

## Aide à la décision pour l'automatisation de la manutention dans une unité de fabrication de semi-conducteurs

Ali Ben-Salem

#### ▶ To cite this version:

Ali Ben-Salem. Aide à la décision pour l'automatisation de la manutention dans une unité de fabrication de semi-conducteurs. Autre. Université de Lyon, 2018. Français. NNT: 2018LYSEM010. tel-02921455

## HAL Id: tel-02921455 https://theses.hal.science/tel-02921455

Submitted on 25 Aug 2020

**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 NNT : 2018LYSEM010

## THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

opérée au sein de

### l'Ecole des Mines de Saint-Etienne

Ecole Doctorale N° 488 Sciences, Ingénierie, Santé

Spécialité de doctorat :

Discipline: Génie Industriel

Soutenue publiquement le 14/06/2018, par :

Ali Ben Salem

## Aide à la décision pour l'automatisation de la manutention dans une unité de fabrication de semi-conducteurs

#### Devant le jury composé de :

Directeur de thèse:

Invités:

Rapporteurs: Bernard GRABOT Professeur, ENIT Tarbes, France

Khaled HADJ-HAMOU Professeur, INSA Lyon, France

Examinateurs: Nathalie SAUER Professeur, Université de Lorraine, France

> Valeria BORODIN Maître Assistant, EMSE, France

Claude YUGMA Professeur, EMSE, France

Responsable industriel: Jacques PINATON Ingénieur, STMicroelectronics, France **Emmanuel TRONCET** Ingénieur, STMicroelectronics, France Alain PLANCHAIS Ingénieur, STMicroelectronics, France

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX MECANIQUE ET INGENIERIE GENIE DES PROCEDES SCIENCES DE LA TERRE SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT K. Wolski Directeur de recherche S. Drapier, professeur F. Gruy, Maître de recherche B. Guy, Directeur de recherche D. Graillot, Directeur de recherche MATHEMATIQUES APPLIQUEES INFORMATIQUE SCIENCES DES IMAGES ET DES FORMES GENIE INDUSTRIEL MICROELECTRONIQUE O. Roustant, Maître-assistant O. Boissier, Professeur JC. Pinoli, Professeur X. Delorme, Maître assistant Ph. Lalevée, Professeur

#### EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

| ISE : Enseignants-cher | cheurs et chercheurs au | itorisés à diriger des théses c | le doctorat (titulaires d'un doctorat c | l'Etat ou d'une |
|------------------------|-------------------------|---------------------------------|---|-----------------|
| ABSI                   | Nabil                   | CR                              | Génie industriel                        | CMP             |
| AUGUSTO                | Vincent                 | CR                              | Image, Vision, Signal                   | CIS             |
| AVRIL                  | Stéphane                | PR2                             | Mécanique et ingénierie                 | CIS             |
| BADEL                  | Pierre                  | MA(MDC)                         | Mécanique et ingénierie                 | CIS             |
| BALBO                  | Flavien                 | PR2                             | Informatique                            | FAYOL           |
| BASSEREAU              | Jean-François           | PR                              | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
| BATTON-HUBERT          | Mireille                | PR2                             | Sciences et génie de l'environnement    | FAYOL           |
| BEIGBEDER              | Michel                  | MA(MDC)                         | Informatique                            | FAYOL           |
| BLAYAC                 | Sylvain                 | MA(MDC)                         | Microélectronique                       | CMP             |
| BOISSIER               | Olivier                 | PR1                             | Informatique                            | FAYOL           |
| BONNEFOY               | Olivier                 | MA(MDC)                         | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| BORBELY                | Andras                  | MR(DR2)                         | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
| BOUCHER                | Xavier                  | PR2                             | Génie Industriel                        | FAYOL           |
| BRODHAG                | Christian               | DR                              | Sciences et génie de l'environnement    | FAYOL           |
| BRUCHON                | Julien                  | MA(MDC)                         | Mécanique et ingénierie                 | SMS             |
| CAMEIRAO               | Ana                     | MA(MDC)                         | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| CHRISTIEN              | Frédéric                | PR                              | Science et génie des matériaux          | SMS             |
| DAUZERE-PERES          | Stéphane                | PR1                             | Génie Industriel                        | CMP             |
|                        | •                       |                                 |   |                 |
| DEBAYLE                | Johan                   | MR                              | Sciences des Images et des Formes       | SPIN            |
| DEGEORGE               | Jean-Michel             | MA(MDC)                         | Génie industriel                        | Fayol           |
| DELAFOSSE              | David                   | PR0                             | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
| DELORME                | Xavier                  | MA(MDC)                         | Génie industriel                        | FAYOL           |
| DESRAYAUD              | Christophe              | PR1                             | Mécanique et ingénierie                 | SMS             |
| DJENIZIAN              | Thierry                 | PR                              | Science et génie des matériaux          | CMP             |
| DOUCE                  | Sandrine                | PR2                             | Sciences de gestion                     | FAYOL           |
| DRAPIER                | Sylvain                 | PR1                             | Mécanique et ingénierie                 | SMS             |
| FAUCHEU                | Jenny                   | MA(MDC)                         | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
| FAVERGEON              | Loïc                    | CR                              | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| FEILLET                | Dominique               | PR1                             | Génie Industriel                        | CMP             |
| FOREST                 | Valérie                 | MA(MDC)                         | Génie des Procédés                      | CIS             |
| FRACZKIEWICZ           | Anna                    | DR                              | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
| GARCIA                 | Daniel                  | MR(DR2)                         | Sciences de la Terre                    | SPIN            |
| GAVET                  | Yann                    | MA(MDC)                         | Sciences des Images et des Formes       | SPIN            |
| GERINGER               | Jean                    | MA(MDC)                         | Sciences et génie des matériaux         | CIS             |
| GOEURIOT               | Dominique               | DR                              | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
|                        | •                       |                                 |   |                 |
| GONDRAN                | Natacha                 | MA(MDC)                         | Sciences et génie de l'environnement    | FAYOL           |
| GONZALEZ FELIU         | Jesus                   | MA(MDC)                         | Sciences économiques                    | FAYOL           |
| GRAILLOT               | Didier                  | DR                              | Sciences et génie de l'environnement    | SPIN            |
| GROSSEAU               | Philippe                | DR                              | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| GRUY                   | Frédéric                | PR1                             | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| GUY                    | Bernard                 | DR                              | Sciences de la Terre                    | SPIN            |
| HAN                    | Woo-Suck                | MR                              | Mécanique et ingénierie                 | SMS             |
| HERRI                  | Jean Michel             | PR1                             | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| KERMOUCHE              | Guillaume               | PR2                             | Mécanique et Ingénierie                 | SMS             |
| KLOCKER                | Helmut                  | DR                              | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
| LAFOREST               | Valérie                 | MR(DR2)                         | Sciences et génie de l'environnement    | FAYOL           |
| LERICHE                | Rodolphe                | CR                              | Mécanique et ingénierie                 | FAYOL           |
| MALLIARAS              | Georges                 | PR1                             | Microélectronique                       | CMP             |
| MOLIMARD               | Jérôme                  | PR2                             | Mécanique et ingénierie                 | CIS             |
| MOUTTE                 | Jacques                 | CR                              | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| NEUBERT                | Gilles                  |                                 | Come des Procedes                       | FAYOL           |
| NIKOLOVSKI             | Jean-Pierre             | Ingénieur de recherche          | Mécanique et ingénierie                 | CMP             |
| NORTIER                | Patrice                 | PR1                             |   | SPIN            |
|                        |                         |                                 | Génie des Procédés                      |                 |
| O CONNOR               | Rodney Philip           | MA(MDC)                         | Microélectronique                       | CMP             |
| OWENS                  | Rosin                   | MA(MDC)                         | Microélectronique                       | CMP             |
| PERES                  | Véronique               | MR                              | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| PICARD                 | Gauthier                | MA(MDC)                         | Informatique                            | FAYOL           |
| PIJOLAT                | Christophe              | PR0                             | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| PINOLI                 | Jean Charles            | PR0                             | Sciences des Images et des Formes       | SPIN            |
| POURCHEZ               | Jérémy                  | MR                              | Génie des Procédés                      | CIS             |
| ROUSSY                 | Agnès                   | MA(MDC)                         | Microélectronique                       | CMP             |
| ROUSTANT               | Olivier                 | MA(MDC)                         | Mathématiques appliquées                | FAYOL           |
| SANAUR                 | Sébastien               | MA(MDC)                         | Microélectronique                       | CMP             |
| STOLARZ                | Jacques                 | CR                              | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
| TRIA                   | Assia                   | Ingénieur de recherche          | Microélectronique                       | CMP             |
| VALDIVIESO             | François                | PR2                             | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
| VIRICELLE              | Jean Paul               | DR                              | Génie des Procédés                      | SPIN            |
| WOLSKI                 | Krzystof                | DR                              | Sciences et génie des matériaux         | SMS             |
| XIE                    | Xiaolan                 | PR0                             | Génie industriel                        | CIS             |
|                        | Gallian                 |                                 | Génie industriel                        |                 |
| YUGMA                  | Gailláli                | CR                              | Genic industrier                        | CMP             |

### Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE n° 2014/1386) accordée par l'Association Nationale de la Recherche Technique (ANRT), en collaboration avec STMicroelectronics.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur Claude YUGMA d'avoir dirigé ma thèse, pour son accueil convivial, son encouragement et ses conseils avisés. Mes remerciements à Monsieur Jacques PINATON, mon encadrant industriel, pour sa disponibilité et sa grande implication au quotidien.

Je remercie Monsieur Bernard GRABOT et Monsieur Khaled HADJ-HAMOU pour avoir fait l'honneur de rapporter mon mémoire de thèse et pour leurs suggestions d'amélioration du manuscrit. J'adresse également mes remerciements aux autres membres du jury : Madame Valeria BORODIN d'avoir accepté d'examiner mes travaux de thèse et à Madame Nathalie SAUER qui m'a fait l'honneur de présider le jury. J'associe à ce remerciement Monsieur Emmanuel TRONCET et Monsieur Alain PLANCHAIS, ingénieurs à STMicroelectronics Rousset, d'avoir assisté à ma soutenance autant qu'invités.

Je voudrais aussi remercier tous les membres du département SFL (Sciences de la Fabrication & Logistique) pour leurs soutiens, leurs confiances et surtout pour la bonne ambiance. Tout particulièrement, merci à mon ami Hamza pour sa bonne humeur, son aide et son encouragement.

Mes remercîments vont aussi à tout le service Process Control de STMicroelectronics à Rousset qui m'ont chaleureusement accueilli, en particulier Eric TARTIERE, Laurent BU-CELLE et Michel COMBAL, avec qui j'ai eu des échanges constructifs au niveau professionnel ainsi que personnel. Merci à toutes les personnes exceptionnelles que j'avais rencontrées à Rousset notamment Pierre BECT, Pascal FERNANDES,...

En fin, les mots me manquent pour remercier ma petite famille; ma femme Ouiem et mon fils Idris qui sont toujours ma source de motivation.

## **Table des matières**

| Li | ste de | s tablea  | aux   | 1  |  |  |  |
|----|--------|---|---|----|--|--|--|
| Ta | ble d  | es figur  | es  | 3  |  |  |  |
| 1  | Intr   | oductio   | on générale                                     | 1  |  |  |  |
|    | 1.1    | Indust  | rie des semi-conducteurs                        | 1  |  |  |  |
|    | 1.2    | Object  | tifs de la thèse                                | 2  |  |  |  |
|    | 1.3    | Structi   | ure du manuscrit de thèse                       | 4  |  |  |  |
| 2  | Con    | texte in  | dustriel et description du problème             | 7  |  |  |  |
|    | 2.1    | Fabric  | ation de semi-conducteurs                       | 7  |  |  |  |
|    |        | 2.1.1   | Front-End                                       | 8  |  |  |  |
|    |        | 2.1.2   | Back-End  | 11 |  |  |  |
|    |        | 2.1.3   | Performance du processus de fabrication         | 11 |  |  |  |
|    | 2.2    | Systèn  | mes de manutention dans les wafer fabs          | 13 |  |  |  |
|    |        | 2.2.1   | Transport                                       | 13 |  |  |  |
|    |        | 2.2.2   | Stockage  | 18 |  |  |  |
|    |        | 2.2.3   | Performance d'un système de manutention         | 19 |  |  |  |
|    | 2.3    | Présentation et analyse du cas industriel : la wafer fab 200mm de STMicroe- |   |    |  |  |  |
|    |        | lectron   | nics à Rousset                                  | 21 |  |  |  |
|    |        | 2.3.1   | Ancienne (ou legacy) wafer fab 200mm            | 21 |  |  |  |
|    |        | 2.3.2   | Stratégie de transport et de stockage           | 23 |  |  |  |
|    |        | 2.3.3   | Nécessité de modernisation des wafer fabs 200mm | 25 |  |  |  |
|    | 2.4    | Descri  | iption du problème                              | 25 |  |  |  |
|    |        | 2.4.1   | Motivations humaines                            | 26 |  |  |  |
|    |        | 2.4.2   | Motivations opérationnelles                     | 26 |  |  |  |
|    |        | 2.4.3   | Motivations financières                         | 27 |  |  |  |
|    | 2.5    | Concl   | usion   | 27 |  |  |  |
| 3  | État   | : de l'ar   | <b>·</b> t                                      | 29 |  |  |  |

