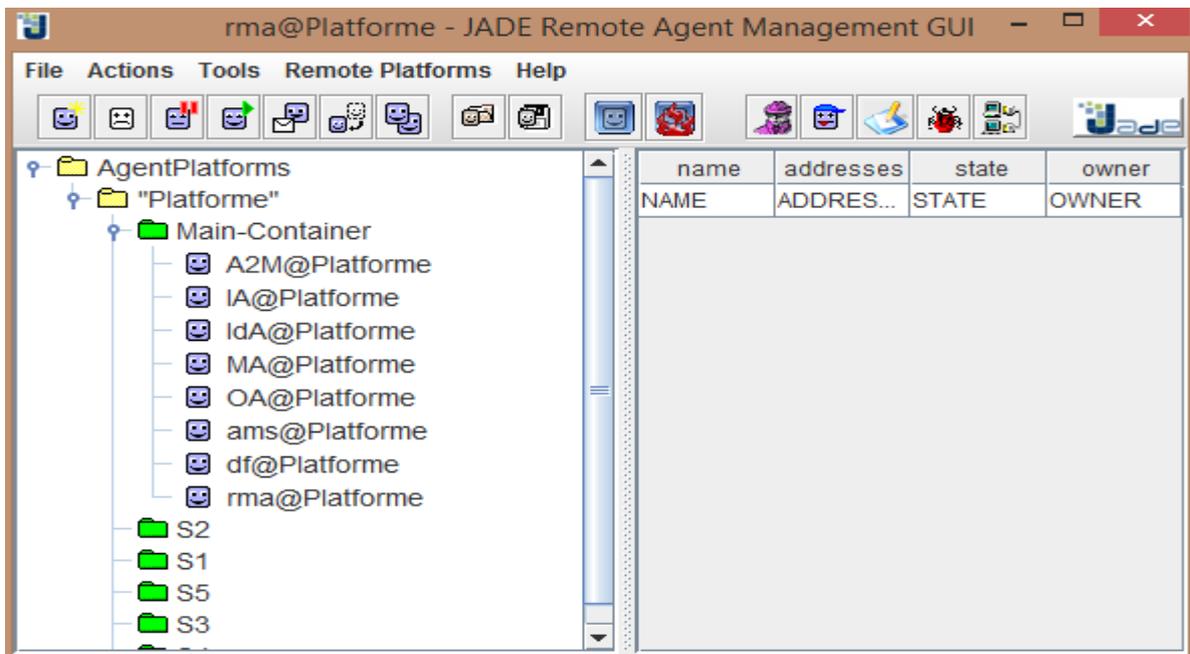


Figure V-1. Jade RMA

L'outil nommé « introspector » qui offre la possibilité de connaître dans les détails l'état de fonctionnement d'un agent permet aussi de contrôler le cycle de vie d'un agent, ses messages ACL échangés et ses comportements. Il existe un deuxième moyen de connaître l'évolution des communications inter agent : le sniffer. Ce dernier permet de suivre le cheminement des communications entre les différents agents du système. Grâce à cet outil, il est donc possible de visualiser l'enchaînement des messages, et des messages eux même. Il permet également la vérification interactive de la correction des protocoles. La figure V.2 permet d'observer l'évolution des communications des agents.

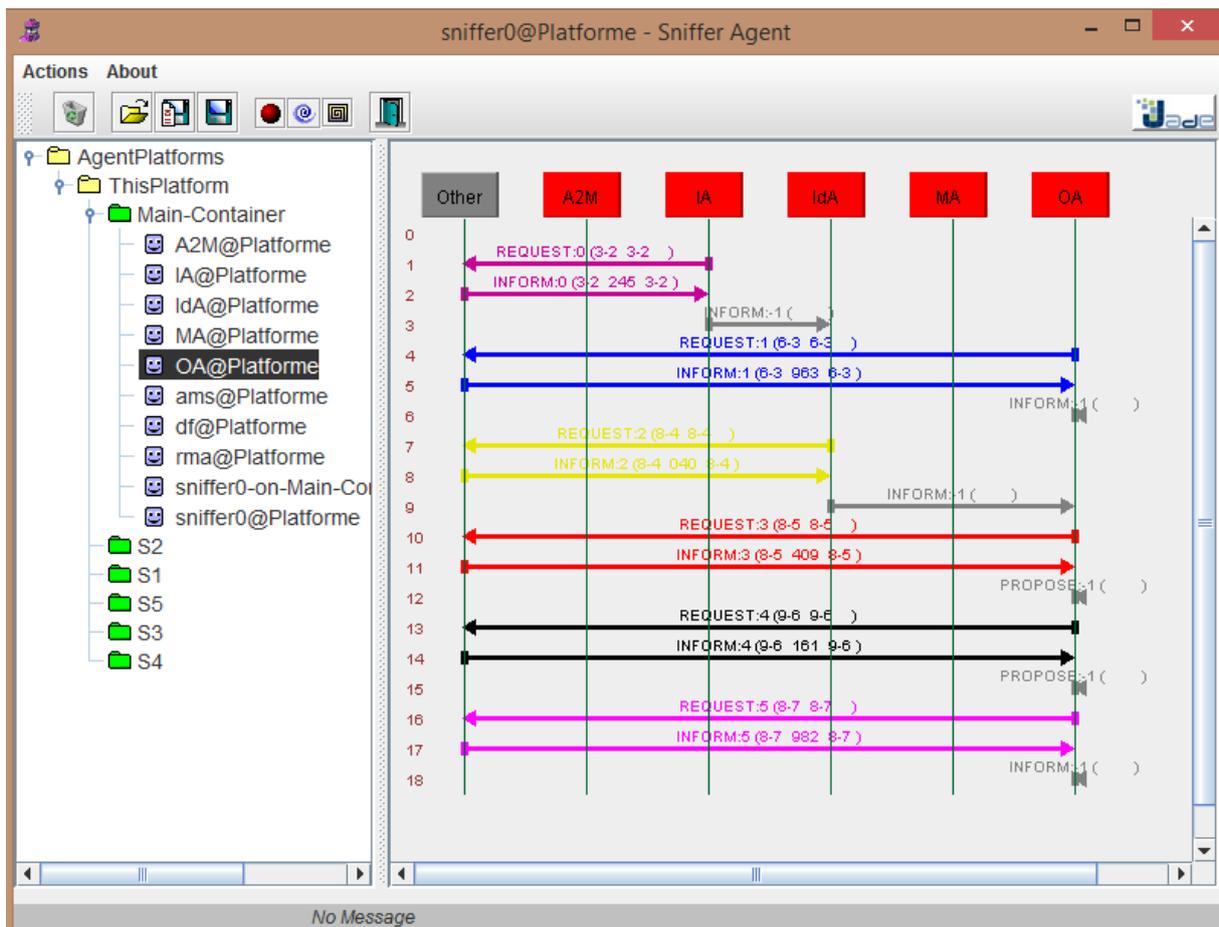


Figure V-2. Communication des agents

Afin de tester un agent indépendamment des autres, il est nécessaire de lui envoyer des messages et voir ses réponses, d'où l'utilité du Dummy Agent. Ce dernier permet la visualisation des messages ainsi que l'envoi de ces messages aux agents présents sur la plateforme et la réception de leur réponse.

Il est possible de lui configurer un message à envoyer à un agent en particulier, et de voir la réponse de celui-ci. On peut suivre l'évolution de l'activité de l'agent pendant le traitement de ce message à l'aide du Sniffer et de l'Introspector.

## V.4 Simulations et résultats

Le système AOSMA proposé dans le Chapitre III a pour but de gérer le déplacement des opérateurs dans les entrepôts. Lors d'un processus de picking ou de putting, l'opérateur exécute les commandes envoyées en suivant l'ordre des articles à déposer ou à prélever. Dans notre modèle présenté (§ III), une fois la connexion avec le WMS est établie, le processus de préparation des commandes est lancé. Les agents AI interagissent avec le WMS. Ils jouent le rôle d'interface entre les utilisateurs et le système.

Dans notre système, l'utilisateur commence tout d'abord par se connecter (Figure V.3).



Figure V-3. Interface de connexion au démonstrateur

### V.4.1 Comportement de l'agent AId

L'agent AId analyse la commande envoyée par l'agent AI en la décomposant et en vérifiant les ressources. Une ressource a un numéro, un nom, un nombre, une capacité et un type (Figure V.4 et V.5).

Ressource		TypeR	
Numero_R	Nom_R	Nombre_R	Capacite_R
+	1 R1	60	100
+	2 R2	80	100
+	3 R4	40	100
+	4 R5	40	100
+	5 R6	30	100
+	6 R7	100	100
+	7 R8	68	100
+	8 R9	78	100

Figure V-4. Table des ressources

Ressource		TypeR
Numero_T	Nom_T	Numero_R
1	Double	1
2	Double	3
3	Simple	2

Figure V-5. Table des types de ressources

L'agent AI envoie la commande suivante à l'agent Id :

[Commande, 125, 7, Article1, Article2, Article3, Article4, Article5, Article6, Article7, Simple].

Pour ce scénario, le type de la ressource affectée dépend du nombre des articles. L'agent AI vérifie s'il y a des ressources disponibles de type Simple. Il affecte une ressource à la commande. Après affectation, notre requête aura le format suivant :

[Commande, 125, 7, Article1, Article2, Article3, Article4, Article5, Article6, Article7, Simple, 80, Palette]. Palette est le nom de la ressource de type simple et 80 est le nombre de palette disponible (Figure V.6). Cette requête est envoyée à l'agent AO qui déclenche le processus d'optimisation.

```

Je suis l'agent SA, je commence maintenant, je crée l'agent Mobile A...
je suis l'agent IA, je commence maintenant..
Je suis l'agent IA, je commence maintenant..
Hallo! Identifieur-agent AI@Plateforme is ready.
J'attends la prochaine requête, mon état est Active
J'attends la prochaine requête, mon état est Active
Ma requete au niveau de MyInterface est : [Commande, 125, 7, Article1, Article2, Article3, Article4, Article5, Article6, Article7, Simple]
Commande nécessitant une ressource de type simple
Les agents identificateurs en service sont :
AI@Plateforme
Je suis l'agent Interface.La requête que je vais envoyer à l'agent Identificateur est la suivante : [Commande, 125, 7, Article1, Article2, Article3, Article4, Article5, Article6, Article7, Simple]
Je suis l'agent AI@Plateforme je reçois : requête de la part de l'agent ( agent-identifieur :name AI@Plateforme :addresses (sequence http://172.30.229.1:7778/acc http://172.30.229.1:80593/acc http://172.30.229.1:
J'attends la prochaine requête, mon état est Active
Des requêtes arrivent...
Connexion à la 80 établie..
Requete lancée
Le nombre de Ressource est :80
Le nom de la Ressource est:Palette
Le type de la ressource est :Simple
Je suis l'agent Identificateur.Ma requête après affectation de la ressource est la suivante: [Commande, 125, 7, Article1, Article2, Article3, Article4, Article5, Article6, Article7, Simple, 80, Palette]
Les agents ordonnanceurs en service sont :
SA@Plateforme
Je suis l'agent Identificateur.La requête que je vais envoyer à l'agent Optimisateur est la suivante :[Commande, 125, 7, Article1, Article2, Article3, Article4, Article5, Article6, Article7, Simple, 80, Palette]
J'attends la prochaine requête, mon état est Active
Je suis l'agent Optimisateur.La requete recue de la part de l'agent Identificateur est la suivante : [Commande, 125, 7, Article1, Article2, Article3, Article4, Article5, Article6, Article7, Simple, 80, Palette]

```

Figure V-6. Affectation d'une commande à une ressource de type simple

Dans le cas d'une commande de 21 articles. L'agent AI affecte une ressource de type Double (Figure V.7).

```

Je suis l'agent SA, je commence maintenant, je crée l'agent Mobile A...
Je suis l'agent IdA, je commence maintenant..
Je suis l'agent IA, je commence maintenant..
Hallo! Identifieur-agent AId@Plateforme is ready.
J'attends la prochaine requête, mon état est Active
J'attends la prochaine requête, mon état est Active
Nouveau MESSAGE Double
Ma requete au niveau de MyInterface est : [Commande, 125, 25, Double]
Commande nécessitant une ressource de type double
Les agents identificateurs en service sont :
AId@Plateforme
Je suis l'agent Interface.La requête que je vais envoyer à l'agent Identifieur est la suivante : [Commande, 125, 25, Double]
Je suis l'agent AId@Plateforme je reçois : requête de la part de l'agent ( agent-identifieur :name AId@Plateforme :addresses {sequence http://172.31.60.144:7777}
J'attends la prochaine requête, mon état est Active
Des requêtes arrivent...
Connexion à la BD établie..
Requete lancée
Le nombre de Ressource est :60
Le nom de la Ressource est:Chariot
Le type de la ressource est :Double
Le nombre de Ressource est :30
Le nom de la Ressource est:Matériel
Le type de la ressource est :Double
Je suis l'agent Identifieur.Ma requête après affectation de la ressource est la suivante: [Commande, 125, 25, Double, 30, Matériel]
Les agents ordonnanceurs en service sont :
SA@Plateforme
Je suis l'agent Identifieur.La requête que je vais envoyer à l'agent Optimisateur est la suivante :[Commande, 125, 25, Double, 30, Matériel]
J'attends la prochaine requête, mon état est Active
Je suis l'agent Optimisateur.La requete recue de la part de l'agent Identifieur est la suivante : [Commande, 125, 25, Double, 30, Matériel]

```

Figure V-7. Affectation d'une commande à une ressource de type double

Nous présentons dans ce qui suit les scénarios réalisés grâce au système AOSMA.