|   | 3.1  | Revue   | de la littérature  | 29 |
|---|------|---------|--|----|
|   |      | 3.1.1   | Automatisation de la manutention dans les unités de fabrication 200mm                    |    |
|   |      |         |  | 29 |
|   |      | 3.1.2   | Design des systèmes de manutention automatisés   | 32 |
|   |      | 3.1.3   | Méthodes de résolution des problèmes en multicritères                                    | 41 |
|   | 3.2  | Positio | onnement par rapport à la littérature  | 46 |
|   |      | 3.2.1   | Absence d'une méthodologie globale pour l'intégration d'un AMHS dans une wafer fab 200mm | 46 |
|   |      | 3.2.2   | Stratégie de déploiement de l'AMHS dans une unité de fabrication                         | 47 |
|   |      | 3.2.3   | Absence d'une méthodologie pour le <i>design</i> d'un AMHS dans une wafer fab existante  | 47 |
|   |      | 3.2.4   | Résolution basée sur la simulation à évènements discrets                                 | 48 |
|   | 3.3  | Conclu  | asion  | 48 |
| 4 | Mét  | hodolog | gie pour l'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication de                        |    |
|   | semi | i-condu | cteurs existante et fonctionnelle  | 49 |
|   | 4.1  |         | tion   | 49 |
|   | 4.2  |         | dologie proposée   |    |
|   |      | 4.2.1   | Étape 1 : Collecte et analyse des données  |    |
|   |      | 4.2.2   | Étape 2 : Caractérisation des types d'AMHS   |    |
|   |      | 4.2.3   | Étape 3 : Sélection du type d'AMHS   | 51 |
|   |      | 4.2.4   | Étape 4 : Définition de la stratégie de transport  | 51 |
|   |      | 4.2.5   | Étape 5 : Définition de la stratégie de stockage   | 52 |
|   | 4.3  |         | ation de la méthodologie sur un cas industriel : Cas de STMicroelec-                     |    |
|   |      | tronics | à Rousset  |    |
|   |      | 4.3.1   | Etape 1 : Collecte et analyse de données industrielles                                   | 52 |
|   |      | 4.3.2   | Étape 2 : Caractérisation des types d'AMHS   | 62 |
|   |      | 4.3.3   | Étape 3 : Sélection du type d'AMHS   |    |
|   |      | 4.3.4   | Étape 4 : Définition de la stratégie de transport  | 69 |
|   |      | 4.3.5   | Étape 5 : Définition de la stratégie de stockage   | 79 |
|   | 4.4  | Conclu  | asion  | 85 |
| 5 |      |         | cision multicritère pour le déploiement d'un AMHS dans une unité                         |    |
|   |      |         | on de semi-conducteurs   | 87 |
|   | 5.1  | •       | ption du problème  | 87 |
|   | 5.2  |         | che de modélisation et résolution  | 88 |
|   |      | 5.2.1   | Choix de la méthode de résolution  | 88 |

|   |      | 5.2.2   | Étapes de la méthode AHP   | . 89  |  |  |  |  |  |
|---|------|---|--|-------|--|--|--|--|--|
|   | 5.3  | Illustration et application : cas de la wafer fab de STMicroelectronics à Rousset |  |       |  |  |  |  |  |
|   |      | 5.3.1   | Définition des critères de déploiement                           | . 92  |  |  |  |  |  |
|   |      | 5.3.2   | Application de la méthode AHP                                    | . 94  |  |  |  |  |  |
|   |      | 5.3.3   | Évaluation de la robustesse du planning de déploiement           | . 100 |  |  |  |  |  |
|   | 5.4  | Conclu  | usion  | . 101 |  |  |  |  |  |
| 6 | Mét  | hodolog   | gie pour la conception d'un AMHS dans un atelier existant et fon | c-    |  |  |  |  |  |
|   | tion |   | s de la photolithographie  | 103   |  |  |  |  |  |
|   | 6.1  |   | dologie proposée   |       |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.1.1   | Phase 1 : Collecte et vérification de données industrielles      |       |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.1.2   | Phase 2 : Conception initiale d'AMHS                             |       |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.1.3   | Phase 3 : Optimisation de la conception d'AMHS                   | . 105 |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.1.4   | Phase 4: Robustesse de la conception d'AMHS                      | . 105 |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.1.5   | Phase 5 : Prise de décision                                      |       |  |  |  |  |  |
|   | 6.2  | Cas de  | e l'atelier de photolithographie                                 | . 106 |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.2.1   | Fonctionnement et manutention manuelle                           |       |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.2.2   | Solution d'AMHS  | . 106 |  |  |  |  |  |
|   | 6.3  | Simula  | ation et expérimentation   |       |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.3.1   | Choix de la simulation   | . 109 |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.3.2   | Construction du modèle de simulation                             | . 110 |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.3.3   | Hypothèses de modélisation                                       | . 116 |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.3.4   | Validation du modèle de simulation                               | . 116 |  |  |  |  |  |
|   |      | 6.3.5   | Stratégie d'expérimentation                                      | . 117 |  |  |  |  |  |
|   | 6.4  | Conclu  | usion  | . 122 |  |  |  |  |  |
| 7 |      | -   | d'un AMHS : transport et stockage des réticules dans l'atelier o |       |  |  |  |  |  |
|   | phot | tolithog  | •  | 123   |  |  |  |  |  |
|   | 7.1  | Phase   | 1 : Collecte et vérification de données                          |       |  |  |  |  |  |
|   |      | 7.1.1   | Données liées au flux de production                              | . 123 |  |  |  |  |  |
|   |      | 7.1.2   | Données liées à la structure physique de l'atelier               |       |  |  |  |  |  |
|   | 7.2  | Phase   | 2 : Conception initiale de l'AMHS                                |       |  |  |  |  |  |
|   |      | 7.2.1   | Conception initiale du système OHT                               | . 125 |  |  |  |  |  |
|   |      | 7.2.2   | Conception initiale du stockage automatisé                       | . 126 |  |  |  |  |  |
|   | 7.3  | Phase   | 3 : Conception optimisé de l'AMHS                                | . 129 |  |  |  |  |  |
|   |      | 7.3.1   | Optimisation du système OHT                                      | . 129 |  |  |  |  |  |

|    |      | 7.3.2    | Optimisation de l'affectation des véhicules sous contraintes de production                        | . 137 |
|----|------|----------|---|-------|
|    |      | 7.3.3    | Optimisation du processus de stockage automatisé  |       |
|    | 7.4  |          | 4 : Conception robuste de l'AMHS  |       |
|    | 7.5  |          | 5 : Prise de décision   |       |
|    | 7.6  |          | ision   |       |
| 8  | Exte | ension d | e l'AMHS : transport et stockage des lots dans l'atelier de photol                                | i-    |
|    | thog | raphie   |   | 157   |
|    | 8.1  | Phase 1  | 1 : Collecte et vérification des données  | . 157 |
|    | 8.2  | Phase 2  | 2 : Conception initiale de l'AMHS   | . 158 |
|    |      | 8.2.1    | Conception initiale du système OHT  | . 158 |
|    |      | 8.2.2    | Conception initiale du stockage automatisé  | . 161 |
|    | 8.3  | Phase 3  | 3 : Conception optimisée de l'AMHS  | . 162 |
|    |      | 8.3.1    | Optimisation du système OHT   | . 163 |
|    |      | 8.3.2    | Optimisation du processus de stockage automatisé  | . 170 |
|    | 8.4  | Phase 4  | 4 : Conception robuste de l'AMHS  | . 175 |
|    |      | 8.4.1    | Interaction entre le transport des lots et des réticules  | . 175 |
|    |      | 8.4.2    | Impact d'une augmentation de la capacité de production sur l'AMHS                                 | 177   |
|    |      | 8.4.3    | Impact d'une augmentation de la capacité de production sur le processus de stockage des réticules | . 180 |
|    | 8.5  | Phase 5  | 5 : Prise de décision   | . 181 |
|    | 8.6  | Conclu   | sion  | . 182 |
| 9  | Con  | clusions | s et perspectives   | 183   |
|    | 9.1  | Livrabl  | les industriels   | . 184 |
|    | 9.2  |          | ctives  |       |
| Aŗ | pend | lices    |   | 187   |
| A  | Ana  | lyse con | nparative des systèmes OHT et AGV   | 187   |
|    | A.1  | Capabi   | ilité de transport  | . 187 |
|    | A.2  | Gestion  | n de transport  | . 187 |
|    | A.3  | Compa    | atibilité avec la salle blanche   | . 187 |
|    | A.4  | Sécurit  | té  | . 187 |
|    | A.5  | Coût .   |   | . 187 |
|    | A.6  | Mainte   | enance et support   | . 188 |
|    | A.7  |          | ices physiques  |       |

|   |               |         |                                  | `     |
|---|---------------|---------|----------------------------------|-------|
| _ | $\overline{}$ | <br>~   |                                  | IERES |
|   |               | <br>16  | $\mathbf{n}\mathbf{n}\mathbf{n}$ |       |
|   | О.            | <br>, , | 1714                             | 1665  |
|   |               | <br>    |                                  |       |

Bibliographie

|   | A.8         | Points techniques                                       |
|---|-------------|---|
| В | Calc        | ul matricielle dans la méthode AHP 193                  |
|   | B.1         | Questionnaire pour comparer les facteurs de déploiement |
|   | B.2         | Matrices de comparaison                                 |
|   |             | B.2.1 Détermination de l'atelier pilote                 |
|   |             | B.2.2 Détermination du deuxième atelier de production   |
| C | Insta       | nnces générées 199                                      |
|   | <b>C</b> .1 | Instances : cas de base                                 |
|   | C.2         | Instance: cas du "Mix B"                                |
|   |             |   |

V

203

## Liste des tableaux

| 3.1  | Articles traitant de l'automatisation de la manutention dans les unités de fabrication de semi-conducteurs 200mm                                      | 31 |
|------|---|----|
| 3.2  | Sélection d'articles traitant de la détermination de la taille de flotte de véhicules pour un AMHS dans les unités de fabrication de semi-conducteurs | 34 |
| 3.3  | Sélection d'articles traitant des politiques de dispatching des véhicules pour un AMHS dans les unités de fabrication de semi-conducteurs             | 37 |
| 3.4  | Sélection d'articles traitant des systèmes de stockages dans les unités de fabrication de semi-conducteurs  | 40 |
| 3.5  | Sélection d'articles utilisant la méthode AHP dans différents domaines d'application  | 45 |
| 4.1  | Les groupes d'ateliers  | 61 |
| 4.2  | Résultats de l'évaluation des types d'AMHS (Yamagishi[118]  | 63 |
| 4.3  | Niveau d'importance et poids correspondant  | 63 |
| 4.4  | Echelle numérique de [97]   | 64 |
| 4.5  | Choix final de type d'AMHS  | 68 |
| 4.6  | Requête de transport pour les différentes configurations de l'AMHS  | 71 |
| 4.7  | Résultats obtenus pour les instances générées   | 74 |
| 4.8  | Paramètres de la simulation   | 77 |
| 4.9  | Résultats des expérimentations  | 77 |
| 4.10 | Analyse comparative de principales solutions de stockages dans les wafer fabs.  | 80 |
| 4.11 | Solutions de stockage possibles par atelier   | 81 |
| 4.12 | Solutions alternatives pour le stockage des lots  | 83 |
| 4.13 | Gestion de stockages des lots en fonction de leurs destinations   | 85 |
| 5.1  | Échelle numérique de [97]   | 90 |
| 5.2  | Indice de cohérence moyen   | 91 |
| 5.3  | Matrice de comparaison de l'importance des éléments (Matrice 1)   | 96 |
| 5.4  | Matrice de comparaison de l'importance des éléments   | 96 |
| 5.5  | Résultats des cohérences des jugements  | 97 |
| 5.6  | Matrice de comparaison de l'importance des éléments (Matrice 1)   | 98 |

| 5.7  | Résultats des cohérences des jugements  | . 99  |
|------|---|-------|
| 5.8  | Ordre de déploiement de l'AMHS  | . 100 |
| 5.9  | Résultats de l'analyse de sensibilité   | . 101 |
| 6.1  | Matrice (Origine/Destination) entre les équipements et les stockeurs : distance (position haute) et flux de réticules (position bas, nombre total de trans- |       |
|      | ports)  | . 117 |
| 6.2  | Comparaison entre les indicateurs de performance réels et ceux donnés par le modèle   | . 117 |
| 6.3  | Paramètres de base de l'AMHS pour la simulation   | . 119 |
| 7.1  | Exemple d'instance de WIP   | . 124 |
| 7.2  | Valeur moyenne et écart-type du temps d'affectation pour différentes politiques de gestion de flotte de véhicules   | . 132 |
| 7.3  | Valeur moyenne et écart-type du temps d'affectation pour différents nombres de véhicules  | . 134 |
| 7.4  | Caractéristiques des instances générées   |       |
| 7.5  | Résultats des expérimentations  |       |
| 7.6  | Résultats de comparaison entre « Mix A » et « Mix B »   |       |
| 7.7  | Nombre "optimal" de véhicules   |       |
| 7.8  | Résultats de simulation pour les différentes configurations d'emplacement des stockeurs   |       |
| 7.9  | Résultats des simulations pour les différentes politiques d'affectation   |       |
| 7.10 | Résultats des simulations sans et avec $EqptX$ et $EqptY$   |       |
| 8.1  | Paramètres de base des éléments de l'AMHS   | . 163 |
| 8.2  | Temps moyen de livraison (D1+D2+D3) et taux d'utilisation des véhicules   |       |
|      | pour le cas de 2 et 3 zones   | . 164 |
| 8.3  | Moyenne et écart type du temps d'affectation pour les différents types de   | 167   |
| 8.4  | mission   |       |
| 8.5  | Effet du nombre d'OHBs sur le débit total de l'atelier  |       |
| 8.6  | Paramètres du trafic des véhicules  |       |
| 8.7  | Les éléments de l'AMHS, leurs valeurs et les indicateurs de performance.  |       |
| 8.8  | Résultats des simulations   |       |
|      |   |       |
| A.1  | Résultats de la comparaison.  |       |
| A.2  | Résultats de la comparaison.  |       |
| A.3  | Résultats de la comparaison   | . 190 |

| A.4     | Résultats de la comparaison             |
|---------|---|
| A.5     | Résultats de la comparaison             |
| A.6     | Résultats de la comparaison             |
| A.7     | Résultats de la comparaison             |
| A.8     | Résultats de la comparaison             |
| B.1     | Tableau d'importance entre les critères |
| B.2     | Matrice 2                               |
| B.3     | Matrice 3                               |
| B.4     | Matrice 4                               |
| B.5     | Matrice 5                               |
| B.6     | Matrice 6                               |
| B.7     | Matrice 7                               |
| C.1     | Instance 1                              |
| C.2     | Instance 2                              |
| C.3     | Instance 3                              |
| C.4     | Instance 3                              |
| C.5     | Instance 1                              |
| C.6     | Instance 2                              |
| C.7     | Instance 3                              |
| $C^{Q}$ | Instance 2                              |