## V.4.2 Comportement de l'agent AO

### V.4.2.1 Approche exacte pour le processus de picking/putting mono-clients

L'agent AId envoie la commande affectée à l'agent AO qui se charge de l'optimisation du parcours de l'opérateur lors du processus de picking ou putting.

Les opérateurs sont localisés dans l'entrepôt grâce aux lunettes connectés. Pour ce scénario, nous avons la disposition suivante des articles et des opérateurs (Figure V.8).

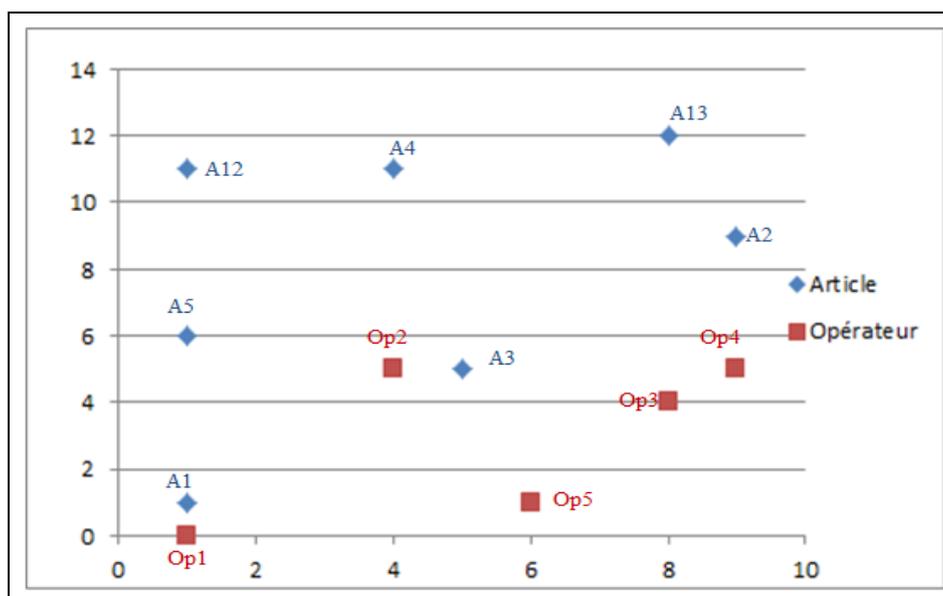


Figure V-8. Disposition des articles et des opérateurs pour un picking/putting mono-client

L'agent AO envoie un chemin de picking/putting optimisé à l'agent AM. Il cherche le meilleur opérateur en calculant les distances entre les opérateurs et les positions des articles. Ensuite, il affecte à l'agent AM le chemin plus court en appliquant l'algorithme de Dijkstra.

```

Console
<terminated> MainProgram (15) [Java Application] C:\Program Files (x86)\Java\jdk1.6.0_34\bin\javaw.exe (14 oct. 2012 09:27:52)
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 12 est 11.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 12 est 6.708204
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 12 est 6.708204
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 12 est 6.708204
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 12 est 6.708204
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 12 est 11.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 12 est 6.708204
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 12 est 6.708204
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 12 est 6.708204
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 12 est 6.708204
le meilleur operateur pour l'article d'id :12est l'opérateur d'id2 le nom de l'article estArticle6
*****
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 13 est 13.892444
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 13 est 8.062258
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 13 est 8.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 13 est 7.071068
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 13 est 7.071068
le meilleur operateur pour l'article d'id :13est l'opérateur d'id4 le nom de l'article estArticle7
*****
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 1 est 1.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 1 est 1.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 1 est 1.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 1 est 1.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 1 est 1.0
le meilleur operateur pour l'article d'id :1est l'opérateur d'id1 le nom de l'article estArticle1
*****
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 2 est 12.0415945
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 2 est 6.4031243
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 2 est 5.0990195
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 2 est 4.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 2 est 4.0
le meilleur operateur pour l'article d'id :2est l'opérateur d'id4 le nom de l'article estArticle2
*****
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 3 est 6.4031243
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 3 est 1.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 3 est 1.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 3 est 1.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 3 est 1.0
le meilleur operateur pour l'article d'id :3est l'opérateur d'id2 le nom de l'article estArticle3
*****
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 4 est 11.401754
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 4 est 6.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 4 est 6.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 4 est 6.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 4 est 6.0
le meilleur operateur pour l'article d'id :4est l'opérateur d'id2 le nom de l'article estArticle4
*****
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 5 est 6.0
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 5 est 3.1622777
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 5 est 3.1622777
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 5 est 3.1622777
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 5 est 3.1622777
le meilleur operateur pour l'article d'id :5est l'opérateur d'id2 le nom de l'article estArticle5
*****

```

Figure V-9. Résultat sur la console du choix du meilleur opérateur et meilleur article

Le meilleur opérateur est l'opérateur d'identifiant 2 (Figure V.9).

La meilleure position est celle de l'article d'identifiant 3.

Le parcours de l'opérateur Op2 est représenté par le graphe de la figure V.10.

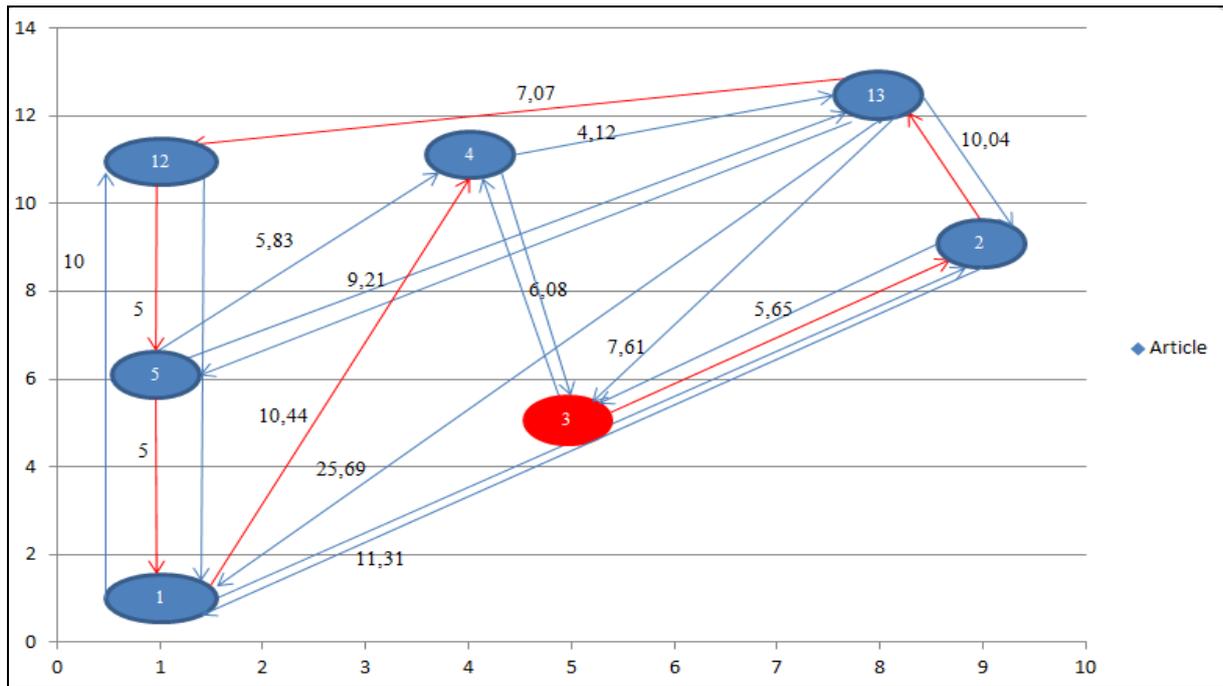


Figure V-10. Graphe pour un picking/putting mono-client

### Résultats : Mission mono-client d'un opérateur

Tableau V-1. Résultat d'affectation d'une commande mono-client à l'opérateur

Nom de l'opérateur	Opérateur2
Distance optimale entre l'opérateur 2 et l'article 3 (Km)	1
Nom du premier article	Article 3
Parcours de l'opérateur	[Article3 ==> Article2 ==> Article 13 ==> Article 12 ==> Article 5 ==> Article 1 ==> Article 4]
Distance parcourue à partir du premier article (Km)	4.179

### Comparaisons et résultats

Tableau V-2. Comparaison des résultats obtenus pour une préparation de commande mono-client

Opérateur/Article	Commande envoyée par le WMS (Km)	Commande envoyée par l'agent AO (Km)
Op2	3.923	3.292
Op1	4.260	3.782
Op3	4.363	3.859
Op4	5.825	4.179

L'histogramme de la figure V.11 représente les distances parcourues par les opérateurs. En envoyant un ordre de prélèvement/dépose optimal, l'agent AM gagne en temps et par conséquent en productivité.

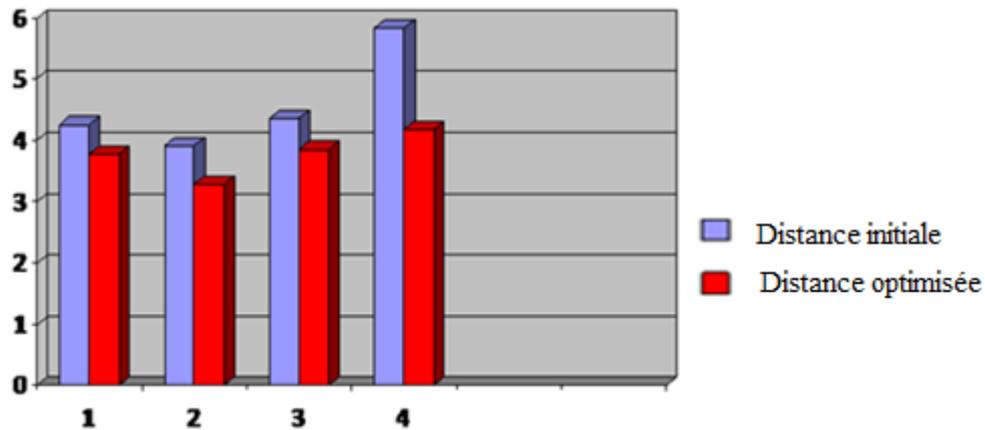


Figure V-11. Histogramme des distances de picking/putting pour un processus de picking mono-client

#### V.4.2.2 Approche évolutionnaire pour le processus de picking/putting multi-clients

L'approche évolutionnaire adoptée (§ III) pour l'affectation des missions de préparations de commandes aux opérateurs permet la sélection de la meilleure solution générée représentée par le chromosome.

Les paramètres du programme ont été ajustés comme suit :

- Taille de la population 50,
- Nombre de générations=100,
- Probabilité de croisement  $p_c=0.7$ ,
- Probabilité de mutation  $p_m=0.015$ .

L'agent AO représente le cœur logiciel du système AOSMA. Il comprend une bibliothèque d'algorithmes ayant pour objectif d'affecter des missions à l'agent AM.

Une mission est composée de plusieurs commandes. Une commande comprend plusieurs articles et chaque article possède une quantité de colis à collecter ou à déposer. L'envoi d'une commande peut être réalisé si les contraintes de capacité et de durée sont respectées.

##### Premier scénario : en début de mission

Le scénario suivant représente l'affectation de la première commande à l'opérateur. Les articles ont des emplacements fixes dans les entrepôts. En début de journée, la disposition des articles et des opérateurs est représenté sur la figure V.12. Les opérateurs se connectent au WMS et se retrouvent à une position initiale. Ils attendent l'affectation d'une commande.

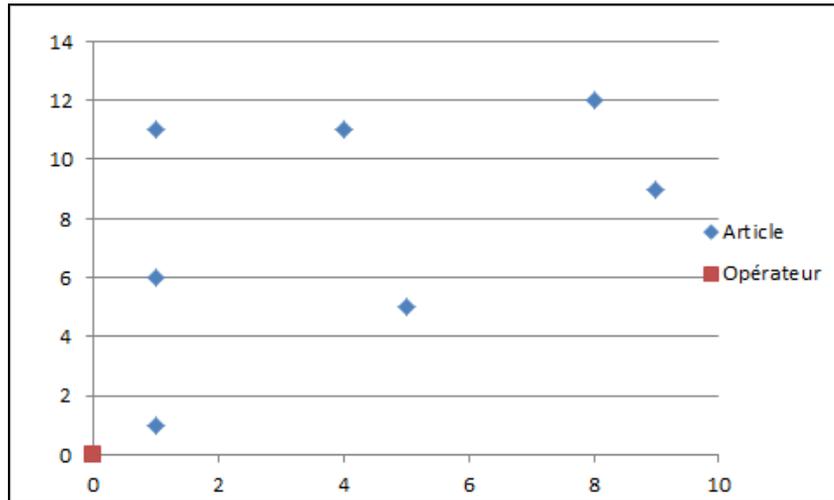


Figure V-12. Disposition des opérateurs en début de journée

Dans ce scénario, nous traitons une commande composée de 7 articles (Figure V.13).

```

Connexion à la BD établie..
Requete lancée
le nombre d'articles est: 7
Mon id : 12 d'abscisse: 1 et d'ordonnée: 11
Mon id : 13 d'abscisse: 8 et d'ordonnée: 12
Mon id : 1 d'abscisse: 1 et d'ordonnée: 1
Mon id : 2 d'abscisse: 9 et d'ordonnée: 9
Mon id : 3 d'abscisse: 5 et d'ordonnée: 5
Mon id : 4 d'abscisse: 4 et d'ordonnée: 11
Mon id : 5 d'abscisse: 1 et d'ordonnée: 6

```

Figure V-13. Affichage des emplacements des articles à partir de la table Article

L'affectation d'une commande à un opérateur se fait aléatoirement puisqu'en début de journée tous les opérateurs se trouvent dans une position initiale. Dans ce cas, nous chercherons le meilleur article avec lequel l'opérateur débutera la préparation de commandes. L'opérateur d'identifiant 5 commencera la préparation de la commande par l'article d'identifiant 1. Pour l'opérateur d'identifiant 5, le chemin de picking est calculé à partir de l'article d'identifiant 1 (Figure V.14).

```

Console
<terminated> MainProgram (15) [Java Application] C:\Program Files (x86)\Java\jdk1.6.0_34\bin\javaw.exe (15 oct. 2012 15:34:01)
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 12 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 13 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 1 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 2 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 3 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 4 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 1 et l'article d'id 5 est 1.4142135
le meilleur article pour l'opérateur d'id :1 est l'article d'id1
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 12 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 13 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 1 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 2 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 3 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 4 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 2 et l'article d'id 5 est 1.4142135
le meilleur article pour l'opérateur d'id :2 est l'article d'id1
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 12 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 13 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 1 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 2 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 3 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 4 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 3 et l'article d'id 5 est 1.4142135
le meilleur article pour l'opérateur d'id :3 est l'article d'id1
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 12 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 13 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 1 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 2 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 3 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 4 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 4 et l'article d'id 5 est 1.4142135
le meilleur article pour l'opérateur d'id :4 est l'article d'id1
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 12 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 13 est 11.045361
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 1 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 2 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 3 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 4 est 1.4142135
La distance Minimale entre l'opérateur d'id 5 et l'article d'id 5 est 1.4142135
le meilleur article pour l'opérateur d'id :5 est l'article d'id1

```

Figure V-14. Résultat sur la console pour le choix du premier article

L'ordre des articles envoyé à l'agent AM par l'agent AO est représenté par le graphe de la figure V.15.

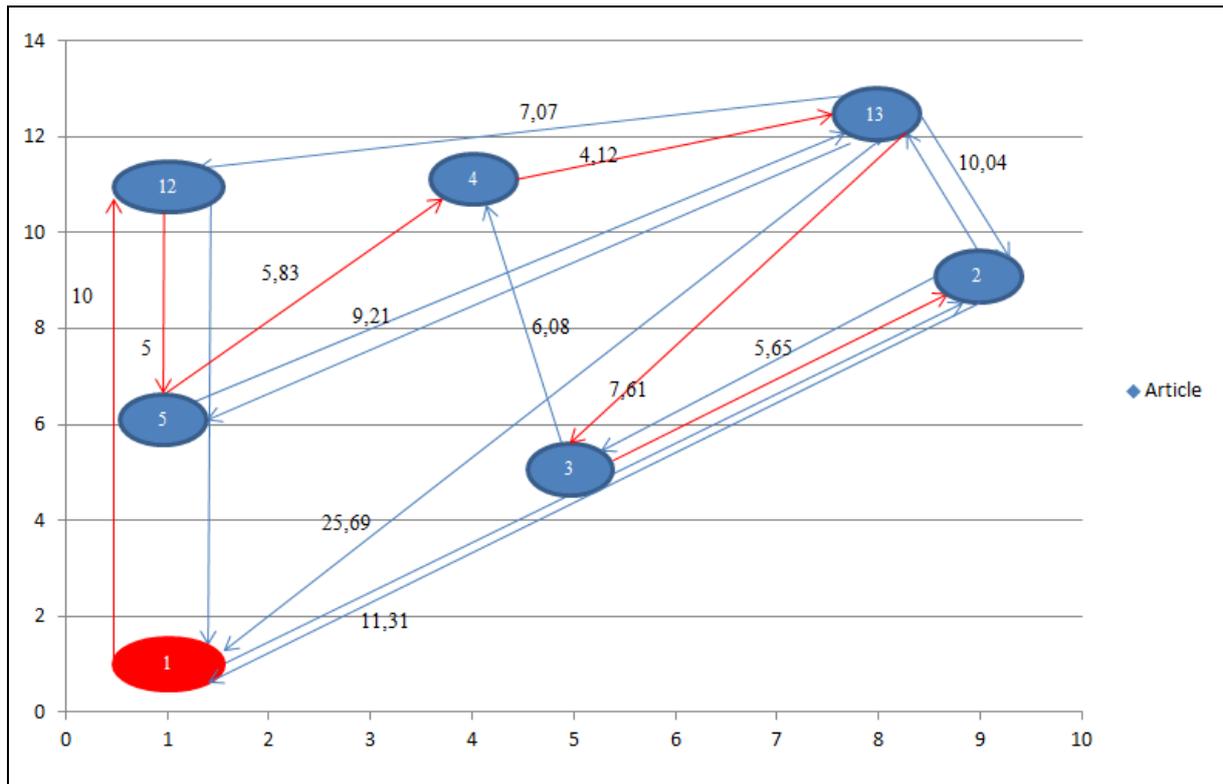


Figure V-15. Graphe pour un parcours mono-client

Le tableau suivant représente la commande affectée à l'opérateur 5.

**Tableau V-3. Commande optimisée affectée à l'opérateur**

Nom de l'opérateur	Opérateur5
Distance optimale entre l'opérateur et l'article(Km)	1.41
Nom du premier article	Article 1
Parcours de l'opérateur	[Article1 ==> Article 12 ==> Article 5 ==> Article 4 ==> Article 13 ==> Article 3 ==> Article 2]
Distance parcourue à partir du premier article (Km)	3.821

Deuxième scénario : Affectation des missions aux opérateurs

Une commande est composée d'un nom, d'un numéro, d'un nombre d'articles, d'une capacité approximatif et d'une durée estimée (Figure V.16). L'agent AId envoie la commande affectée à une ressource à l'agent AO afin de lancer le processus de picking/putting.

Commande				
Numero_C	Nom_C	Capacite_C	Nombre_A	Duree_C
2	C1	30	6	15
3	C2	30	6	15
4	C3	30	6	15
5	C4	60	16	30
6	C5	50	10	25
9	C8	10	4	10
10	C9	40	8	20
11	C10	10	4	10
14	C13	60	16	30

Figure V-16. Table des commandes

La figure V.17 représente l'emplacement des articles des commandes dans l'entrepôt.

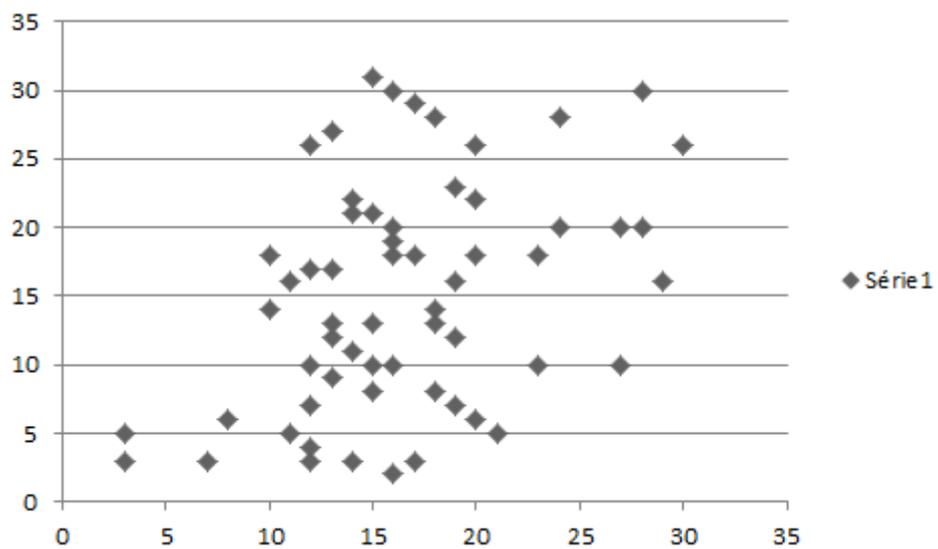


Figure V-17. Disposition des articles dans l'entrepôt

**Pour l'opérateur 1:** Affectation d'une mission de 3 commandes (Figure V.18)

- la commande C5 contenant 10 articles
- La commande C3 contenant 6 articles
- La commande C8 contenant 4 articles

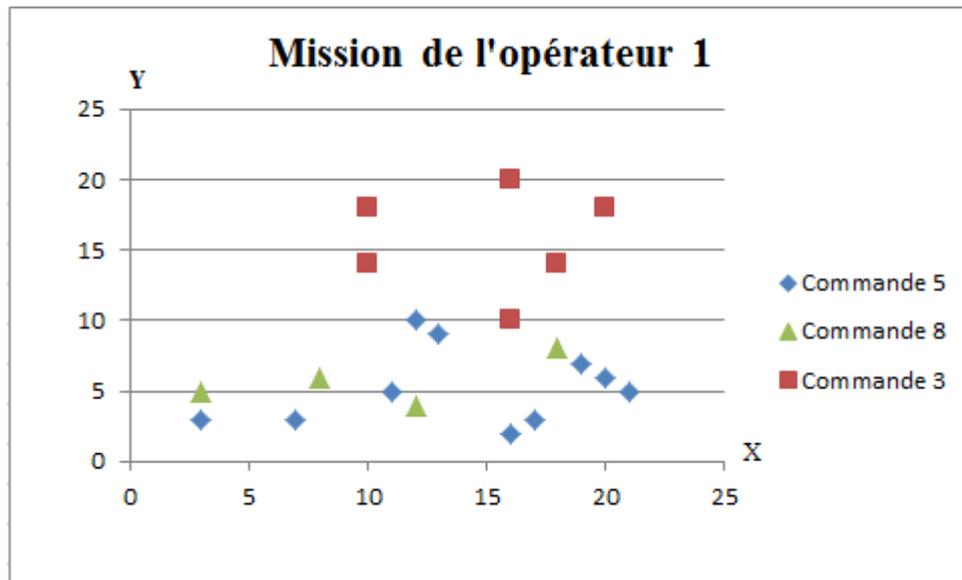


Figure V-18. Emplacement des articles dans l'entrepôt pour la mission de l'opérateur 1

Nous remarquons le respect des contraintes (Figure V.16). En effet, la capacité des 3 commandes affectées ainsi que leurs durées sont inférieurs respectivement à la capacité de la ressource et à la durée estimée d'une mission.