# **Table des figures**

| 1.1  | Niveau d'intervention de la thèse   | 3  |
|------|---|----|
| 2.1  | Silicium sous forme de plaquettes et de barres  | 8  |
| 2.2  | Processus de photolithographie  | 9  |
| 2.3  | Exemple d'un flux de production dans une wafer fab [75]   | 10 |
| 2.4  | Différents types d'AMHS   | 15 |
| 2.5  | Autres types de système de transport  | 15 |
| 2.6  | Configuration de l'AMHS: transport inter-bay/intra-bay  | 16 |
| 2.7  | Configuration spine et en périmètre [77]  | 17 |
| 2.8  | Configuration de l' <i>AMHS</i> : transport unifié  | 17 |
| 2.9  | Principales solutions de stockages dans les wafer fabs  | 19 |
| 2.10 | Plan de la wafer fab 200mm de STMicroelectronics à Rousset  | 23 |
| 2.11 | Chariot de convoyage des lots   | 24 |
| 2.12 | Étagère de stockage des lots  | 24 |
| 4.1  | Méthodologie proposée   | 50 |
| 4.2  | Diagramme de caractérisation des ateliers   | 53 |
| 4.3  | Représentation de la cartographie des flux de production dans la <i>wafer fab</i> 200mm de STMicroelectronics à Rousset | 54 |
| 4.4  | Classification des ateliers selon le critère de flux de production  | 55 |
| 4.5  | Critères de classification des ateliers en fonction des contraintes physiques   | 55 |
| 4.6  | Classification des ateliers selon le critère des contraintes physiques  | 56 |
| 4.7  | Critères de classification des ateliers en fonction de la productivité  | 57 |
| 4.8  | Classification des ateliers selon le critère de productivité  | 58 |
| 4.9  | Critères de classification des ateliers en fonction des spécificités des équipements de production                      | 59 |
| 4.10 | Classification des ateliers selon les spécificités des équipements de production.                                       |    |
|      | Arbre de décision   | 66 |
|      | Layout de l'unité de fabrication et types d'AMHS compatibles  | 67 |
|      | Layout de la wafer fab et type d'AMHS par atelier   | 68 |

| 4.14 | Niveaux d'intégration d'un AMHS dans une wafer fab   |
|------|--|
| 4.15 | Systèmes d'échanges de lots  |
| 4.16 | Groupement d'ateliers pour le transport unifié   |
| 4.17 | Processus de livraison d'un lot entre deux ateliers avec différents types d'AMHS. 76   |
| 4.18 | Configuration de l'AMHS dans la wafer fab  |
| 4.19 | Les ateliers en fonction du pourcentage de flux (intra-atelier) et du <i>WIP</i> par surface de l'atelier  |
| 5.1  | Approche de résolution proposée  |
| 5.2  | Structure hiérarchique du problème   |
| 5.3  | Exemple d'une évolution de l'effectif due à l'intégration d'un AMHS 93   |
| 5.4  | Hiérarchie du problème de déploiement de l'AMHS selon la méthode AHP . 95  |
| 5.5  | Hiérarchie du problème de déploiement de l'AMHS selon la méthode AHP 98  |
| 6.1  | Méthodologie pour la conception d'un AMHS pour un atelier existant et fonctionnel  |
| 6.2  | Schéma de l'AMHS proposé dans l'atelier de photolithographie   |
| 6.3  | Les éléments d'un AMHS à base d'un OHT   |
| 6.4  | Les deux façons de combiner la méthode ED et MA dans un modèle de simulation   |
| 6.5  | Méthode de simulation utilisée pour modéliser le problème  |
| 6.6  | Diagramme de logique des évènements dans le modèle   |
| 6.7  | Schéma de la structure générale du modèle  |
| 6.8  | Schéma de la stratégie d'expérimentation   |
| 6.9  | Régime transitoire et régime permanent   |
| 6.10 | Décomposition d'une mission de livraison d'un lot  |
| 7.1  | Réseau initial de rails  |
| 7.2  | Stockeur de réticules (source : Muratec)   |
| 7.3  | Zones ou espaces de stockage de réticules à l'intérieur d'un stockeur (source : Muratec)   |
| 7.4  | Emplacement initial des stockeurs dans l'atelier   |
| 7.5  | Répartition de l'atelier de photolithographie en différentes zones   |
| 7.6  | Taux d'utilisation moyen des véhicules pour différentes politiques de gestion de flotte de véhicules   |
| 7.7  | Temps moyen de livraison pour différentes politiques de gestion des véhicules 131  |
| 7.8  | Temps moyen de livraison pour universités ponniques de gestion des venicules 131.  Temps moyen de livraison en fonction du nombre de véhicules pour les dif- |
| , .0 | férentes politiques de gestion de flotte de véhicules  |

| 7.9  | Réseau des rails amélioré ou "optimisé"  | 135 |
|------|--|-----|
| 7.10 | Temps moyen de livraison pour le réseau initial vs le réseau "optimisé" de rails.                          | 136 |
| 7.11 | Taux d'utilisation moyen des véhicules pour le réseau initial vs le réseau                                 |     |
|      | optimisé des rails   | 136 |
| 7.12 | Exemple d'un planning de production et de transport dans le cas d'un et 2                                  | 120 |
| 7.10 | véhicules.   |     |
|      | Planning de transport optimal dans le cas de l'instance 2 avec 3 véhicules                                 |     |
|      | Exemple de deux plannings de production pour deux cas de mix des lots                                      | 144 |
| 7.15 | Débit total de l'atelier en fonction du temps moyen d'accès à un stockeur pour une période de temps donnée | 146 |
| 7 16 | Débit de l'atelier et taux d'utilisation moyen des véhicules dans le cas de 2                              | 170 |
| 7.10 | stockeurs  | 147 |
| 7.17 | Débit de l'atelier et taux d'utilisation moyen des véhicules dans le cas de 3                              |     |
|      | stockeurs  | 148 |
| 7.18 | Différentes configurations des emplacements possibles des stockeurs  | 149 |
| 7.19 | Temps moyen de livraison pour les différentes configurations   | 149 |
| 7.20 | Débit moyen d'un stockeur pour les différentes politiques de gestion                                       | 152 |
| 7.21 | Sélection des designs efficaces en fonction des indicateurs de production et                               |     |
|      | de transport   | 154 |
| 8.1  | Module de production dans l'atelier de photolithographie   | 158 |
| 8.2  | Réseau initial de rails  | 159 |
| 8.3  | Systèmes de <i>In-Buffer</i> et <i>Out-Buffer</i>  | 161 |
| 8.4  | Décomposition de l'atelier de photolithographie  | 164 |
| 8.5  | Temps de livraison total et taux d'utilisation de la flotte en fonction de nombre                          |     |
|      | de véhicules pour le cas de 2 et 3 zones   | 165 |
| 8.6  | Temps de livraison pour chaque type de missions en fonction du nombre de                                   | 1   |
| 0.7  |  | 166 |
| 8.7  | Décomposition du temps pour entrer un lot.   |     |
| 8.8  | Décomposition du temps pour sortir un lot.   |     |
| 8.9  | Temps pour entrer un lot en fonction du temps de manutention   |     |
|      | Temps d'affectation pour différents types de mission avec 2 et 3 <i>In-Buffers</i>                         |     |
| 8.11 |  | 1/U |
| 0.12 | Évolution du nombre d'OHBs occupés en fonction du temps : cas de 1000 OHBs                                 | 171 |
| 8.13 | Evolution du nombre moyen des lots sur les étagères en fonction du nombre                                  | 1,1 |
| 0.10 | d'OHRe   | 172 |

| 8.14 | 3.14 Paramètres du temps de livraison en fonction des différents types de mission |     |  |  |
|------|---|-----|--|--|
|      | pour les deux heuristiques d'affectation  | 173 |  |  |
| 8.15 | Processus de planification du WIP dans l'atelier de photolithographie             | 174 |  |  |
| 8.16 | Impact de l'heursitique d'affectation des OHBs sur le throughput de l'atelier.    | 175 |  |  |
| 8.17 | Histogrammes du temps de livraison pour les lots et les réticules                 | 176 |  |  |
| 8.18 | Méthode de simulation et d'expérimentation  | 177 |  |  |
| 8.19 | Effet de l'aiout d'un quatrième stockeur de réticules.                            | 181 |  |  |

## Chapitre 1

## Introduction générale

### 1.1 Industrie des semi-conducteurs

L'industrie de la microélectronique a rapidement évolué depuis la fabrication du premier transistor en 1947 par *Bell Telephone Laboratoires* (*Bell Labs*) [77]. Aujourd'hui, ce secteur industriel est l'un des principaux moteurs de l'économique mondiale. Pour rester compétitif, il doit faire preuve d'innovation à tous les niveaux. Ainsi, les entreprises spécialisées en fabrication de semi-conducteurs sont sans cesse entrain d'explorer des nouvelles pistes pour réduire les coûts de fabrication tout en améliorant la qualité des produits afin de rester rentable.

Un circuit intégré (*Integrated Circuits (IC)*) est composé principalement de puces qui contiennent les composants électroniques élémentaires (transistors) fabriqués sur une plaquette circulaire de silicium (*wafer*). Le processus de production d'IC nécessite deux grandes étapes : (1) le *Front-End* qui consiste à fabriquer les éléments de base de la puce et à tester sa fonctionnalité, et (2) le *Back-End* qui rassemble d'une part les étapes d'interconnexion entre la puce et le boitier, et d'autre part le test final du circuit intégré. Pour réduire les coûts de production, l'effort des entreprises s'est orienté principalement vers l'optimisation du processus de Front-End qui constitue l'étape la plus complexe, la plus longue et la plus coûteuse. Dans cette étape, les *wafers* sont regroupés dans un container de capacité maximale de 25 plaquettes, appelé "Lot".

L'évolution du diamètre des *wafers* de 200mm à 300mm a permis de fabriquer 50% de plus des puces par plaquette. Ce progrès a donné naissance à une nouvelle génération d'unité de fabrication de semi-conducteurs (appelée *wafer fab* 300mm). Ces unités modernes contiennent des équipements de production plus sophistiqués et automatisés. L'augmentation du diamètre du *wafer* a exigé aussi l'automatisation des opérations de manutention des lots à cause de leurs poids. Les *wafer fabs* 200mm, qui continuent de fonctionner, sont à un niveau faible d'automatisation et pratiquement une manutention manuelle (opérateurs). Cela s'explique par le fait que ce type d'unité de fabrication a été conçu et optimisé initialement pour une production de masse (*High Volume-Low Mixte* (HV-LM)). Ainsi, l'évolution dans l'industrie des semi-conducteurs du HV-LM vers une production à faible volume et une grande diversité (*Low Volume-High Mixte* (LV-HM)) est un challenge à relever par les *wafer fabs* 200mm qui manquent de flexibilité [35].

L'arrivée de la nouvelle génération de wafer fab 300mm a réduit considérablement le nombre des anciennes unités 200mm. Selon la société d'étude de marché « Sage Concepts », en 2016, les plaquettes de 300mm représentent 60% de la vente totale, tandis que les plaquettes 200mm représentent seulement 31%. Les 9% restants représentent des plaquettes de 150mm et de plus petites tailles. Cependant, récemment, par des grands investissements réalisés par la Chine, la production des plaquettes de 200mm connaît une recrudescence «Reawakening», avec une capacité globale qui devrait correspondre à son niveau record de 2006 d'ici 2019. Dans ce contexte, Christian Gregor Dieseldorff (Director Industry Research & Analysis, Industry Research & Statistics Group at SEMI, San Jose, California) a montré 1 lors de la conférence «Semicon Europa Conference 2016» l'évolution des wafer fabs 200mm dans le monde en termes d'activité (nombre de wafers par mois) et nombre d'unités de fabrication entre 2006 et 2019. Il indique que la production des plaquettes 200mm augmentera pour atteindre environ 5.4 millions de wafers par mois en 2019. Cela est surprenant pour une génération de plaquettes qui a débuté il y a plus de 25 ans. En effet, le savoir-faire et l'expérience acquis durant plusieurs années a permis aux wafer fabs 200mm de maitriser des technologies complexes sur des produits qui sont de plus en plus demandés. De plus, l'augmentation de la demande pour ces puces a créé une pénurie de capacité de fabrication des plaquettes 200mm.