Le chemin de picking/ putting optimisé pour l'opérateur 1 est présenté dans la figure V.19.

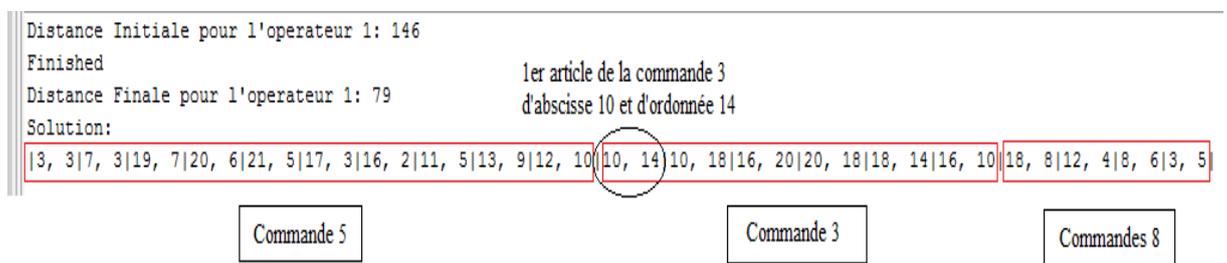


Figure V-19. Parcours de préparation de commandes pour l'opérateur 1

**Pour l'opérateur 2** : Affectation d'une mission de 3 commandes (Figure V.20)

- la commande C9 contenant 8 articles
- La commande C2 contenant 6 articles
- La commande C1 contenant 6 articles

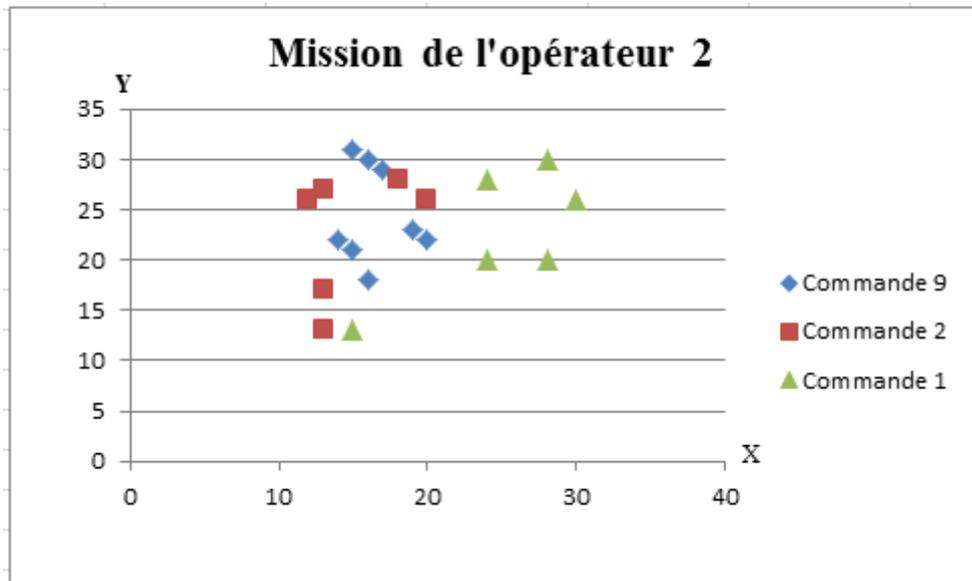


Figure V-20. Emplacement des articles dans l'entrepôt pour la mission de l'opérateur 2

Le chemin de picking/ putting optimisé pour l'opérateur 2 est présenté dans la figure V.21.

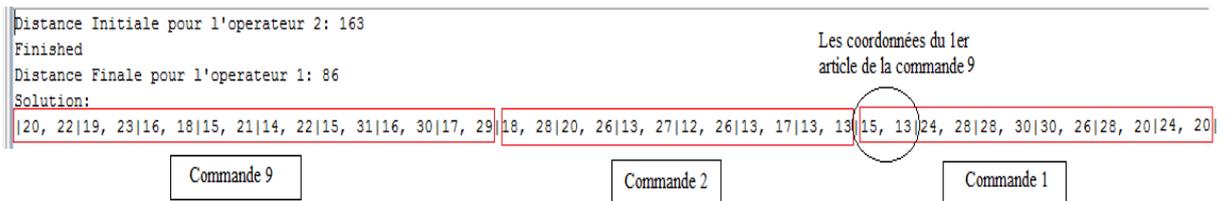


Figure V-21. Parcours de préparation de commandes pour l'opérateur 2

**Pour l'opérateur 3:** Affectation d'une mission de 3 commandes (Figure V.22)

- la commande C13 contenant 16 articles
- La commande C10 contenant 4 articles

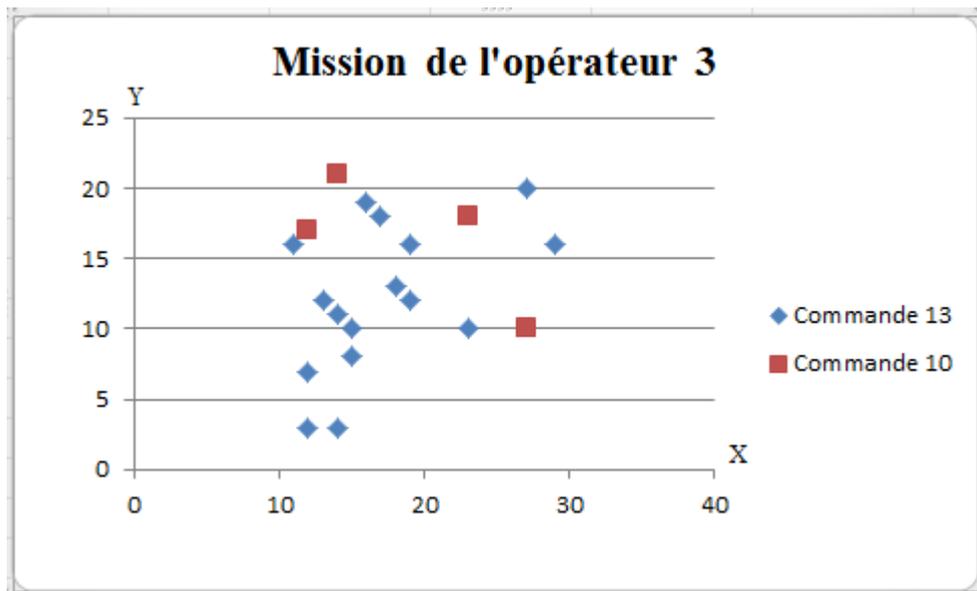


Figure V-22. Emplacement des articles dans l'entrepôt pour la mission de l'opérateur 3

Le chemin de picking/ putting optimisé pour l'opérateur 3 est présenté dans la figure V.23.

```

Distance Initiale pour l'operateur 3: 156
Finished
Distance Finale pour l'operateur 1: 88
Solution:
|11, 16|14, 11|12, 7|14, 3|12, 3|15, 8|15, 10|13, 12|16, 19|17, 18|19, 16|27, 20|29, 16|18, 13|19, 12|23, 10|27, 10|23, 18|14, 21|12, 17|

```

Commande 13

Commande 10

Figure V-23. Parcours de préparation de commandes pour l'opérateur 3

L'agent AO élabore des chemins de préparation des commandes au profit des agents AM grâce à l'intégration d'algorithmes d'optimisation dans son comportement. Nous remarquons dans la figure V.24 la grande différence entre la distance d'une mission affectée aléatoirement à l'opérateur et une distance optimisée qui a pour objectif de réduire la durée de la préparation de commandes. En réduisant la distance parcourue par les préparateurs de commandes lors de leurs missions, l'entrepôt gagne en productivité.

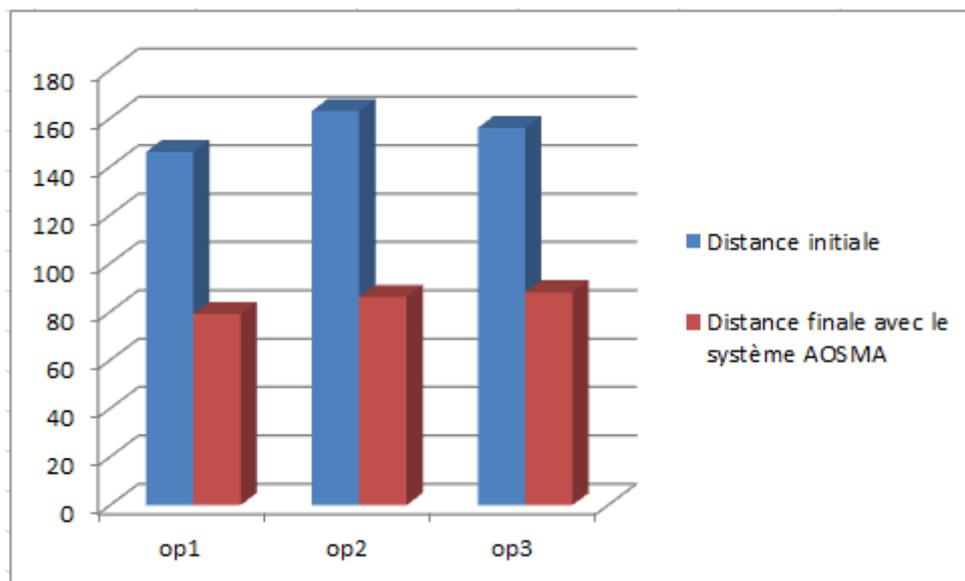


Figure V-24. Histogramme des distances de picking/putting pour un processus de picking multi-client

L'agent AO a pour objectif d'optimiser les missions des opérateurs en utilisant les algorithmes d'optimisation proposés dans le chapitre III. Il envoie des missions à l'agent AM. Ce dernier reçoit le parcours optimisé et voit s'afficher dans leur champ de vision les informations et les flèches nécessaires pour les guider dans l'entrepôt. Les lunettes à RA ou le « pick-by-vision » assurent une préparation de commandes sans erreur et avec un gain en temps et en productivité.

### V.4.3 Comportement de l'agent AM: Processus de picking avec RA

Les lunettes à RA ou le « pick-by-vision » assurent une préparation de commandes sans erreur et avec un gain en temps et en productivité.

Nous présentons donc dans ce paragraphe les scénarios réalisés par l'application RASL (§ III). Les agents AM, munis de lunettes à RA, ont pour mission de parcourir l'entrepôt afin de collecter ou déposer les produits selon le mode de la préparation de commandes. Ces agents représentent les opérateurs dans l'entrepôt. Ils reçoivent le parcours optimisé par l'agent AO et voient s'afficher dans leur champ de vision les informations et les flèches nécessaires pour les guider dans l'entrepôt. Les lunettes à RA assurent le pilotage de la solution proposée par l'agent AO.

#### V.4.3.1 Architecture générale de RASL

Le système que nous proposons repose sur l'interaction des trois modules suivants (Figure V.25):

- Le client (les lunettes) représente l'interface avec l'opérateur. Il affiche les informations sur la commande, les produits à récupérer et les instructions de guidage. Le client permet également à l'opérateur de valider la commande, de demander une nouvelle commande et de s'authentifier.
- Le serveur permet l'interfaçage client/WMS. Il transmet et traduit les messages du WMS au client et inversement. Il permet en particulier de transmettre les commandes envoyées par le WMS aux lunettes après la demande d'une nouvelle commande de celles-ci. Il transmet également le message de validation à la fin de la commande au WMS.
- Le WMS s'occupe de l'envoi des commandes.

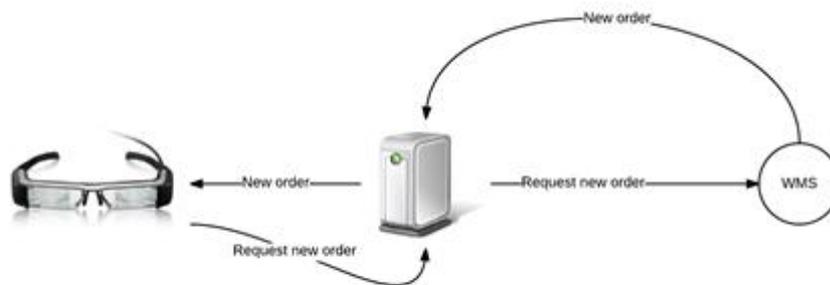


Figure V-25. Architecture du système RASL

#### V.4.3.2 Communication du système avec le WMS

La communication avec le WMS est assurée par le serveur. Il s'agit d'un serveur Java qui est le même pour l'ensemble des programmes proposés. Il est indépendant du client utilisé. Comme il a été précisé précédemment, le serveur s'occupe de l'interface entre le client et le WMS. Les messages du WMS respectent un protocole. Le serveur transforme ces messages

reçus en messages compréhensibles par le client. Le serveur est développé en Java pour des raisons de portabilité: permettre l'installation du serveur sur un grand nombre de systèmes

### V.4.3.3 Les prototypes de RASL

Les prototypes consistent en un serveur Java servant d'interface avec le WMS et plusieurs versions de programmes selon les lunettes et les scénarios implémentés.

#### V.4.3.3.1 Le serveur RASL

Afin que les différentes applications puissent communiquer avec le WMS de Generix, un serveur a été développé. Il reçoit les commandes du WMS, mais également des informations envoyées par les applications à RA telles que l'identification des employés ou la validation des différentes prises de l'opérateur.

Si les lunettes à RA utilisées sont celles d'Epson, il faut au préalable lancer le hotspot<sup>26</sup> wifi pour réaliser la communication sans fil.

Pour cela des scripts ont été créés pour automatiser le lancement du hotspot. L'utilisateur doit les lancer avec les droits administrateur dans l'ordre suivant :

1. « Installation HotSpot Wifi.bat »
2. « Démarrage HotSpot Wifi.bat »

Le script « Arrêt HotSpot Wifi.bat » permet d'arrêter le Hotspot.

Lors du lancement du serveur la fenêtre suivante apparaît (Figure V.26) :

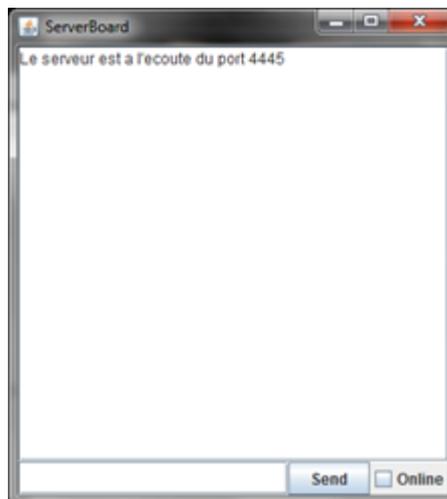


Figure V-26. Lancement du serveur

---

<sup>26</sup> Un hotspot donne accès à un réseau sans fil qui permet aux utilisateurs de terminaux mobiles de se connecter à Internet.

Lorsque l'application utilisée est basée sur les lunettes de Laster (§ V.4.3.3.2.), ou sur les lunettes d'Espon (§ V.4.3.3.3.) et si un opérateur s'identifie, le serveur lui envoie immédiatement une commande (Figure V.27).

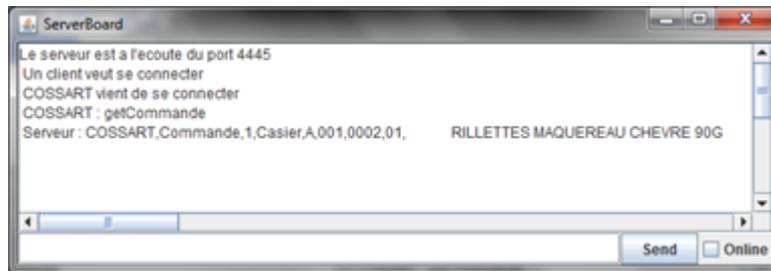


Figure V-27. Envoie d'une commande

L'opérateur va alors devoir se diriger vers la position indiquée, ici le casier 1 – 2 – 1 (Allée 1, Étage 2, Casier 1), prendre le produit puis valider sa prise. Cette information va alors être envoyée au serveur qui indique sa réception par le message pickFinish 0 (Figure V.28).

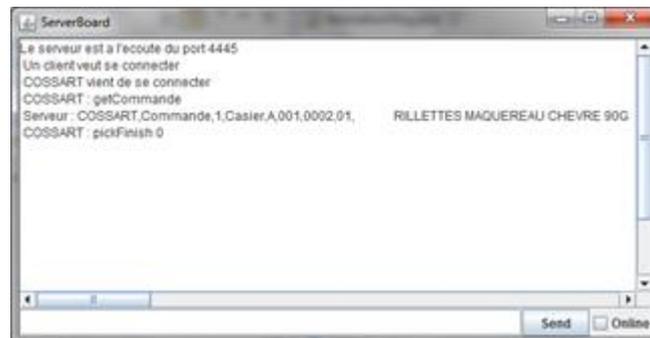


Figure V-28. Opération de picking

Plusieurs opérateurs peuvent se connecter simultanément sur le même serveur (Figure V.29).

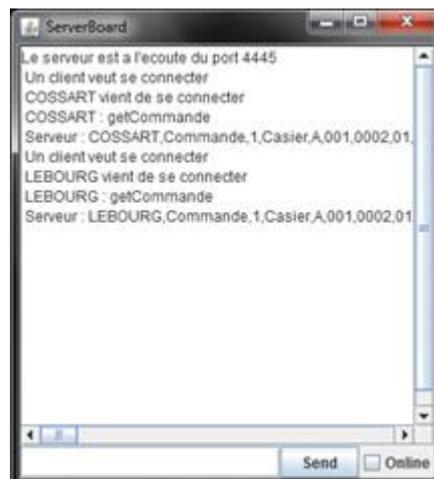


Figure V-29. Plusieurs utilisateurs connectés au serveur

#### V.4.3.3.2 Scénario de préparation de commandes avec les lunettes de Laster

Cette application est conçue pour un scénario de préparation de commande, et fonctionne avec les lunettes à RA de Laster Technologies. Nous avons réalisé une application indépendante du SDK de Laster. Il s'agit d'un programme entièrement codé en langage Java. Une fois que le serveur démarre, notre système RASL peut directement recevoir les commandes. Les articles de la commande envoyés par l'agent AO sont alors indiqués les uns après les autres dans un ordre optimisé. L'opérateur commence par s'authentifier à l'aide d'un QR Code utilisateur (Figure V.30). Les paramètres de l'utilisateur sont alors affichés pendant une courte durée.



Figure V-30. Identification de l'opérateur

Pour guider le préparateur dans l'entrepôt, la caméra des lunettes détecte les QR Codes des casiers. À chaque détection, une flèche est affichée. Voici les significations des différentes flèches :

- Flèche verte : Opérateur dans la bonne allée (Figure V.31).
- Flèche rouge : Opérateur qui n'est pas dans la bonne allée (Figure V.31).
- Tilde vert : Opérateur devant le bon casier.
- Flèche verte haut : le casier objectif se situe dans un étage supérieur.
- Flèche verte bas : le casier objectif se situe dans un étage inférieur.
- Flèche verte gauche : le casier objectif se situe sur votre gauche.
- Flèche verte droite : le casier objectif se situe sur votre droite.
- Flèche rouge haut : le casier objectif se situe dans l'allée suivante.
- Flèche rouge bas : le casier objectif se situe dans l'allée précédente.



Figure V-31. Les flèches guidant l'opérateur lors de sa mission de picking

Lorsque l'opérateur atteint le casier voulu, un tilde vert s'affiche sur les lunettes (Figure V.32). Pour valider la prise du produit, il faut cliquer sur la touche « Entrée ». La commande passe alors au produit suivant.

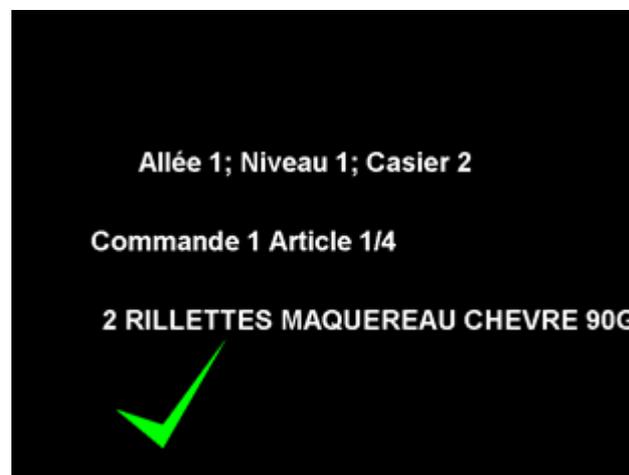


Figure V-32. Détection du bon casier pour la prise du produit

#### **V.4.3.3.3 Scénario de préparation de commandes avec les lunettes d'Epson**

Cette application est conçue pour un scénario de préparation de commande et fonctionne avec les lunettes à RA de la marque EPSON. Une fois la commande reçue, les articles à collecter ou à déposer sont indiqués les uns après les autres dans l'ordre optimisé envoyé par l'agent AO.

L'agent AM est alors dirigé dans l'entrepôt grâce à l'affichage de flèches sur les lunettes à RA, jusqu'à ce qu'il atteigne la position voulue, qui est désignée par un tilde.

Toutes les commandes sont directement reçues par le serveur, qui doit donc être préalablement allumé. Cette application communique alors avec le WMS, et est donc parfaitement applicable en entrepôt. Le préparateur doit alors s'authentifier à l'aide d'un QR Code utilisateur (Figure V.33). Le programme lui affiche les paramètres une fois l'identification effectuée. C'est ce que l'on peut voir sur ces imprimés écrans pris directement

sur les lunettes. On peut remarquer que le fond est noir, en effet cette couleur apparaît transparente pour l'opérateur.

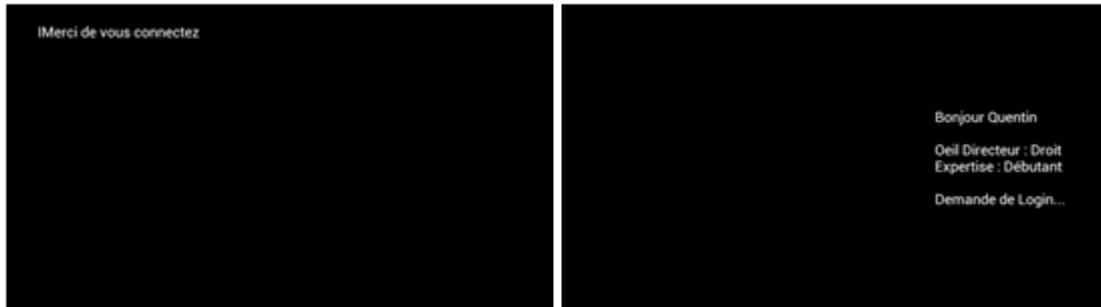


Figure V-33. Identification de l'opérateur

Afin de demander une nouvelle commande, il faut appuyer sur le touchpad jusqu'à ce que s'affiche un menu et cliquer sur « Demander une nouvelle commande » (Figure V.34).