Maintenir la compétitivité des unités de fabrication 200mm exige néanmoins une modernisation de ces unités de fabrication pour faire face à la concurrence des *wafer fabs* 300mm. Ainsi, plusieurs solutions ont été adoptées par les entreprises pour améliorer leurs processus de fabrication et augmenter la flexibilité telles que l'automatisation, l'optimisation de la planification et l'amélioration continue (*Lean Manufacturing*). L'intégration d'un système de manutention automatisé (*Automated Material Handling System* (AMHS)) est considérée comme une solution efficace pour gagner en flexibilité et en productivité d'une unité de fabrication [13]. De plus, avec l'Industrie 4.0 qui est promu en Europe, il est demandé d'aller vers l'automatisation et la robotisation des processus à faible valeur ajoutée, en particulier les opérations logistiques de transport et de stockage dans les unités de production (manutention). Les difficultés de mise en œuvre d'un tel concept sont nombreuses, en particulier dans les unités de fabrication de semi-conducteurs de l'ancienne génération ("*wafer fabs 200mm*") comme celle de STMicroelectronics à Rousset. Étant donné que ces unités n'ont pas été conçues à l'origine pour avoir un tel système automatisé, plusieurs défis sont à relever.

## 1.2 Objectifs de la thèse

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une aide à la décision pour le projet d'intégration d'un AMHS dans une ancienne unité de fabrication 200mm. Globalement, la décision d'automatisation des opérations de manutention vise d'une part à améliorer les conditions de travail des opérateurs et, d'autre part, à réduire les retards et les erreurs de livraison. Le

<sup>1.</sup> http://www.semiconwest.org/sites/semiconwest.org/files/data15/docs/1a\_Christian%20Dieseldorff\_SEMI.pdf

challenge est de ne surtout pas dégrader les indicateurs de performance de processus de fabrication dans la *wafer fab*. Cependant, toute possibilité d'amélioration de la productivité sera un plus en faveur de ce projet.

La Figure 1.1 présente les niveaux d'intervention de la thèse : stratégique, tactique et opérationnel.



Figure 1.1 – Niveau d'intervention de la thèse.

Ainsi, nous avons dans cette thèse 3 principaux objectifs qui sont présentés dans ce qui suit.

### Méthodologie pour l'intégration d'un AMHS dans une wafer fab existante

Nous nous intéressons dans un premier temps au développement d'une méthodologie qui peut guider l'automatisation de la manutention dans chaque atelier de production. Il s'agit alors de répondre à plusieurs questions du type :

- Quelles sont les contraintes à considérer pour l'installation d'un AMHS dans un atelier?
- Quel est le type d'AMHS à intégrer dans chaque atelier?
- Comment gérer les nouveaux processus de transport et de stockage automatisés dans l'unité de fabrication?

Cette méthodologie doit garantir une intégration efficace et structurée de l'AMHS au niveau global de la *wafer fab*. Elle sera appliquée dans le cas de l'unité de fabrication 200mm de STMicroelectronics à Rousset.

## Planning de déploiement d'un AMHS dans les ateliers de la wafer fab

Une fois identifié le type d'AMHS grâce à la méthodologie, nous visons dans un deuxième temps à déterminer l'ordre de déploiement le plus pertinent dans les différents ateliers de

production. L'objectif est de déterminer l'atelier pilote (le premier atelier) pour l'intégration de l'AMHS. Ensuite, il s'agit de trouver l'ordre des autres ateliers dans le planning de déploiement. Pour y parvenir, nous définissons une approche efficace de résolution qui permet d'évaluer la robustesse du planning proposé face à une incertitude de la décision.

# Méthodologie pour la conception d'un AMHS dans un atelier de production

Les deux premières phases de la thèse permettront de définir les lignes stratégiques du projet dans la globalité de l'unité de fabrication de semi-conducteurs. Cependant, sur un niveau tactique, dans la dernière phase de la thèse, on abordera un problème à un niveau local (atelier) : la conception d'un AMHS dans un atelier existant et fonctionnel. Il s'agit de développer une méthodologie pour la conception (ou *design*) d'un AMHS (nombre de véhicules, politique de gestion, dimensionnement des espaces de stockage...) qui tienne compte de la particularité de chaque atelier de production. Cette phase de la thèse doit répondre à des questions de type :

- Comment fournir un *design* optimisé d'un AMHS dans un atelier de production?
- Comment évaluer la robustesse du *design* d'un AMHS?

En plus de l'aspect académique, la nature de cette thèse CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la REcherche) nous engage à fournir des résultats industriels. Cependant, il est important de souligner que les trois grands objectifs à atteindre dans ce travail de thèse répondront à des besoins de recherche dans l'industrie de semi-conducteurs : l'automatisation de la manutention dans les *wafer fabs*. Ainsi, nous gardons un aspect générique dans les approches de résolution et dans les méthodologies à proposer afin de permettre leur application pour résoudre des problèmes similaires dans d'autres unités de fabrication.

## 1.3 Structure du manuscrit de thèse

Á la suite de ce chapitre d'Introduction Générale, le contexte industriel et la description du problème sont exposés au Chapitre 2.

Le chapitre 3 est dédié à l'état de l'art sur les systèmes de manutention dans les unités de fabrication de semi-conducteurs. Nous présentons et analysons la littérature scientifique qui s'intéresse à l'automatisation des systèmes de manutention dans les unités de fabrication existantes et fonctionnelles et nous nous positionnons par rapport à la littérature en montrant les contributions de la thèse.

Dans le chapitre 4, nous proposons une méthodologie pour l'intégration d'un AMHS dans une anciennes *wafer fabs*. Cette proposition tiendra compte des limitations des travaux présentés dans la revue de la littérature. Les résultats de l'application de la méthodologie dans le cas industriel sont présentés.

Le chapitre 5 traite du développement d'une démarche d'aide à la décision pour fournir un ordre de déploiement d'un AMHS dans une unité de production de semi-conducteurs. Nous procédons aussi à l'application de la démarche pour le cas industriel sous étude.

Dans le chapitre 6, nous proposons une méthodologie pour le *design* d'un AMHS dans un atelier de production d'une *wafer fab* 200mm de l'ancienne génération.

Les chapitres 7 et 8 présentent les résultats de l'application de la méthodologie proposée dans le chapitre précédent pour la conception d'un AMHS dans un atelier de photolithographie. Nous nous intéressons à l'automatisation du transport et du stockage d'une ressource auxiliaire appelée réticule au Chapitre 7, puis à celle des lots au Chapitre 8.

Une conclusion synthétisant les travaux réalisés dans cette thèse ainsi que les perspectives de recherche sont résumés à la fin du manuscrit.

## Chapitre 2

## Contexte industriel et description du problème

Ce chapitre présente le processus général de fabrication d'une puce électronique. Les systèmes de manutention automatisés (*Automated Material Handling System (AMHS)*) utilisés dans les unités de fabrication de semi-conducteurs (appelé *wafer fabs*) pour la logistique interne sont décrits. Ensuite, nous décrivons et analysons le cas industriel d'étude : l'usine de STMicroelectronics de Rousset. Nous terminons le chapitre par une description de la problématique à traiter dans le cadre de cette thèse.

### 2.1 Fabrication de semi-conducteurs

Le processus de fabrication de semi-conducteurs est l'un des plus complexes existant de nos jours. Le silicium est l'élément de base dans la fabrication des composants microélectroniques. Ce matériau présenté en Figure 2.1 possède des caractéristiques électriques très particulières. En particulier elle a u ne conductivité intermédiaire entre celles des métaux et celle des isolants.

Pour la fabrication de puces (*Integrated Circuit IC*), le silicium est cristallisé et conditionné pour obtenir des barreaux cylindriques souvent de 200mm à 300mm de diamètre. Ces barreaux sont ensuite coupés en tranches d'environ un millimètre d'épaisseur. Des puces sont fabriquées sur cette surface par la réalisation de plusieurs centaines d'étapes d'opérations. Ces étapes de fabrication sont regroupées en deux grandes parties : le *Front-End* et le *Back-End*. Dans cette thèse, on s'intéresse qu'au processus de *Front-End*.



Figure 2.1 – Silicium sous forme de plaquettes et de barres.

#### 2.1.1 Front-End

C'est l'étape la plus complexe, la plus longue et la plus coûteuse dans la fabrication des *ICs*.

#### 2.1.1.1 Processus de fabrication

Ce processus se divise encore en deux grandes sous-étapes : Front-End Of Line (FEOL) et Back-End Of Line (BEOL). Le Front-End consiste à appliquer plusieurs traitements sur une plaquette de silicium (wafer), pour fabriquer des millions de composants électroniques (FEOL) et ensuite les interconnecter (BEOL). Les opérations élémentaires les plus communes dans la majorité des technologies sont les suivantes :

- **Oxydation.** La plaquette est oxydée sur toute la surface en utilisant des fours spécifiques,
- **Dépôt de résine.** Une couche de résine photosensible (qui se transforme sous l'action de la lumière) est déposée sur la couche d'oxyde,
- Photolithographie. Pour réaliser une opération de photolithographie, un masque ou réticule est utilisé. Le réticule est aligné sur la plaquette et est exposé à une source de rayonnement. Ainsi, la résine s'imprime comme une pellicule photographique dans les zones laissées libres par le réticule. La Figure 2.2 présente le processus de photolithographie.

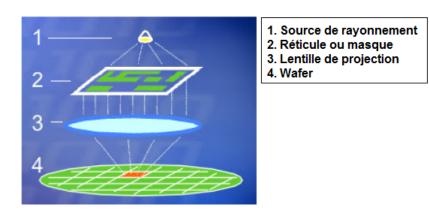


Figure 2.2 – Processus de photolithographie.

- **Développement.** Cette opération sert à enlever la résine qui a pris la lumière à travers le réticule ;
- **Gravure.** Cette opération consiste à enlever l'oxyde laissé libre par la résine sans attaquer le silicium initial en utilisant des acides ou des gaz;
- **Dopage.** Pour modifier les caractéristiques électriques du silicium, des dopants chimiques sont introduits sur la surface du *wafer* par le biais d'un processus d'implantation ionique ou diffusion thermique.

Ces étapes sont répétées plusieurs fois selon la technologie (complexité) du produit final. Malgré l'évolution technologique du processus du *Front-End*, l'environnement de production constitue encore un challenge pour plusieurs raisons [76]

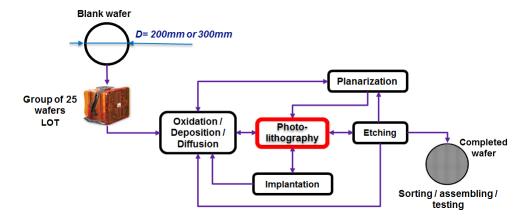
- La diversité des produits. Pour rentabiliser leurs activités, les fabricants de semiconducteurs sont obligés d'avoir une large gamme de produits afin de s'adapter aux progrès technologiques rapides dans la microélectronique;
- La nature réentrante des flux de production. La gamme opératoire pour la fabrication d'un produit nécessite le retour des wafers plusieurs fois à la même opération. Cela conduit à un flux de production réentrant. Ainsi, beaucoup d'efforts sont orientés vers l'optimisation de la planification de la production et à l'ordonnancement.
- Le grand nombre d'étapes de production. La fabrication d'un produit pourrait nécessiter plus de 700 opérations avec des durées de traitement très variables (de quelques minutes à plus de 8 heures). Ainsi, le temps de cycle d'un produit va de 4 à 12 semaines.
- Le grand besoin en manutention. Le transport, le stockage et le chargement/déchargement des produits sur les équipements de production sont des opérations répétitives et très lourdes au vu de la volumétrie générée par le processus de production.

Les caractéristiques présentées ci-dessus forment entre autres des contraintes fortes internes au processus de fabrication en *Front-End*. De plus, des facteurs externes augmentent le niveau de complexité. En effet, d'une part, une grande flexibilité est nécessaire afin de suivre l'évolution rapide dans la conception des nouveaux produits et s'adapter aux besoins des clients [66]. D'autre part, les fabricants des semi-conducteurs sont face à une incertitude du

marché et à une fluctuation de la demande [30]. Ainsi, dans cet environnement très complexe et incertain, l'objectif principal est d'optimiser l'utilisation des équipements de production qui sont des ressources extrêmement coûteuses.

Durant le processus de *Front-End*, les *wafers* sont regroupés dans des containers de capacité maximale de 25 *wafers*, appelés «Lot». Les lots subissent un enchaînement de plusieurs processus (Photolithographie, *Chemical Mechanical Planarization (CMP)*, *Implantation*, ...) dans la *wafer fab* qui est décomposée en plusieurs ateliers de production.

La Figure 2.3 schématise le flux ré-entrant de production (le fait de passer plusieurs fois par le même atelier ou la même machine) dans une *wafer fab*. Chaque atelier de production est composé d'un ou plusieurs groupements d'équipements ou baies (*bays*) spécialisés dans des opérations bien déterminées. Des équipements de métrologie sont aussi prévus dans les ateliers afin de réaliser plusieurs types de contrôles par des mesures. Selon le diamètre du *wafer*, on distingue principalement deux types d'unités de fabrication de semi-conducteurs : les *wafer fabs* 200mm et les *wafer fabs* 300mm. La transition du diamètre du *wafer* du 200mm à 300mm a nécessité l'automatisation des opérations de manutention à cause de l'augmentation du poids des lots [83]. Cependant, les unités de fabrication 200mm sont quant à elles souvent restées **manuelles ou semi-automatiques**.