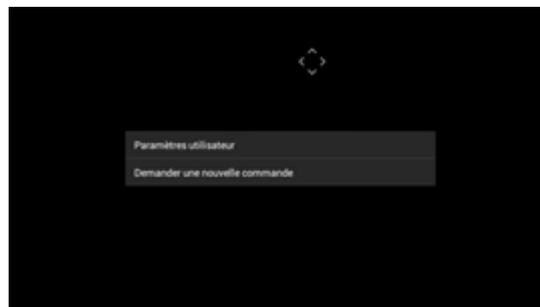


Figure V-34. Menu

Une fois la commande reçue, il est demandé de prendre un premier produit. Pour guider le préparateur dans l'entrepôt, la caméra des lunettes détecte les QR Codes casiers. À chaque détection, une flèche est affichée. Leurs significations sont identiques à celle du programme réalisé par les lunettes de Laster (§ V.4.3.3.2.) (Figure V.35).

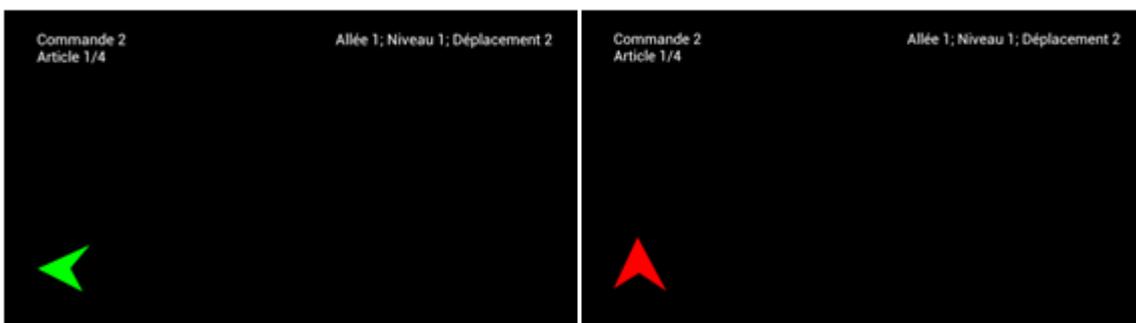


Figure V-35. Affichage des flèches pour le parcours de picking

Lorsque le préparateur atteint le casier voulu, un tilde vert s'affiche sur les lunettes (Figure V.36). Pour valider le picking, il suffit alors d'appuyer brièvement sur le touchpad. Puis, la commande passe au produit suivant.



Figure V-36. Validation du picking

Les deux programmes précédents permettent une alternative au système vocal en apportant les mêmes informations à l'opérateur. Notre objectif est de fournir toujours davantage d'informations à l'opérateur en utilisant les possibilités de la RA. Pour diminuer les erreurs lors de la préparation des commandes, nous avons eu l'idée de rajouter l'image du produit à prendre ou à poser dans la palette. L'opérateur est ainsi sûr de prendre le bon produit.

#### V.4.3.3.4 Scénario de préparation de commandes avec affichage de les images des produits

Cette application a pour but d'apporter plus d'informations concernant les articles de la commande afin de réduire les erreurs de picking ou putting. Lorsque l'opérateur se situe en face d'un casier faisant partie des objectifs de la commande, l'image du produit à prendre ou à poser s'affiche avec la quantité (Figure V.37).

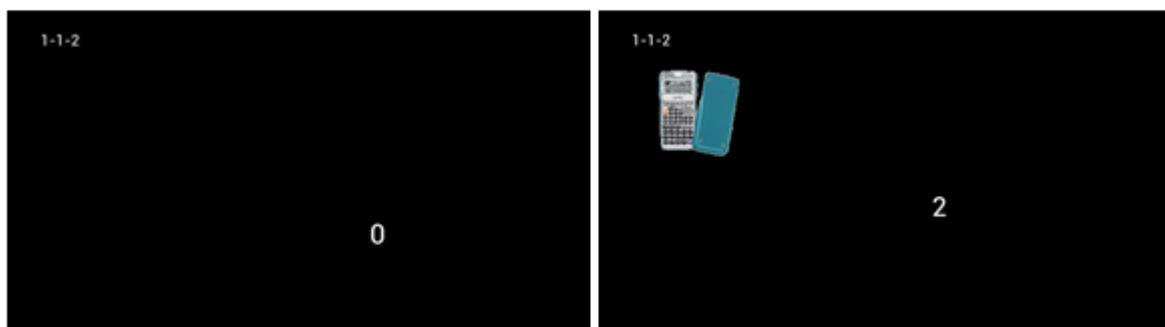


Figure V-37. Affichage de l'image du produit et de la quantité

L'application indique l'adresse de l'objectif. Nous avons choisi dans cette application de retirer la flèche et revenir à un système d'affichage d'adresse pour limiter le nombre d'informations dans le champ de vision de l'opérateur.

Cette application est utilisable en entrepôt comme les deux premières car elle peut communiquer avec le serveur et donc avec le WMS. L'opérateur doit donc s'authentifier à l'aide d'un QR Code contenant ses informations avant de commencer son travail.

Une fois authentifié, il peut demander une nouvelle commande au WMS.

#### V.4.3.4 Générateur de QR Codes

Le Générateur de QR Codes permet de générer rapidement et facilement un grand nombre de QR Codes adaptés à l'ensemble de nos programmes. Pour faciliter sa portabilité, le logiciel a été développé en Java. Ce programme génère des QR codes casiers et des QR Codes utilisateurs. Les QR codes casiers représentent chacun un casier et les QR codes utilisateurs permettent aux opérateurs de s'authentifier. Le générateur de QR Codes a été conçu pour permettre l'utilisation de notre système en entrepôt. En renseignant simplement le nombre d'allées, d'étages maximum par allée et de casiers maximum par étage, le logiciel génère l'ensemble des QR codes nécessaires (Figure V.38).



Figure V-38. Générateur de QR Codes

Il permet également à partir d'un fichier texte respectant le bon format de créer les QR Codes utilisateurs servant d'authentification.

#### ZXing est la librairie utilisée

ZXing est le diminutif de Zebra Crossing (§ I). Il s'agit d'un projet Open Source proposé par Google mettant à disposition les outils nécessaires à la lecture de différents formats de code-barre 1D et 2D (tels que les QR Code) pour différents langages de développement.



Figure V-39. Zebra Crossing

## **V.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons montré le fonctionnement des approches d'optimisation adoptées dans les entrepôts. Nous avons commencé par présenter le fonctionnement général du notre système. Ensuite, nous avons présenté plusieurs simulations pour évaluer la performance de notre système pour la gestion des entrepôts. Les différents scénarii ont prouvé que notre approche a amélioré le travail des opérateurs lors de la préparation de commandes. Ce qui permettra de gagner en productivité et en efficacité. Le système AOSMA permet certainement d'aider les opérateurs en leur affectant des missions de préparation de commandes et en les guidant tout au long de leur travail par des informations affichées dans leur champ de vision.

## Conclusion générale

La logistique de distribution consiste en l'organisation de la mise à disposition d'un produit ou d'un service. La distribution est reconnue comme étant une fonction stratégique qui, gérée de manière efficace, est une source tant de productivité - maîtrise des coûts - que de différenciation - qualité et rapidité de la réponse à la demande des utilisateurs. Les choix effectués dans le domaine logistique, en raison de leur impact direct sur le couple prix/service, sont décisifs pour les distributeurs.

De nos jours, optimiser est reconnu comme étant le mot-clé dans l'industrie. C'est un concept nécessaire pour assurer un certain contrôle des coûts associés à une augmentation de la demande et ainsi éviter une montée en spirale.

Dans ces travaux de recherche, nous avons proposé un Système d'Aide à la Décision (SAD) qui se base sur une alliance entre l'optimisation et les Systèmes Multi-Agent. Nous avons apporté dans le cadre de cette thèse des solutions basées sur une approche de modélisation, optimisation et simulation orientée agents dans un contexte de gestion des entrepôts, plus précisément, dans le processus de préparation de commandes.

L'architecture, ouverte et dynamique, proposée est composée de sociétés d'agents dont les cycles de vies dépendent de l'utilisation du système, c'est-à-dire que la raison d'être même de ces agents au sein du système dépend catégoriquement de son utilisation, ce qui réduit considérablement la consommation des ressources. Nous avons choisi de nous baser sur l'approche multi-agent car cette approche permet de décomposer un système complexe en un ensemble d'entités autonomes en interaction avec des comportements différents, ce qui répond parfaitement à notre problématique.

Le système innovant proposé intègre la technologie de la Réalité Augmentée à travers des lunettes connectées pour assurer le bon déroulement du processus de préparation de commandes. En effet, l'intégration d'un nouveau mode d'interfaçage homme/technologie a pour but d'assurer le pilotage et le guidage de l'opérateur et de réduire les erreurs de picking ou putting.

Les expérimentations réalisées sur la base de notre système, ont donné lieu à des propositions et à des réflexions. Il s'agit aussi bien d'aspect théorique ou technique de notre approche que des perspectives d'amélioration et d'extension.

Cette thèse présente plusieurs perspectives scientifiques et techniques :

- Mettre en œuvre des mécanismes d'anticipation pour la gestion des manquants afin de prévoir, détecter et éviter les situations non désirables.

- Renforcer la gestion des ressources et le rangement des articles dans la palette en adaptant le problème de sac à dos aux entrepôts.
- Améliorer l'interaction des lunettes à Réalité Augmentée avec le système.

## Références

- [1] E. Adam, “Modèle d’organisation multi-agent pour l’aide au travail coopératif dans les processus d’entreprise: application aux systèmes administratifs complexes.,” Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2000.
- [2] D. Tixier, H. Mathe, and J. Colin, *La logistique d’entreprise : Vers un management plus compétitif*, Édition : 2e. Paris: Dunod, 1998.
- [3] P. Lacomme, “Méthodes exactes et approchées pour l’optimisation des systèmes à moyen de transport. Habilitation à diriger des recherches,” Université Blaise Pascal Limos CNRS UMR 6158, 2005.
- [4] K. Rota, “Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources. Application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique.,” L’Ecole nationale supérieure de l’aéronautique et de l’espace, 1998.
- [5] H. Lee and C. Billington, “Material management in decentralized supply chains,” Oct-1993.
- [6] R. L. Harper, “Warehouse Technology in the Supply Chain Management Systems,” 2010.
- [7] K. Moeller, “Increasing warehouse order picking performance by sequence optimization,” *Procedia Soc. Behav. Sci.* 20, pp. 177–185, 2011.
- [8] J. A. Tompkins, J. A. White, Y. A. Bozer, and J. M. A. Tanchoco, *Facilities Planning*, Édition : 4th Edition. Hoboken, NJ; Chichester: John Wiley & Sons, 2010.
- [9] A. Fernandez, *Les nouveaux tableaux de bord des managers : Le projet Business Intelligence clés en main*, 6e édition. Eyrolles, 2013.
- [10] R. Reif and D. Walch, “Augmented & Virtual Reality applications in the field of logistics,” *Vis. Comput.*, vol. 24, no. 11, pp. 987–994, Aug. 2008.
- [11] B. Schwerdtfeger and G. Klinker, “Supporting order picking with Augmented Reality,” in *7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2008. ISMAR 2008*, 2008, pp. 91–94.
- [12] Le pôle interministériel de prospective et d’anticipation des mutations économiques (PIPAME) and Items international, “L’impact des technologies de l’information sur la logistique,” Nov. 2009.
- [13] D. M. Lambert, J. R. Stock, and L. M. Ellram, *Fundamentals of Logistics*, International edition edition. Boston: McGraw-Hill Publishing Co., 1998.
- [14] R. de Koster, T. Le-Duc, and K. J. Roodbergen, “Design and control of warehouse order picking: A literature review,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 182, no. 2, pp. 481–501, Oct. 2007.
- [15] M. B. M. D. Koster, E. S. V. der Poort, and M. Wolters, “Efficient orderbatching methods in warehouses,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 37, no. 7, pp. 1479–1504, May 1999.
- [16] E. Frazelle, *World-Class Warehousing and Material Handling*. New York: McGraw-Hill Professional, 2001.
- [17] S. Henn, S. Koch, and G. Wäscher, “Order Batching in Order Picking Warehouses: A Survey of Solution Approaches,” in *Warehousing in the Global Supply Chain*, R. Manzini, Ed. Springer London, 2012, pp. 105–137.
- [18] S. Henn, “Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 11, pp. 2549–2563, Nov. 2012.
- [19] G. Wäscher, “Order Picking: A Survey of Planning Problems and Methods,” in *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, P. D. H. Dyckhoff, P. D. R. Lackes, and P. D. J. Reese, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2004, pp. 323–347.
- [20] F. Dallari, G. Marchet, and M. Melacini, “Design of order picking system,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 42, no. 1–2, pp. 1–12, Jun. 2008.

- [21] F. Caron, G. Marchet, and A. Perego, "Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 713–732, Mar. 1998.
- [22] I. Harris, Y. Wang, and H. Wang, "ICT in multimodal transport and technological trends: Unleashing potential for the future," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 159, pp. 88–103, Jan. 2015.
- [23] L. Gonzalez, "Vers une utilisation de la technologie," *SUPPLY CHAIN MAGAZINE*, Mar. 2008.
- [24] R. J. Orr and G. D. Abowd, "The Smart Floor: A Mechanism for Natural User Identification and Tracking," College of Computing and GVU Center Georgia Institute of Technology, 1999.
- [25] "ciscomag\_3\_dossier\_geolocalisation\_par\_wifi.pdf."
- [26] P. Sutheebanjard and W. Premchaiswadi, "QR-code generator," in *Knowledge Engineering, 2010 8th International Conference on ICT and*, 2010, pp. 89–92.
- [27] Y. Liu, J. Yang, and M. Liu, "Recognition of QR Code with mobile phones," in *Control and Decision Conference, 2008. CCDC 2008. Chinese*, 2008, pp. 203–206.
- [28] K. Ruan and H. Jeong, "An Augmented Reality System Using Qr Code as Marker in Android Smartphone," in *2012 Spring Congress on Engineering and Technology (S-CET)*, 2012, pp. 1–3.
- [29] R. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 6 4 355-385, Aug. 1997.
- [30] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishini, "AUGMENTED REALITY: A CLASS OF DISPLAYS ON THE REALITY-VIRTUALITY CONTINUUM," *SPIE Vol. 2351, Telem manipulator and Telepresence Technologies*, 1994.
- [31] H. Kato, M. Billinghurst, and I. Poupyrev, "ARToolkit User Manual, Version 2.33," Human Interface Technology Laboratory University of Washington, 2000.
- [32] J. GOBERT and N. RENOUS, "Réalité Augmentée à l'Ensicaen," ENSICAEN, 2010 2009.
- [33] I. Sutherland, "A HEAD-MOUNTED THREE-DIMENSIONAL DISPLAY\*."
- [34] *Artificial Reality 2*, 2 edition. Reading, Mass.: Addison-Wesley Professional, 1991.
- [35] S. Feiner, B. MacIntyre, T. Hollerer, and A. Webster, "A touring machine: prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment," in *First International Symposium on Wearable Computers, 1997. Digest of Papers*, 1997, pp. 74–81.
- [36] M. Skaff, "F-35 Lightning II Cockpit Vision," SAE International, Oct. 2010.
- [37] H. Glockner, K. Jannek, J. Mahn, and B. Theis, "Augmented Reality in logistics. Changing the way we see logistics- a DHL perspective," 2014.
- [38] J. Drury, *Towards More Efficient Order Picking*. Institute of Logistics, 1988.
- [39] B. Schwerdtfeger, *Pick-by-Vision: Bringing HMD-Based Augmented Reality into the Warehouse*. Logos Verlag Berlin GmbH, 2012.
- [40] I. Van Nieuwenhuysse and R. B. M. de Koster, "Evaluating order throughput time in 2-block warehouses with time window batching," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 121, no. 2, pp. 654–664, Oct. 2009.
- [41] A. Cirulis and E. Ginters, "Augmented Reality in Logistics," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 26, pp. 14–20, 2013.
- [42] K. says, "Google Glass, Augmented Reality, and the Warehouse," *Logistics Viewpoints: A Blog for Logistics, Supply Chain, and 3PL Executives*. [Online]. Available: <http://logisticsviewpoints.com/2013/02/11/google-glass-augmented-reality-and-the-warehouse/>. [Accessed: 19-Jun-2015].

- [43] L. Nouvelle, “Les préparateurs entrent dans la réalité augmentée,” *usinenouvelle.com*, 02-Jul-2009. [Online]. Available: <http://www.usinenouvelle.com/article/les-preparateurs-entrent-dans-la-realite-augmentee.N115388>. [Accessed: 19-Jun-2015].
- [44] *UML. Le guide de l'utilisateur - Ivar Jacobson, James Rumbaugh, Grady Booch.* .
- [45] B. Fontan, “Méthodologie de conception de systèmes temps réel et distribués en contexte UML/SysML. Networking and Internet Architecture,” Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2008.
- [46] L. Audibert, *UML 2 : de l'apprentissage à la pratique*. Paris: Ellipses Marketing, 2009.
- [47] H. A. Simon, “Explaining the Ineffable: AI on the Topics of Intuition, Insight and Inspiration.,” pp. 939–949, 1995.
- [48] J.-M. Alliot, T. Schiex, P. Brisset, and F. Garcia, *Intelligence artificielle et informatique théorique*, 2e édition. Toulouse: Cépadués, 2002.
- [49] Y. Demazeau, “From Interactions To Collective Behaviour In Agent-Based Systems,” in *In: Proceedings of the 1st. European Conference on Cognitive Science. Saint-Malo*, 1995, pp. 117–132.
- [50] J. Ferber, *LES SYSTEMES MULTI-AGENTS. Vers une intelligence collective*. Paris: Dunod, 1997.
- [51] L. Gasser and M. N. Huhns, *Distributed Artificial Intelligence: Volume II*. London: Morgan Kaufmann, 1998.
- [52] L. Gasser, “Distributed Artificial Intelligence,” N. M. Avouris and L. Gasser, Eds. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1992, pp. 9–30.
- [53] L. Bearzotti, R. Gonzalez, and P. Miranda, “The Event Management Problem in a Container Terminal,” *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 95–102, Feb. 2013.
- [54] L. A. Bearzotti, E. Salomone, and O. J. Chiotti, “An autonomous multi-agent approach to supply chain event management,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 135, no. 1, pp. 468–478, Jan. 2012.
- [55] Y. Shoham, “Agent-oriented Programming,” *Artif Intell*, vol. 60, no. 1, pp. 51–92, Mar. 1993.
- [56] M. Wooldridge and N. R. Jennings, “Agent theories, architectures, and languages: A survey,” in *Intelligent Agents*, M. J. Wooldridge and N. R. Jennings, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 1995, pp. 1–39.
- [57] S. J. Russell, “Rationality and intelligence,” *Artif. Intell.*, vol. 94, no. 1–2, pp. 57–77, Jul. 1997.
- [58] R. A. Flores-Mendez, “Towards a Standardization of Multi-agent System Framework,” *Crossroads*, vol. 5, no. 4, pp. 18–24, Jun. 1999.
- [59] “Principes et architecture des systèmes multi-agents BRIOT Jean-Pierre, DEMAZEAU Yves,” *Librairie Lavoisier*. [Online]. Available: <http://www.lavoisier.fr/livre/informatique/principes-et-architecture-des-systemes-multi-agents/briot/descriptif-9782746203365>. [Accessed: 01-Oct-2015].
- [60] Q. Zhao and S. Liu, “Relay protection based on Multi-Agent System,” in *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2011, pp. 286–289.
- [61] R. Brooks, “Intelligence Without Representation,” *Artif. Intell.*, vol. 47, pp. 139–159, 1991.
- [62] K. Fischer, J. P. Müller, and M. Pischel, “Cooperative Transportation Scheduling: an Application Domain for DAI,” *J. Appl. Artif. Intell.*, vol. 10, pp. 1–33, 1995.
- [63] H. V. D. Parunak, R. Savit, and R. L. Riolo, “Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users’ Guide,” in *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, J. S. Sichman, R. Conte, and N. Gilbert, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 10–25.

- [64] A. Kaddoussi, *Optimisation des flux logistiques : vers une gestion avancée de la situation de crise*. Ecole Centrale de Lille, 2012.
- [65] T. Monteiro, D. Anciaux, S. D’amours, B. Espinasse, A. Ferrarini, O. Labarthe, B. Montreuil, and D. Roy, “Simulation à base d’agents des systèmes de coordination et de planification des réseaux d’entreprises. Chapitre 7 de : La simulation pour la gestion des chaînes logistiques,” *Hermes Sci. Publ.*, 2008.
- [66] J. Tounsi, “Modélisation pour la simulation de la chaîne logistique globale dans un environnement de production PME mécatroniques,” phdthesis, Université de Savoie, 2009.
- [67] T. P. L. Y. Yuan, “Using agent technology to support supply chain management: Potentials and challenges,” 2001.
- [68] J. Fu and Y. Fu, “An adaptive multi-agent system for cost collaborative management in supply chains,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 44, pp. 91–100, Sep. 2015.
- [69] J. (Roger) Jiao, X. You, and A. Kumar, “An agent-based framework for collaborative negotiation in the global manufacturing supply chain network,” *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 22, no. 3, pp. 239–255, Jul. 2006.
- [70] W.-Y. Liang and C.-C. Huang, “Agent-based demand forecast in multi-echelon supply chain,” *Decis. Support Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 390–407, Oct. 2006.
- [71] R. Govindu and R. B. Chinnam, “MASCF: A generic process-centered methodological framework for analysis and design of multi-agent supply chain systems,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 53, no. 4, pp. 584–609, Nov. 2007.
- [72] S. CHEHBI épouse GAMOURA, “Modélisation et Simulation des Processus Collaboratifs dans les Chaînes Logistiques : Une Approche Multi Agents,” Université lumière Lyon 2.
- [73] C Bournez and O. Gutknecht, “Modèle de contrôle par émergence de coordination dans un réseau de contrats multiagents.,” *In Journées Francophones de l’Intelligence Artificielle Distribuée et des Systèmes MultiAgents*, Québec, Canada, 2001.
- [74] T. Moyaux, B. Chaib-draa, and D. D. G. Mcanique, “Agent-Based Simulation Of The Amplification Of Demand Variability In A Supply Chain,” in *In Proceedings of the 4th workshop Agent-Based Simulation (ABS4)*, CIRAD, 2003.
- [75] R. Y. K. Fung and T. Chen, “A multiagent supply chain planning and coordination architecture,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 25, no. 7–8, pp. 811–819, Nov. 2004.
- [76] W. Shen, Q. Hao, H. J. Yoon, and D. H. Norrie, “Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review,” *Adv. Eng. Inform.*, vol. 20, no. 4, pp. 415–431, Oct. 2006.
- [77] O. Labarthe, B. Espinasse, A. Ferrarini, and B. Montreuil, “Toward a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in a mass customization context,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 15, no. 2, pp. 113–136, Feb. 2007.
- [78] L. Belhoul, “Résolution de problèmes d’optimisation combinatoire mono et multi-objectifs par énumération ordonnée,” Dec. 2014.
- [79] C. Mancel, “Modelisation et resolution de problemes d’optimisation combinatoire issus d’applications spatiales,” phdthesis, INSA de Toulouse, 2004.
- [80] A. Artiba, “Contribution à la construction d’un système d’aide à la planification et à l’ordonnancement de lignes parallèles multiproduits,” Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France, 1990.
- [81] Carlier, *Problèmes d’ordonnancement : Modélisation, complexité, algorithmes*. Paris: Dunod, 1997.
- [82] I. Kacem, *Ordonnancement multicritère des job-shops flexibles : formulation, bornes inférieures et approche évolutionniste coopérative*. Lille 1, 2003.