**FIGURE 2.3** – Exemple d'un flux de production dans une wafer fab [75].

#### 2.1.1.2 Processus de photolithographie

La Figure 2.3 montre aussi que l'étape de photolithographie est critique puisqu'elle est répétée plusieurs fois. Ainsi, l'atelier de photolithographie est souvent le goulot d'étranglement (ou *bottleneck*) de la *wafer fab* [3]. Cela est dû à trois principales raisons :

- La réentrance des flux de production. Pour avoir le produit final (la puce), un *wafer* peut retourner plusieurs fois (jusqu'à 40 fois) à l'atelier de photolithographie. Cela conduit à un niveau d'encours ou *Work-In-Progress* (*WIP*) élevé dans l'atelier,
- Le nombre limité d'équipements de production à cause de leurs coûts élevés. En particulier, les équipements de haute technologie et à forte cadence comme les steppers

sont extrêmement chers. De plus, ces équipements ne sont pas souvent capables de réaliser tous les types de traitements. Ainsi, on parle de la notion de qualification d'une machine à traiter un produit;

L'utilisation d'un réticule comme une ressource auxiliaire [9]. Les réticules sont très chers et souvent uniques. Ainsi, leur gestion est très complexe non seulement en terme de planification, mais aussi en terme de manutention. En particulier, en présence d'un système de manutention manuelle, le transport et le stockage d'une grande quantité de réticules (parfois plus de 5000 réticules) constitue une problématique qui impacte de façon directe la performance du processus de production dans l'atelier de photolithographie.

Les ateliers de photolithographie sont souvent équipés d'un module de production (appelé *Track* et *Stepper*) qui permet d'enchaîner trois sous-étapes : le dépôt de la résine, l'exposition au rayon lumineux en utilisant le réticule et enfin le développement.

Pour résumer, le *Front-End* permet d'avoir les puces sur la surface de la plaquette de silicium à travers un processus de fabrication très complexe. Ensuite, des tests électriques (*Electrical Wafer Sort EWS*) sont effectués pour identifier les puces défectueuses. Une fois passé l'EWS, les plaquettes sont envoyées à la phase du *Back-End*.

#### 2.1.2 Back-End

Cette étape permet la transition d'une simple puce sur la surface d'un *wafer* à un *IC* prêt à l'utilisation. Ce processus n'est pas souvent réalisé en Europe. Les étapes du *Back-End* sont les suivantes :

- **Découpage :** il s'agit de séparer les puces par une opération de sciage de haute précision,
- **Collage ou soudage :** les bonnes puces identifiées à l'*EWS* sont soudées sur un support métallique (grille),
- **Câblage :** cette étape consiste à établir les connexions nécessaires entre la puce et la grille pour la transmission des signaux électriques,
- **Encapsulage :** l'ensemble (grille et puces) est encapsulé dans un boitier approprié pour le protéger de l'environnement externe,
- **Test et marquage :** le circuit est de nouveau testé, puis un marquage qui contient les indications nécessaires (logo du fabricant, fonctionnalité...) est réalisé sur le boitier.

## 2.1.3 Performance du processus de fabrication

Dans cette section, nous présentons les indicateurs pertinents les plus souvent utilisés.

#### 2.1.3.1 Temps de cycle

C'est la durée total de fabrication d'un *wafer*. Il reflète la différence entre la date de démarrage du lot en production dans la *wafer fab* et sa date de sortie.

Le temps de cycle ( $Cycle\ Time(CT)$ ) inclut le temps des opérations avec et sans valeur ajoutée. Ainsi, il s'agit d'un temps de cycle théorique ( $CT_{TH}$ ) qui contient les temps de traitement sur les équipements de production et les temps des opérations d'inspection indispensables. Le transport, le stockage, la non qualité et l'attente des lots sont des opérations sans valeur ajoutée qui dégradent considérablement le temps de cycle.

La baisse du temps de cycle permet le lancement des nouveaux produits sur le marché, de maitriser le niveau d'encours de production ainsi que d'améliorer le rendement de l'unité de fabrication. Pour réduire le CT, l'effort s'oriente en général vers les activités sans valeur ajoutée qui représentent entre 50% et 90% du temps de cycle total [77]. Le X-factor est aussi utilisé pour mesurer la capacité de livrer les produits à temps. C'est le rapport entre le CT et le  $CT_{TH}$  [69]. Ainsi, plus le X-factor est faible, plus la wafer fab est fluide.

#### 2.1.3.2 Niveau d'encours (ou Work-In-Progress (WIP)

C'est le nombre de plaquettes dans l'unité de fabrication à un instant donné. Le niveau de WIP est considéré comme une photographie instantanée du nombre de wafers en activité de production ou non-production (transport, stockage, attente...). Le WIP représente du capital immobilisé dans l'unité de fabrication qui peut diminuer la trésorerie de l'entreprise.

En régime stationnaire, la loi de Little 2.1 [63] relie le *WIP* moyen au *CT* moyen par la formule suivante :

$$WIP = \lambda CT \tag{2.1}$$

Avec  $\lambda$  est le taux d'arrivé moyen ou flux moyen des lots par unité de temps. D'après la formule 2.1, plus le WIP est élevé, plus le CT est long. A l'inverse, on pourrait diminuer le CT en baissant le WIP indépendamment du flux de sortie. Le WIP est un élément très critique qui pourrait impacter la performance de l'unité de fabrication.

#### 2.1.3.3 Débit (ou throughput)

C'est le nombre de produits finis (wafers) à la sortie d'un atelier de production ou de la wafer fab par unité de temps. Le throughput reflète le niveau de saturation de l'unité de fabrication et la stabilité du processus de production. En effet, lorsque le taux de lancement (ou Start) des wafers est proche du taux de production, le système est stable et ne génère pas de lots qui s'accumulent devant les machines. Cependant, cette hypothèse est loin d'être réaliste à cause de la variabilité dans le processus de fabrication de semi-conducteurs due aux pannes des machines, mixte de produits, temps de traitement, ... Cette variabilité conduit forcement à des temps d'attente des lots et par la suite à une augmentation du niveau du WIP.

#### 2.1.3.4 Temps effectif de production

Cet indicateur, appelé *Overall Equipement Effectiveness* (*OEE*), est relatif à chaque équipement de production dans l'unité de fabrication. Il représente globalement la performance de l'utilisation des machines [47]. L'*OEE* permet de mesurer le temps en marche de la machine qui a servi à produire des bons lots. Ainsi, l'objectif est de garder un *OEE* par équipement le plus élevé possible [93].

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la manière dont les *wafers* sont transportés et stockés entre les différentes étapes de production en *Front-End*.

## 2.2 Systèmes de manutention dans les wafer fabs

Les nombreuses étapes de fabrication (plus de 600 étapes selon la technologie) d'une puce sont réalisées sur des familles de machines spécialisées qui sont localisées dans des différents ateliers de la *wafer fab*. On parle alors d'une route à suivre pour chaque lot selon le produit qu'il contient. Par définition, le système de manutention assure la gestion des lots entre deux étapes de traitement sur les machines. Il permet le déplacement physique du lot (le transport), son rangement temporaire (le stockage) et son chargement/déchargement sur le port d'un équipement.

Ainsi, d'une manière générale, la manutention est un processus sans valeur ajoutée et n'est qu'un service pour la production. Étant donné la complexité du processus de fabrication, une attention particulière est accordée au transport et stockage des matériels dans les *wafer fabs*.

## 2.2.1 Transport

Les wafer fabs 200mm, considérées de nos jours comme de l'ancienne génération (ou legacy) comparées à celle de 300mm, ont été conçues et optimisées pour produire un grand volume avec une faible variété de produits (High Volume-Low Mix (HVLM)) [35]. Ainsi, un faible niveau d'automatisation a été initialement considéré dans ces unités de fabrication. Le transport des lots et des réticules est habituellement réalisé par des opérateurs qualifiés pour ces tâches. En pratique, les lots sont transportés d'un endroit à un autre par fournée ou batch sur des chariots de convoyage. Cette solution de transport manuelle engendre souvent des problématiques de nature :

- **Humaine :** la répétitivité des tâches et l'effort physique réalisé par les opérateurs augmentent les risques des Troubles MusculoSquelettiques (TMS);
- Opérationnelle : il s'agit des erreurs et les accidents lors du transport d'un lot.

Malgré ces critiques, le transport manuel dans les unités de fabrication de semi-conducteurs permet d'avoir une grande flexibilité. En effet, une équipe d'opérateurs peut rapidement s'adapter à une fluctuation de la demande de transport entre les ateliers de production. Cela permet d'absorber les pics d'activité grâce au savoir-faire des opérateurs. Cependant, dans

cette configuration de transport manuel, il est souvent très compliqué d'analyser la performance du processus de transport à travers des indicateurs clairement définis (temps de transport, durée de transport, distance totale parcourue, nombre d'opération de transport/jour). Généralement, c'est la performance du processus de production (throughput, utilisation des machines, temps de cycle...) qui est évaluée. Ainsi, l'identification d'une dégradation du processus de production due au transport manuel dans ce cas n'est pas facile. Cependant, le fait de transporter les lots par *batch* sur des chariots peut augmenter le temps de cycle. En effet, les opérateurs attendent souvent le remplissage du chariot pour réaliser le transport. Ainsi, en plus du temps de transport, un lot peut subir un temps d'attente sur le chariot.

L'augmentation du diamètre du *wafer* de 200mm à 300mm a conduit à l'automatisation des opérations de manutention. Un AMHS est prévu dès la phase de construction des *wafer fabs* 300mm à cause du poids du lot (qui peut atteindre 10 kg) et des longues distances à parcourir. De plus, l'évolution dans le domaine de semi-conducteurs du *HV-LM* vers *LV-HM* est une raison supplémentaire qui a poussé la migration vers le transport automatisé dans les *wafer fabs* modernes.

#### 2.2.1.1 Types de système de transport automatisé

Les solutions les plus utilisées pour le transport automatisé dans l'industrie de semiconducteurs sont présentées dans la Figure 2.4

- *Rail Guided Vehicles (RGV)*. C'est un système composé d'un réseau de rails au sol avec une flotte de véhicules (ou robots) qui circulent pour transporter les lots (Figure 2.4a).
- Automated Guided Vehicles (AGV). Il s'agit des véhicules qui naviguent au sol de façon autonome pour assurer la livraison des lots (Figure 2.4b). Généralement, les RGVs et AGVs possèdent des bras robotisés pour le chargement/déchargement des lots. Ainsi, ces bras permettent une longue portée et une flexibilité dans la manutention. La capacité de transport par robot peut être supérieure à un seul lot.
- *Overhead Hoist System (OHS)*. C'est un système composé d'un réseau de rails au sol avec une flotte de véhicules qui circulent pour transporter les lots (Figure 2.4c).
- Overhead Hoist Transport (OHT). Il s'agit d'une flotte de véhicules qui circulent au long d'un réseau de rails au plafond (Figure 2.4d), Les systèmes OHS et OHT possèdent une partie mobile qui permet de charger/décharger les lots. Comparés aux RGV et AGV, ces systèmes sont beaucoup plus rapides, mais ils possèdent une capacité de transport d'un seul lot à la fois par véhicule.

Les différents types d'AMHS présentés dans la Figure 2.4 sont totalement autonomes et permettent le transport d'un lot ou d'un réticule sans aucune intervention physique d'un opérateur. Dans le cas des unités de fabrication où le transport est manuel ou semi-automatique, on peut trouver d'autres types de systèmes de transport. Il s'agit des systèmes de convoyage automatique qui nécessitent l'intervention d'un opérateur pour réaliser la tâche de transport. La Figure 2.5 présente un véhicule guidé par un opérateur et un convoyeur. Dans cette figure,

c'est l'opérateur qui charge et décharge le lot sur le système de transport. Le véhicule est utilisé par les opérateurs pour acheminer les lots. D'autre part, les convoyeurs sont des systèmes très utilisés dans les *wafer fabs* 200mm pour parcourir des longues distances. Malgré sa vitesse relativement faible, un tel système possède une grande capacité et fiabilité.



(a) RGV (source MURATEC).



(c) OHS (source MURATEC).



**(b)** *AGV* (*sources KUKA*, *OMRON*).

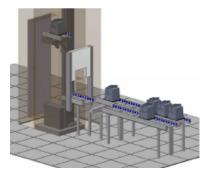


(d) OHT (source MURATEC).

FIGURE 2.4 – Différents types d'AMHS.



(a) Véhicule guidé(source DAIFUKU).



**(b)** *Un convoyeur.* 

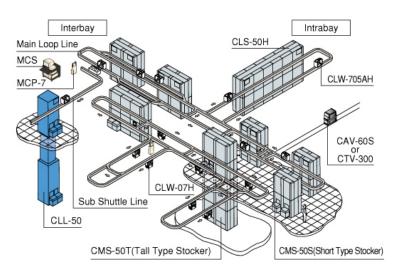
Figure 2.5 – Autres types de système de transport.

#### 2.2.1.2 Les configurations de transport

La configuration des systèmes de manutention automatisés dans les unités de fabrication de semi-conducteurs a évolué d'un transport séparé inter-baie/intra-baie (*inter-bay/intra-bay*) vers un transport unifié [7] :

- 1. Transport inter-bay/intra-bay. La Figure 2.6 présente un exemple d'une configuration inter-bay/intra-bay. Il s'agit d'un système OHT composé d'une partie de rail inter-bay pour le transport des lots entre les bays et une autre partie intra-bay pour le transport des lots dans un même baie. Cette configuration nécessite l'utilisation des zones de stockages pour le rangement des lots entre les deux phases de transport. Pour le transport inter-bay, deux types de configurations sont utilisées :
  - Configuration en spine. Il s'agit d'une boucle unidirectionnelle qui est installée dans l'unité de fabrication au niveau du couloir central pour relier tous les baies (voir Figure 2.7a),
  - *Configuration en périmètre*. Elle est composée de deux boucles de rails de sens inverse pour contourner le périmètre de la *wafer fab* (voir Figure 2.7b).

Les deux systèmes (*intra-bay* et *inter-bay*) sont souvent physiquement séparés et on parle ainsi du transport non-unifié.



**FIGURE 2.6 –** Configuration de l'AMHS : transport inter-bay/intra-bay.

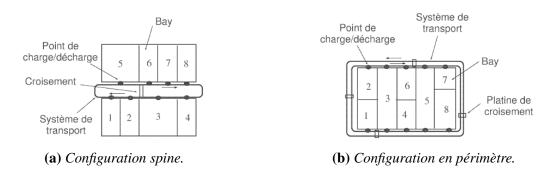


Figure 2.7 – Configuration spine et en périmètre [77].

2. Transport unifié. La Figure 2.8 présente une configuration de transport unifié. Dans cette configuration toutes les boucles de rails sont parfaitement interconnectées. Ce système commence à remplacer le système *Inter-bay/Intra-bay*. Elle autorise le transport des lots directement à partir de n'importe quel point source vers un autre point destination dans l'unité de fabrication sans l'obligation de passer par un stockage intermédiaire.

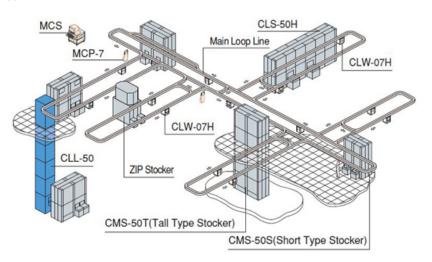


FIGURE 2.8 – Configuration de l'AMHS: transport unifié.

3. Transport partiellement unifiée (ou liée). Il existe également des configurations qui combinent les deux systèmes de base (unifié, *inter-bay/intra-bay*). C'est une configuration spécifique qui consiste à un système séparé *inter-bay/intra-bay* avec quelques *bays* connectés (ou unifiés). Généralement, cela s'explique par une évolution possible dans l'intégration d'un AMHS dans l'unité de fabrication. Dans certains cas, on pourrait aussi identifier plusieurs solutions de transport (*AGV*, *OHT*, *RGV*, ...) avec des systèmes d'échanges. Ces derniers permettent la connexion automatisée et le transfert des items entre les différents types d'AMHS.

Dans le cas d'un système de transport manuel, la configuration de transport dépend de la stratégie globale de transport définie dans la *wafer fab*. En général, elle est plutôt proche d'une configuration *inter-bay/intr-bay* que d'une configuration de transport unifié.

#### 2.2.2 Stockage

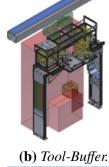
La complexité du processus de fabrication de semi-conducteurs (flux réentrant, grand nombre d'étapes de production...) conduit à une variabilité en termes de temps de traitement des lots, temps de disponibilité de la machine, etc. La maitrise de cette variabilité dans l'unité de fabrication est un objectif difficile à atteindre. Au niveau de la planification de la production, l'inadéquation temporelle entre la fin d'une tâche et le début d'une autre sur un même équipement nécessite le stockage des lots en attendant leurs dates de traitement. En effet, vue la capacité finie du système de production, les lots sont souvent en concurrence pour une même machine. Ainsi, des files d'attentes sont créées en face des équipements de production.

La Figure 2.9 présente les solutions de stockage les plus utilisées dans les wafer fabs. Chaque solution possède des avantages et des inconvénients. En général, les systèmes de stockage sont évalués selon trois critères principaux : la capacité de stockage, le temps d'accès à un lot dans le stockeur et l'encombrement. Le choix du système de stockage est fortement lié au système de transport considéré dans l'unité de fabrication. Rappelons que les anciennes wafer fab 200mm sont souvent équipées d'une manutention manuelle. Ainsi, les étagères (Figure 2.9a) sont typiquement utilisées pour le stockage de lots et même des réticules. Un grand stockeur (Figure 2.9d) pourrait être aussi utilisé dans ce type d'unité de fabrication à condition d'avoir la place suffisante au sol.

Dans les *wafer fabs* modernes et équipées d'un système de transport automatisé, des solutions de stockage automatisées sont utilisées tels que les stockeurs d'équipements (ou *Tool-Buffer*) (Figure 2.9b), les stockeurs unitaires au plafond (ou *Overhead Hoist Buffers* (*OHB*)) (Figure 2.9c).



(a) Etagères.





(c) OHB.



(d) Stockeur.

**FIGURE 2.9** – Principales solutions de stockages dans les wafer fabs.

Le stockage des lots entre les étapes de fabrications dans la *wafer fab* est une donnée incontournable. Le temps d'accès à un lot dans le système de stockage est un temps de non-production (sans valeur ajoutée). Une mauvaise maitrise de ce temps peut conduire à une perte de productivité. C'est le cas par exemple d'un retard de livraison d'un lot sur le port de chargement d'une machine dû au temps d'accès au système de stockage.

Bien que les opérations de manutention sont considérées sans valeur ajoutée, le système de manutention est un facteur clé qui peut à tout moment devenir un élément limitant pour la production. Pour éviter ce problème, il faut garantir une meilleure performance du transport et du stockage à travers des indicateurs clés. Dans la section suivante, nous présentons les principales mesures de performance adoptées dans les unités de fabrication de semi-conducteurs pour évaluer la performance des systèmes de manutention.

#### 2.2.3 Performance d'un système de manutention

Dans les *wafer fabs* 200mm qui utilisent un système de manutention manuel, il est très compliqué de définir des indicateurs pour évaluer la performance des opérations de transport et de stockage réalisées par les opérateurs. Dans le cas d'un *AMHS*, le suivi et l'évaluation de la performance est beaucoup plus facile.

#### 2.2.3.1 Principaux indicateurs de performance du transport automatisé

Les indicateurs de performance les plus connus dans la fabrication de semi-conducteurs sont :

- **2.2.3.1.1 Temps total de livraison.** C'est le temps écoulé entre la génération de la demande (ou requête) de transport et l'instant où le lot arrive à destination. Ce paramètre est généralement défini par sa moyenne et son écart type. Il se décompose en :
  - Temps d'affectation ou d'assignation d'un véhicule à une requête de transport. Ce paramètre est un indicateur clé de la santé d'un AMHS. Il dépend principalement de la politique de gestion des véhicules et la taille de la flotte. La maîtrise de la variabilité du temps d'affectation est une problématique dans les unités de fabrication de semiconducteurs [83].
  - Temps du déplacement du robot ou véhicule pour récupérer un lot (déplacement à vide),
  - Temps de prise (*pick-up*) et temps de dépôt (*drop-off*) : ce sont souvent des paramètres fixes qui dépendent de la technologie d'un AMHS,
  - Temps de transfert du lot par un véhicule jusqu'à sa destination,
- **2.2.3.1.2** Nombre de requêtes de transport réalisées. La capabilité d'un AMHS à suivre le rythme de production et à absorber les pics de demande de transport peut être mesurée par le nombre total de requêtes de transport réalisées par les véhicules par unité de temps. On peut aussi définir le pourcentage de requêtes de transport réalisées par rapport au nombre total généré.
- **2.2.3.1.3** Taux d'utilisation des robots ou véhicules. C'est le rapport entre le temps de déplacement d'un véhicule (à charge et à vide) sur le temps total observé. Pour tenir compte des déplacements à vide, généralement, on définit le taux de charge de la flotte ( $T_{charge}$ ) par la formule suivante :

$$T_{charge} = \frac{Tempstotalencharge}{Tempstotaldesdplacements}$$
 (2.2)

Le temps total en charge représente le temps total du déplacement d'un véhicule transportant un lot. Cet indicateur permet d'une part d'évaluer la pertinence de la politique de gestion de la flotte, et d'autre part, il met en évidence les problèmes possibles de déséquilibrage de charge entre les véhicules. Le taux de charge de la flotte permet aussi de mieux optimiser le nombre de véhicules. Le fait d'avoir trop de véhicules se traduit par une sous-utilisation de la flotte et vice-versa.

#### 2.2.3.2 Principaux indicateurs de performance du stockage

La performance d'un processus de stockage automatisé est souvent évaluée en utilisant deux indicateurs clés :

- Taux d'utilisation des espaces de stockage : c'est le rapport entre le temps d'occupation de l'espace de stockage sur le temps total observé. Cet indicateur permet aussi de détecter les zones de stockages occupées depuis long moment. Cela permet également d'évaluer la charge de stockage (déséquilibrage) et d'identifier les lots bloqués en attente *hold* qui occupent inutilement un emplacement de stockage.
- Temps d'accès : il représente le temps nécessaire pour déposer un lot dans un emplacement de stockage ou le récupérer. Le temps d'accès est une caractéristique de chaque système de stockage. En effet, pour un AMHS à base d'un OHT, le stockage d'un lot dans un OHB ne prend que 8 à 10 secondes. Cependant, dans le cas d'un stockeur, le temps d'accès est beaucoup plus élevé et il dépend du temps de cycle du système interne au stockeur (peut dépasser les 4 minutes).

Pour résumer, nous soulignons que malgré la nature des opérations de manutention (sans valeur ajoutée), les performances du processus de transport et stockage ont un impact direct sur celles du processus de production. En effet, une dégradation du temps de livraison ou du temps d'accès par exemple peut conduire à une baisse de productivité. Dans l'industrie de semi-conducteurs, étant donné le coût des équipements de production, il n'est pas question que le processus de transport et/ou stockage deviennent un élément limitant pour la production.

Après avoir décrit de façon générale le contexte de la thèse, nous présentons dans la section suivante le partenaire industriel.

# 2.3 Présentation et analyse du cas industriel : la wafer fab 200mm de STMicroelectronics à Rousset

Dans cette thèse CIRFE, le partenaire industriel est l'entreprise « STMicroelectronics » . Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication de semi-conducteurs. Les travaux de thèse ont été réalisés en partenariat avec le site de production localisé à Rousset. Ce site est spécialisé dans le processus *Front-End* avec une unité de test *EWS*. Notre travail s'inscrit dans le cadre d'un grand projet de modernisation de cette unité de fabrication d'ancienne génération (*wafer fab* 200mm).

#### 2.3.1 Ancienne (ou legacy) wafer fab 200mm

Comme la plupart des autres *wafer fab* 200mm, l'unité de fabrication de Rousset a été conçue et optimisée à l'origine pour une production de type *HV-LM*. Ainsi, initialement un système de manutention manuelle a été prévu. Ce sont des opérateurs qui réalisaient le transport, le stockage et le chargement/déchargement des lots sur les machines de production. Le paramétrage des machines est aussi fait par les opérateurs. On parle ainsi d'un niveau très basique d'automation dans le processus de fabrication.

Pour suivre les évolutions dans l'industrie de semi-conducteurs, l'unité de fabrication de Rousset a été ensuite équipée d'une interface standard de chargement des machines, appelé *Standard Mechanical InterFace* (SMIF). L'intérêt était de réduire les contaminations et améliorer la qualité de production. Cela a été accompagné d'un changement de l'architecture de la *wafer fab* et une évolution du niveau d'automation dans le processus de fabrication. Actuellement, l'unité de fabrication à Rousset opère avec ce mode semi-automatique. Les opérations de transport et de stockage des lots sont réalisées par des opérateurs. Les chargements et déchargements des lots sur les équipements de production sont faits à travers des SMIFs. Cela permet un paramétrage automatique de la machine et le lancement du traitement d'un lot sans l'intervention d'un opérateur en adoptant un processus *Drop-and-go i.e* dépôt. La Figure 2.10 schématise le *layout* simplifié de la *wafer fab* 200mm de STMicroelectronics à Rousset.

L'unité de fabrication possède plus de 400 équipements de production qui sont séparés sur deux niveaux (ou deux étages) :

- Niveau 1. Il contient les ateliers suivants : Implantation (« Implant »), Photolithographie (« Photo »), Photolithographie-Métrologie («Photo-Metro»), Gravure (« Etch-FSI »), Diffusion/CVD2 («Diff/CVD2»), «PVD», « CVD1/PVD-MTU » et «CMP/CU»,
- Niveau 2. Il ne contient que deux ateliers : Scrubber/D0 (défectivité).

Un système de convoyeur automatique assure le transport des lots entre les deux niveaux. Pour chaque atelier, nous présentons dans la Figure 2.10 les familles d'équipements de production. D'après le *layout*, il est évident que l'unité de fabrication a subit des évolutions dans le temps pour s'adapter à un nouveau contexte de production (*LV-HM*). On constate que certains ateliers, qui sont spécialisés pour une opération, contiennent des baies qui réalisent des opérations complètement différentes. C'est le cas par exemple de l'atelier de diffusion contenant la baie « *C0* », qui devrait plutôt être rattaché à l'atelier *CVD1*. Cela est dû principalement à un problème d'espace dans la salle blanche (coût très chers du mètre carré) qui a été conçu à l'origine pour supporter une certaine capacité de production. On observe alors un impact sur l'agencement des machines qui ne sont pas souvent alignées avec les couloirs étroits.