- [83] G. Dantzig, R. Fulkerson, and S. Johnson, "Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem," *J. Oper. Res. Soc. Am.*, vol. 2, no. 4, pp. 393–410, Nov. 1954.
- [84] P. M. Camerini, L. Fratta, and F. Maffioli, "On improving relaxation methods by modified gradient techniques," in *Nondifferentiable Optimization*, M. L. Balinski and P. Wolfe, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 1975, pp. 26–34.
- [85] D. L. Applegate, R. E. Bixby, V. Chvatal, and W. J. Cook, *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study (Princeton Series in Applied Mathematics)*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2007.
- [86] Bernard TADUNFOCK TETI and L. P. FOTSO, "Heuristiques du problème du voyageur de commerce," *CARI06*, 2006.
- [87] Y. Coueque, J. Ohler, and S. Tollari, "Algorithmes génétiques pour résoudre le problème du commis voyageur," Avril 2002.
- [88] B. W. K. S. Lin, "An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem," *Oper. Res.*, vol. 21, no. 2, pp. 498–516, 1973.
- [89] P. Siarry and J. Dréo, *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile* - . .
- [90] A. H. Land and A. G. Doig, "An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems," *Econometrica*, vol. 28, no. 3, pp. 497–520, Jul. 1960.
- [91] Y. Collette and P. Siarry, *Optimisation multiobjectif*. Paris: Eyrolles, 2002.
- [92] L.-F. Hsieh and Y.-C. Huang, "New batch construction heuristics to optimise the performance of order picking systems," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 131, no. 2, pp. 618–630, Jun. 2011.
- [93] C.-H. Pan and S.-Y. Liu, "A comparative study of order batching algorithms," *Omega*, vol. 23, no. 6, pp. 691–700, Dec. 1995.
- [94] E. A. Frazelle and G. P. Sharp, "Correlated assignment strategy can improve any order-picking operation," *Ind. Eng.*, vol. 21, no. 4, pp. 33–37, 1989.
- [95] A. J. R. M. (noud) Gademann, J. P. V. D. Berg, and H. H. V. D. Hoff, "An order batching algorithm for wave picking in a parallel-aisle warehouse," *IIE Trans.*, vol. 33, no. 5, pp. 385–398, May 2001.
- [96] C.-M. Hsu, K.-Y. Chen, and M.-C. Chen, "Batching orders in warehouses by minimizing travel distance with genetic algorithms," *Comput. Ind.*, vol. 56, no. 2, pp. 169–178, Feb. 2005.
- [97] M. Boudia and C. Prins, "A memetic algorithm with dynamic population management for an integrated production–distribution problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 195, no. 3, pp. 703–715, Jun. 2009.
- [98] M. Shqair, S. Altarazi, and S. Al-Shihabi, "A statistical study employing agent-based modeling to estimate the effects of different warehouse parameters on the distance traveled in warehouses," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 49, pp. 122–135, Dec. 2014.
- [99] M. Horvat, "An Approach to Order Picking Optimization in Warehouses," University of Ljubljana Faculty of computer and information science, 2012.
- [100] S. Henn, "Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse," *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 11, pp. 2549–2563, Nov. 2012.
- [101] J. C.-H. Pan, P.-H. Shih, and M.-H. Wu, "Order batching in a pick-and-pass warehousing system with group genetic algorithm," *Omega*.
- [102] H. S. Hwang and G. S. Cho, "A performance evaluation model for order picking warehouse design," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 51, no. 2, pp. 335–342, Oct. 2006.
- [103] J.-Y. Shiau and M.-C. Lee, "A warehouse management system with sequential picking for multi-container deliveries," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 58, no. 3, pp. 382–392, Apr. 2010.

- [104] H. Zgaya, *Conception et optimisation distribuée d'un système d'information d'aide à la mobilité urbaine : une approche multi-agent pour la recherche et la composition des services liés au transport*. Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [105] R. Drezewski, "Agent-based and evolutionary planning techniques supporting crises management in transportation syst," 2006, pp. 495–500.
- [106] Y. Marinakis and M. Marinaki, "A hybrid genetic – Particle Swarm Optimization Algorithm for the vehicle routing problem," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 2, pp. 1446–1455, Mar. 2010.
- [107] H. H. H. Thomas G. Stützle, "Stochastic Local Search-Foundations and Applications," 2005.
- [108] K. Mesghouni, "Application des algorithmes évolutionnistes dans les problèmes d'optimisation en ordonnancement de production," Université de Lille1, 1999.
- [109] S. PINSON and F. BALBO, "BASES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DISTRIBUÉE."
- [110] M. Wooldridge, *An Introduction to MultiAgent Systems*, 2nd Edition. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2009.
- [111] V. Zeimpekis, "Goods distribution management in city logistics environment: A systemic approach," *Adv. Manag. Appl. Econ.*, vol. 1, no. 1, pp. 151–170, 2011.
- [112] N. K. C. Krothapalli and A. V. Deshmukh, "Design of negotiation protocols for multi-agent manufacturing systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 37, no. 7, pp. 1601–1624, May 1999.
- [113] S. Kraus, "Automated Negotiation and Decision Making in Multiagent Environments," in *Multi-Agent Systems and Applications*, M. Luck, V. Mařík, O. Štěpánková, and R. Trappl, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2001, pp. 150–172.
- [114] P. J. Ready, A. Gunasekaran, and A. Spalanzani, "Bottom-up approach based on Internet of Things for order fulfillment in a collaborative warehousing environment," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 159, pp. 29–40, Jan. 2015.
- [115] I. Lee and K. Lee, "The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises," *Bus. Horiz.*, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, Jul. 2015.
- [116] T. C. Poon, K. L. Choy, H. K. H. Chow, H. C. W. Lau, F. T. S. Chan, and K. C. Ho, "A RFID case-based logistics resource management system for managing order-picking operations in warehouses," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 4, pp. 8277–8301, May 2009.
- [117] R. G. Smith, "The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver," *IEEE Trans. Comput.*, vol. C-29, no. 12, pp. 1104–1113, Dec. 1980.
- [118] D. van Krevelen and R. Poelman, "A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations," *Int. J. Virtual Real.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–20, Jun. 2010.
- [119] "Virtual retinal display technology," in *Digital Avionics Systems Conference, 1998. Proceedings., 17th DASC. The AIAA/IEEE/SAE*, 1998, vol. 1, pp. D35/1–D35/6 vol.1.
- [120] Malik Mallem, "Realite Augmentee: Principes, Technologies et Applications."
- [121] R. J. Fanelli, "Two hemispheres- one brain functions of the corpus callosum. Edited by F. Lapore, M. Ptito, and H. H. Jasper. Alan R. Liss, Inc., New York, 1986, 565 pp," *Synapse*, vol. 2, no. 1, pp. 104–105, Jan. 1988.
- [122] "Hemispheric Asymmetry — Joseph B. Hellige | Harvard University Press." [Online]. Available: <http://www.hup.harvard.edu/catalog.php?isbn=9780674005594>. [Accessed: 04-Oct-2015].
- [123] J. B. Hellige, "Hemispheric asymmetry for visual information processing," *Acta Neurobiol. Exp. (Warsz.)*, vol. 56, no. 1, pp. 485–497, 1996.
- [124] D. H. Hubel, *Eye, Brain, and Vision*. New York, NY: W H Freeman & Co, 1988.

- [125] B. CLAVERIE and A. LEGER, “Vision augmentée par HUD : pour une prise en compte des contraintes psychophysiologiques,” *Journal of Human Mediated Interactions*, vol. Vol 10- N° 1, 2009.
- [126] G. Klopstein, *Autour d'une polémique*. 1977.
- [127] “CyberGlove® II Wireless Glove,” 2005.
- [128] A. Fady, L. Bironneau, and T. Morvan, *La logistique dans la distribution*. 2003.
- [129] C. I. Popirlan, “Knowledge Processing in Contact Centers Using a Multi-agent Architecture,” *WTrans Comp*, vol. 9, no. 11, pp. 1318–1327, Nov. 2010.
- [130] “Wiley: Developing Multi-Agent Systems with JADE - Fabio Luigi Bellifemine, Giovanni Caire, Dominic Greenwood,” 2007. [Online]. Available: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470057475.html>. [Accessed: 23-Oct-2015].
- [131] M. Wooldridge and N. R. Jennings, “Intelligent Agents: Theory and Practice,” *Knowl. Eng. Rev.*, vol. 10, pp. 115–152, 1995.
- [132] A. V. Sandita and C. I. Popirlan, “Developing A Multi-Agent System in JADE for Information Management in Educational Competence Domains,” *Procedia Econ. Finance*, vol. 23, pp. 478–486, 2015.

## **Titre : La réalité augmentée au service de l'optimisation des opérations de picking et putting dans les entrepôts**

### **Résumé**

Ces travaux de recherche présentés dans cette thèse s'intègrent dans le cadre d'un partenariat entre Generix Group, éditeur de logiciels collaboratifs pour l'écosystème du commerce, et l'École Centrale de Lille portant sur la réalisation d'un système d'aide au déplacement des opérateurs intégrant la Réalité Augmentée (RA) dans le domaine de la supply chain.

Dans la gestion des entrepôts, la préparation des commandes représente un processus important. Avoir une gestion optimisée des entrepôts en aidant les opérateurs à travailler dans des meilleures conditions est un enjeu majeur.

Le but de cette thèse est de proposer un Système d'Aide à la Décision (SAD) dans les entrepôts pour l'optimisation des processus de picking et putting. L'aspect dynamique et ouvert du problème nous a conduits à adopter une modélisation multi-agent. Le système multi-agent proposé s'appuie sur les métaheuristiques pour gérer l'affectation aux opérateurs des chemins optimisés de préparation de commandes.

Le système d'Alliance entre l'Optimisation et les Systèmes Multi-agent (AOSMA) proposé est basé sur une approche de modélisation, optimisation et simulation orientée agent intégrant la technologie des lunettes à RA. En effet, les lunettes connectées permettent d'afficher d'une manière confortable dans le champ de vision de l'opérateur les informations nécessaires afin d'améliorer l'efficacité et le rendement et de réduire les erreurs de picking et putting.

Les résultats expérimentaux présentés dans cette thèse justifient l'alliance entre les Systèmes Multi-Agent et l'optimisation tout en intégrant la nouvelle technologie de RA pour assurer le pilotage des parcours de picking et putting.

**Mots-clés :** Préparation de commandes, putting, optimisation, métaheuristiques, système multi-agent, réalité augmentée, lunettes connectées

## **Title : Augmented reality in the service of optimization of the putting and picking operations in warehouses**

### **Abstract**

The research presented in this thesis belongs to a partnership between Generix Group, collaborative software vendor for Retail ecosystem, and the Ecole Centrale of Lille which aims to implement a Support System for Travel (SST) distance of pickers integrating Augmented Reality (AR) in the area of the supply chain.

In warehouse management, order picking is an important process. Having an optimized warehouse management by helping order pickers to work in better conditions is a major issues.

The aim of this thesis is to propose a Decision Support System (DSS) in warehouses to optimize picking and putting processes. The dynamic and open aspect of the problem has led us to adopt a multi-agent modelling approach. The proposed multi-agent system is based on metaheuristics to manage the optimized paths allocation to order pickers.

The Alliance between the Optimization and Multi-Agent System (AOMAS) proposed is based on a modeling approach, optimization and agent-oriented simulation integrating Augmented Reality (AR) Smart Glasses. Indeed, the connected glasses can display in the operator's field of vision the necessary information to improve efficiency and effectiveness and reduce errors in picking and putting.

The experimental results presented in this thesis, justify the alliance between the multi-agent systems and optimization integrating the new AR technology to ensure the piloting of picking and putting path.

**Key-words :** Order picking, putting, optimization, metaheuristics, multi-agent system, augmented reality, smart glasses