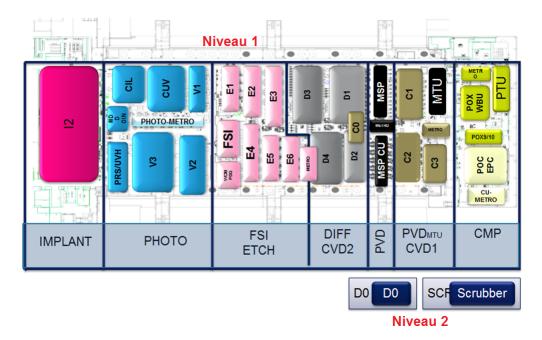


FIGURE 2.10 – Plan de la wafer fab 200mm de STMicroelectronics à Rousset.

Le nombre d'étapes de production peut dépasser les 700 étapes pour un produit donné selon sa complexité. Un lot peut visiter le même atelier plus de 20 fois. Enfin, il est important de souligner que l'activité de production dans la *wafer fab* de Rousset est principalement basée sur la performance humaine. Aujourd'hui, malgré le fait qu'elle soit considérée comme une ancienne unité de fabrication, le site de production de Rousset possède une assez bonne performance.

#### 2.3.2 Stratégie de transport et de stockage

Les opérations de transport des lots dans un même atelier et entre les ateliers du même niveau de la *wafer fab* sont réalisées par les opérateurs. Les lots sont souvent transportés par batch en utilisant des chariots (voir Figure 2.11). De même, les réticules dans l'atelier de photolithographie qui sont regroupés dans des containers (capacité maximale de 5 réticules), appelé *Pods*- réticule, sont gérés manuellement par les opérateurs. Le transport des lots entre les deux niveaux de l'unité de fabrication est réalisé en utilisant le convoyeur automatique.

Pour le stockage des lots, la solution actuelle consiste à utiliser des étagères fixes et d'autres déplaçables (voir Figure 2.12). Les étagères sont reparties un peu partout dans la salle blanche et occupent un espace important sur le sol. On distingue deux types de systèmes de stockage :

— Système de stockage d'entrées/sorties. Il sert à stocker les lots à l'entrée ou à la sortie d'un atelier ou d'une baie. Il s'agit souvent des étagères fixées au sol ou dans le mur avec une capacité suffisante pour un niveau d'activité normal. Des étagères mobiles, appelées Bottleneck Shelves, sont utilisées afin de fournir plus de capacité en cas de

pics du WIP à l'entrée ou à la sortie d'un atelier ou d'un baie,

— Système de stockage de proximité. Il est caractérisé par une capacité faible comparé au système de stockage d'entrée/sortie. Il s'agit de petites tables qui sont localisées à proximité de chaque équipement de production pour pré-acheminer les lots. Elles permettent aussi l'échange de deux lots sur le port d'une machine.





convoyage des lots.

FIGURE 2.11 - Chariot de FIGURE 2.12 - Étagère de stockage des lots.

La stratégie de transport et de stockage définie actuellement dans la wafer fab de Rousset vise principalement à faciliter les tâches de manutention pour les opérateurs et par suite à éviter les retards dus au stockage et/ou transport des lots. Le processus de transport et stockage manuel est basé sur la notion de préacheminement des lots. En effet, un lot n'est presque jamais transporté en une seule fois à sa destination finale. Il doit passer par au moins une étape de stockage (d'entrée/sortie et/ou de proximité) en fonction de sa priorité et la nature du flux de production. L'idée consiste à rapprocher le lot de la machine qualifiée en attendant sa date de traitement planifiée pour minimiser le risque de retard.

Suite à des visites de terrain, nous pouvons confirmer que la configuration du transport dans l'unité de Rousset n'est pas une configuration unifiée. Il s'agit plutôt d'un transport séparé inter-bay/intra-bay:

- Inter-bay. Ce sont des opérateurs qui se chargent uniquement du transport des lots entre les ateliers ou les baies (opérateurs de convoyage) pour les stocker sur les étagères d'entrée/sortie. Le nombre d'opérateurs nécessaire est calculé en fonction du niveau d'activité dans la wafer fab;
- *Intra-bay*. Ce sont des opérateurs affectés à chaque atelier ou baies pour transporter les lots du système de stockage d'entrée/sortie vers les tables de proximité.

A la fin du traitement, le lot est transporté de nouveau vers un système de stockage d'entrée/sortie, puis vers sa prochaine destination. Moins fréquent, si la destination du lot est une machine de la même baie, le lot peut être directement transporté au système de stockage de proximité. Prenons l'exemple de l'atelier de photo-métro, un lot suit souvent deux opérations de contrôle et de mesure qui s'enchaînent sur deux équipements différents de la même baie. Dans ce cas particulier, les opérateurs essayent de transporter le lot directement de la première machine vers la deuxième.

Enfin, il est important de souligner que le processus décrit ci-dessus représente une règle générale. En effet, en manque de précision sur le processus de transport (temps de déplacement, trajectoire, capacité de transport...), il est très compliqué de couvrir tous les cas particuliers des opérations de transport et stockage manuel dans l'unité de fabrication.

#### 2.3.3 Nécessité de modernisation des wafer fabs 200mm

Les entreprises spécialisées dans la fabrication de semi-conducteurs sont toujours à la recherche des nouvelles solutions pour améliorer la rentabilité de leurs processus de production. Dans ce contexte, un projet de modernisation de la *wafer fab* 200mm à Rousset a été lancé. C'est un grand projet en termes d'investissements et il représente un défi à relever pour garantir la pérennité du site de Rousset dans le futur. Ainsi, plusieurs sous-projets sont en cours visant à l'amélioration de la performance du processus de production et l'augmentation de la capacité de l'unité de fabrication. On cite à titre d'exemple quelques projets :

- L'achat et la qualification des nouveaux équipements de production,
- L'optimisation de l'ordonnancement des lots dans certains ateliers de production,
- La robotisation du chargement/déchargement de quelques équipements de production.
- L'intégration d'un système de manutention automatisé dans les différents ateliers de l'unité de fabrication est le projet qui possède la part la plus importante du budget total. Nous revenons en détails sur ce projet dans la section suivante.

#### 2.4 Description du problème

Dans le cadre de cette thèse, on s'intéresse à la problématique d'intégration d'un AMHS dans une ancienne *wafer fab*. Pour le site de Rousset, c'est un projet qui représente un risque pour les décideurs de l'entreprise. En plus de son ampleur financière, c'est un défi de point de vue technique d'automatiser les opérations de manutention dans un environnement de travail prévu pour une manutention manuelle. Particulièrement dans un contexte très complexe et dynamique tels que la fabrication de semi-conducteurs, des contraintes supplémentaires s'ajoutent comme par exemple :

- **Les contraintes du** *layout***.** La disposition des machines dans la salle blanche peut impacter la performance d'un système de manutention automatisé,
- **Les contraintes physiques.** La hauteur du plafond par exemple peut empêcher l'intégration d'un *OHT* dans un atelier de production,

— Les contraintes techniques. La technologie des machines (accessibilité au port de chargement par exemple) est un facteur déterminant pour l'interfaçage entre un AMHS et les équipements de production, ...

Étant donné ces contraintes, une attention très particulière doit être accordée à la spécificité de chaque atelier de production avant l'installation d'un AMHS. Les anciennes unités 200mm nécessitent un travail de préparation et une démarche bien structurée pour automatiser la manutention.

La migration de la manutention manuelle à l'AMHS dans la *wafer fab* 200mm de ST-Microelectronics à Rousset est principalement justifiée par des motivations humaines, opérationnelles et financières. Ce besoin en automatisation a été déjà confirmé par les ingénieurs et les décideurs de l'entreprise.

#### 2.4.1 Motivations humaines

Il s'agit des Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) pour les opérateurs. Les réticules sont regroupés dans des conteneurs qui pèsent jusqu'à 5 kg. De même, un lot pèse jusqu'à 6 kg. Ainsi, la manipulation des lots et des réticules, la répétition des gestes et les distances à parcourir pour amener les lots ou les réticules à leurs destinations tout au long de la journée engendrent des TMS chez les opérateurs. De plus, vue la complexité des flux de production, le transport des lots et réticules nécessite une attention continue des opérateurs afin de livrer le bon lot et/ou réticule au bon endroit au bon moment (sans retard).

#### 2.4.2 Motivations opérationnelles

Les analyses de temps de transport et du processus de stockage dans la *wafer fab* ont montré que la manipulation manuelle des lots et des réticules peut devenir des éléments limitants de la performance du processus de production :

- Dégradation de l'*OEE* des équipements de production : un retard de livraison d'un lot ou un réticule conduit à des temps d'attentes d'un équipement,
- Dégradation de la qualité : en plus des chocs et de la vibration, les accidents dus à la manutention manuelle des lots engendrent de la non qualité (des scraps) et parfois des contaminations dans la salle blanche ([89], [106]).

Dans le cadre de la modernisation de l'unité de fabrication de semi-conducteurs à Rousset, un projet d'optimisation de l'ordonnancement des lots sur les machines est en cours. L'objectif est de migrer des règles basiques de dispatching des lots vers un outil de planification (ou *Scheduler*) afin d'optimiser les flux de production. Un tel outil de planification va permettre une prédiction des dates de livraisons des lots et des réticules. Par conséquence, la manutention manuelle des lots et réticules s'avère très délicat, voire impossible. Cela peut aussi justifier l'intégration d'un AMHS.

2.5 Conclusion 27

#### 2.4.3 Motivations financières

Dans la fabrication de semi-conducteurs, pour être rentable il faut produire le maximum de bonnes puces. Le prix d'un *wafer* de 200mm en fin de traitement est d'environ \$3000. Ainsi, la fiabilité du processus de manutention est un facteur important pour réduire le coût de production. Dans le cas de la *wafer fab* de STMicroelectronics à Rousset, l'intégration d'un AMHS dans les ateliers de production peut améliorer le rendement du processus de fabrication et réduire le temps de cycle.

#### 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments de base nécessaires pour ce travail de thèse. D'abord, nous avons décrit l'industrie de semi-conducteurs, en particulier le processus de fabrication des puces en mettant l'accent sur le processus du *Front-End*. Cela permet de cerner la complexité des phases de production. Nous avons également souligné l'importance du transport et du stockage des lots et avons caractérisé les différents systèmes de manutention les plus couramment utilisés dans les *wafer fabs*.

Ensuite, nous avons montré la particularité du cas industriel à étudier dans cette thèse. En effet, nous avons fourni une description générale de l'ancienne *wafer fab* 200mm de Rousset. La particularité industrielle touche le système de manutention actuel dans l'unité de fabrication. Il s'agit d'un transport et stockage manuel réalisé par les opérateurs en se basant sur leurs expériences et des règles très basiques.

La dernière partie du chapitre a été consacrée à la description de la problématique à traiter. Il s'agit de fournir une aide à la décision pour l'intégration d'un AMHS dans une legacy wafer fab en prenant la wafer fab 200mm de Rousset comme cas d'étude.

### Chapitre 3

### État de l'art

Pour montrer nos contributions, il est important de présenter un état de l'art sur les travaux de recherche qui ont abordé des problématiques liées à celles traitées dans cette thèse. La première partie de ce chapitre est une revue de la littérature composée de 3 parties :

- L'automatisation de la manutention dans les wafer fabs 200mm,
- Le design des systèmes de manutention automatisés,
- Les méthodes d'aide à la décision des problèmes en multicritères car plusieurs critères entrent en compte (coût, impact humain...) dans un projet d'automatisation de la manutention.

Ensuite, sur la base des limites des articles de recherche présentés et analysés dans l'état de l'art, la deuxième partie situe nos travaux et indique les contributions de la thèse.

#### 3.1 Revue de la littérature

De façon générale, les problématiques liées à la manutention dans les unités de fabrication de semi-conducteurs ont attiré l'attention des chercheurs. On peut trouver plusieurs revues de la littérature qui ont abordé ce sujet ([2], [78]). Dans cette section, nous présentons d'abord les travaux de recherche qui traitent du problème d'automatisation de la manutention dans les wafer fabs 200mm. Ensuite, les articles visant le design des systèmes de transport et de stockage automatisés sont analysés. La dernière partie de cette section est dédiée aux méthodes d'aide à la décision multicritères.

# 3.1.1 Automatisation de la manutention dans les unités de fabrication 200mm

D'après Carriker [13], l'automatisation des unités de fabrication est l'une des solutions les plus utilisées pour améliorer la flexibilité des systèmes manufacturiers complexes. En particulier, dans l'industrie de semi-conducteurs. Heinrich et al. [35] ont confirmé que pour les wafer fabs 200mm, une automatisation complète et rigoureuse de l'unité de fabrication est considérée comme une solution efficace pour faire face à la migration de High Volume-Low Mix (HV-LM) vers High Mix-Low Volume (HM-LV). Les auteurs ont présenté l'amélioration

des performances de la production obtenues au fabricant de semi-conducteurs *Infineon Com*pany grâce à l'automatisation des opérations de manutention.

Dans la littérature, il y a très peu d'articles portant sur le problème de l'automatisation de la manutention dans une wafer fab existante et fonctionnelle. Le travail de Pillai [89] décrit, d'une part, les besoins d'automatisation des opérations de manutention dans les unités de fabrication de semi-conducteurs. D'autre part, l'auteur a fourni les prérequis nécessaires pour garantir la réussite d'un projet d'intégration d'un Automated Material Handling System (AMHS) (analyse des flux matériels, demande en transport et stockage...). De plus, l'utilisation de la simulation dans la phase du design a été fortement recommandée. Plus tard, Subramaniam et Kryder [107] ont présenté l'évolution des générations des systèmes de manutention dans les wafer fabs 200mm de Intel Company. Ils ont décrit les avantages et les défis dans l'intégration et le maintien d'un AMHS. Murray et al. [81] ont utilisé une approche basée sur la simulation pour évaluer l'impact de l'intégration d'un AMHS dans une wafer fab. Les auteurs ont considéré des indicateurs liés au processus de production (temps de cycle, taux de start et capacité). La rentabilité du projet a été aussi étudiée par l'analyse du taux d'intérêt. Les résultats ont clairement montré les avantages de l'AMHS par rapport à la manutention manuelle. Cependant, il est important de souligner que les auteurs n'ont envisagé qu'une configuration de transport inter-bay avec un layout "parfait" des équipements de production. Cela n'est pas toujours le cas dans des wafer fabs de l'ancienne génération (200mm par exemple). Miller et al. [71] ont montré le défi de la mise en œuvre d'un AMHS dans une usine de fabrication 200mm de IBM Company. L'article décrit les contraintes techniques et les problèmes pratiques pour l'installation d'un tel système. À travers leurs expériences, les auteurs ont confirmé que l'automatisation de la manutention présente une opportunité importante pour améliorer les performances des wafer fabs. Néanmoins, les avantages potentiels d'une telle opportunité doivent être préalablement quantifiés. On note qu'il s'agit d'une présentation très technique d'un projet d'intégration d'un AMHS dans une wafer fab. Ainsi, les auteurs ont mis l'accent sur la phase d'installation sans aborder les détails du choix et du design du système. Carriker [13] a abordé le problème de conversion des wafer fabs 200mm pour supporter le processus manufacturier des plaquettes 300mm dans le cas de Intel Company. Ainsi, l'auteur a souligné les défis techniques à relever pour l'intégration d'un AMHS.

Un problème similaire à celui traité dans cette thèse a été abordé dans [32]. Les auteurs ont présenté l'automatisation des opérations de manutention dans une wafer fab 200mm. Une approche pour la migration de la manutention manuelle à une manutention totalement automatisée a été proposée. La stratégie développée permet dans un premier temps d'identifier et de quantifier le besoin d'automatisation en termes d'impact sur le rendement et la qualité des produits. Ensuite, les auteurs ont abordé les changements fondamentaux nécessaires au niveau des équipements et du processus de fabrication afin d'atteindre une manutention automatisée dans l'unité de fabrication. La dernière phase de la stratégie présente l'approche utilisée pour le déploiement de l'automatisation dans la wafer fab. Dans cette phase, les auteurs ont choisi une automatisation par étape en fonction des groupements d'équipements de

production.

Pour résumer, la Table 3.1 présente les articles ayant examiné l'automatisation de la manutention dans les unités de fabrication de semi-conducteur200mm.

**TABLE 3.1** – Articles traitant de l'automatisation de la manutention dans les unités de fabrication de semi-conducteurs 200mm

| Auteurs            | Année | Thématique  |
|--------------------|-------|---|
| Pillai [89]        | 1990  | Les prérequis nécessaires pour garantir la réussite d'un pro- |
|                    |       | jet d'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication.    |
| Subramaniam et     | 1997  | Les avantages et les défis dans l'intégration et le maintien  |
| Kryder [107]       |       | des AMHS dans une unité de fabrication (cas de Intel Com-     |
|                    |       | pany).  |
| Guldi et al. [32]  | 1999  | Approche systématique pour l'automatisation de la manu-       |
|                    |       | tention.  |
| Murray et al. [81] | 2000  | L'évaluation de l'impact de l'intégration d'un AMHS sur la    |
|                    |       | performance de l'unité de fabrication.                        |
| Miller et al. [71] | 2004  | Le défi de la mise en œuvre d'un AMHS dans une unité de       |
|                    |       | fabrication (cas de IBM Company).                             |
| Carriker [13]      | 2004  | Le défi technique dans l'intégration d'un AMHS pendant la     |
|                    |       | migration de la génération des unités 200 mm vers les 300     |
|                    |       | mm (cas de Intel Comany).                                     |

L'analyse de la Table 3.1 permet de souligner que l'automatisation de la manutention dans les unités de fabrication de semi-conducteurs 200mm est un sujet qui a été peut aborder dans la littérature. Nous notons aussi que les travaux de recherche qui ont traité du sujet se situent globalement entre 1990 et 2004. Cela s'explique par le fait que cette période représente :

- L'arrivée de la nouvelle génération des unités 300mm. Cela a poussé certains fabricants de semi-conducteurs à transformer leurs unités 200mm afin de produire des plaquettes de 300mm. Par suite, étant donné le poids d'un lot, l'automatisation de la manutention était un élément indispensable [13].
- La migration d'une production de masse (HV-LM) vers une production personalisée (LV-HM). C'est un changement qui a obligé les fabricants de semi-conducteurs à moderniser les unités 200mm en intégrant par exemple un AMHS afin d'améliorer les performances de la production ([32], [89]).

À notre connaissance, malgré le retour des unités de fabrication 200mm expliqué en introduction générale (voir Chapitre 1), aucun article récent (entre 2004-2018) n'a évoqué la problématique d'automatisation de la manutention des unités de fabrication 200mm. Ces unités ont été considérées comme de l'ancienne génération et en fin de vie. Ainsi, l'effort des chercheurs s'est plutôt orienté vers l'optimisation de la manutention automatisée dans les unités

modernes 300mm ([84], [15]).

La section suivante présente les travaux de recherche axés sur la conception (*design*) d'un AMHS dans les unités de fabrication de semi-conducteurs. On s'intéresse d'abord aux systèmes de transport automatisé, puis aux systèmes de stockage automatisé.

#### 3.1.2 Design des systèmes de manutention automatisés

#### 3.1.2.1 Transport automatisé

De façon générale, plusieurs articles ont abordé les problèmes de *design*, d'optimisation et d'amélioration des performances d'un AMHS dans les usines de fabrication 300mm [15]. Cependant, il y a peu d'articles traitant ces problèmes pour les *wafer fabs* 200mm qui fonctionnent souvent en mode manuel [118].

Un système de transport automatisé est principalement composé d'une flotte de véhicules qui se déplacent et transportent les lots d'un point d'origine vers une destination. Ainsi, le *design* et l'optimisation de ce système sont basés sur trois éléments : la taille de la flotte, la politique de dispatching des véhicules et la configuration du *layout*.

- **3.1.2.1.1 Taille de la flotte de véhicules :** une partie importante de la littérature a examiné le problème d'optimisation du nombre de véhicules qui est un facteur impactant la performance d'un AMHS [8], [29]. Pour déterminer la taille optimale de la flotte de véhicules, on distingue deux principales approches : approche analytique et approche de simulation [55] :
  - 1. Approche analytique : les méthodes analytiques consistent à déterminer le nombre de véhicules sur la base d'un modèle de programmation mathématique ou des formules mathèmatiques [23]. Dans les travaux de [70] et [92], la taille de la flotte est déterminée en fonction des déplacements des véhicules résumés dans une table (From/To) où les fréquences de transport entre les points sources et destinations sont spécifiées. Cependant, cette approche ne tient pas souvent compte de la variabilité du processus de transport issue des problèmes de congestion par exemple. Il s'agit donc d'une estimation du nombre de véhicules nécessaires pour satisfaire le besoin de transport. Dans un contexte de déplacement idéal (sans congestion par exemple), plusieurs travaux de recherches ont utilisé le concept de file d'attente (Queuing concept) pour déterminer le nombre de véhicules pour un AMHS à base d'un système OHT [83] ou des AGVs [20]. L'idée consiste à modéliser l'état et l'emplacement des véhicules sous la forme d'une chaîne de Markov pour estimer la capacité d'un AMHS. Bien que ce type de modèle possède une grande précision, le nombre d'états croît de façon exponentielle avec la taille du problème à traiter. De plus, les modèles de file d'attente sont souvent développés avec un ensemble d'hypothèses simplificatrices qui ne sont pas toujours réalistes dans un environnement complexe comme la fabrication de semi-conducteurs :

- **Hypothèses du système :** ce sont les hypothèses liées au système modélisé telles que (1) le nombre moyen de requêtes de transport est constant, (2) les temps de déplacement et de chargement/déchargement sont déterministes et (3) chaque machine possède une file d'attente à capacité infinie.
- **Hypothèses mathématiques :** elles sont nécessaires pour la résolution du modèle mathématique, par exemple (1) les requêtes de transport se produisent selon un processus de *Poisson* et (2) la charge du travail est répartie uniformément entre les véhicules.
- 2. **Approche de simulation :** cette approche est la plus utilisée pour le *design* et l'optimisation d'un AMHS, en particulier pour déterminer le nombre de véhicules. Typiquement, les modèles de simulation à évènements discrets sont combinés avec des méthodes d'optimisation pour déterminer la taille de la flotte.

Dans ce contexte, Lin et al. [60] ont proposé un nouveau concept d'un AMHS avec une configuration de transport connecté (ou unifié). Entre autres, ce travail a analysé l'impact du nombre de véhicules sur la performance du système de transport dans une wafer fab 300mm simplifiée. Dans un autre article, Lin et Huang [61] ont examiné l'effet du nombre de véhicules d'un AMHS dans l'atelier de photolithographie. Les auteurs ont adopté une approche de simulation-optimisation basée sur la méthode OCBA (Optimal Computing Budget Allocation) afin de trouver l'affectation optimale des ressources dans l'atelier et déterminer le nombre d'itérations nécessaires. Une approche combinée de simulation-optimisation a été aussi utilisée dans [16] et [15]. Les auteurs ont proposé une formulation multi-objectifs du problème d'optimisation couplée avec un modèle de simulation à événements discrets. Récemment, Ndiaye et al. [84] ont traité le problème de conception d'un AMHS à base des AGVs pour le transport des réticules dans un atelier de photolithographie d'une wafer fab 300mm. Une approche de simulation-expérimentation a été utilisée pour optimiser le nombre de robots AGV. Les auteurs ont réalisé plusieurs expérimentations pour évaluer l'impact du nombre de véhicules sur la performance du processus de transport. Il est important de souligner que, dans le cas de la méthode de simulation-expérimentation proposée, l'augmentation du nombre de variables conduit à un nombre élevé d'itérations.

Bien que la simulation puisse fournir des évaluations précises de la performance de l'unité de fabrication y compris la contribution d'un AMHS, cette méthode est souvent critiquée pour son coût élevé et les temps de modélisation et d'exécution longs [83].

Nous présentons, dans la Table 3.2, une sélection de travaux de recherche qui ont traité de la détermination du nombre de véhicules dans les unités de fabrication de semi-conducteurs.

Ndiaye et al. [84]

| Auteurs                   | Année | Approche util        | isée        |
|---------------------------|-------|----------------------|-------------|
| Maxwell et Muckstadt [70] | 1982  | Matrice (From/To) et |             |
| Egbelu [23]               | 1987  | formulation          | Ammaaha     |
| Rajotia et al. [92]       | 1998  | mathématique         | Approche    |
| Nazzal et McGinnis [83]   | 2007  | Concept de file      | analytique  |
| Choobineh et al. [20]     | 2012  | d'attente            |             |
| Lin et al. [60]           | 2010  | Combiner avec        |             |
| Lin et Huang [61]         | 2014  |                      | Annracha    |
| Chang et al. [16]         | 2014  | l'optimisation       | Approche de |
| Chang et al. [15]         | 2014  | mathématique         | simulation  |
| Huang et Borst [38]       | 2016  |                      | Simulation  |
| Lin et al. [60]           | 2005  | Combiner avec        | 1           |

expérimentation

2016

**TABLE 3.2 –** Sélection d'articles traitant de la détermination de la taille de flotte de véhicules pour un AMHS dans les unités de fabrication de semi-conducteurs.

Entre les années 80 et 90, les travaux de recherche ont utilisé des approches analytiques basées sur la matrice de flux (From/To) et des formulations mathématiques relativement simples pour déterminer le nombre de véhicules [70]. Cela peut s'expliquer par la faible puissance des calculs à cette période. Il s'agit alors d'estimer la taille de la flotte de véhicules en considérant plusieurs hypothèses simplificatrices comme par exemple la non prise en compte de la congestion des véhicules. Ensuite, le concept de file d'attente est introduit pour avoir des approches analytiques plus sophistiquées qui modélisent le processus de fabrication sous la forme d'une chaîne de Markov afin de trouver la taille de la flotte de véhicules [83]. Les approches de simulation sont plus récentes dans les travaux de recherche qui visent à optimiser le nombre de véhicules. Il s'agit souvent de combiner la simulation à évènements discrets avec l'expérimentation [60]. Récemment, plusieurs articles ont fourni des approches intégrant de l'optimisation et de la simulation pour résoudre ce type de problème de façon plus efficace.

- **3.1.2.1.2** Politiques de dispatching des véhicules : lorsqu'une requête de livraison est générée, le système de transport s'occupe de trouver un véhicule libre à affecter à cette requête. Entre temps, la requête est mise dans une liste d'attente. La politique de dispatching consiste à choisir un véhicule de la flotte et l'affecter à une requête de transport en attente. De façon générale, selon [24], on distingue deux grandes catégories de politiques de dispatching :
  - Politique de dispatching avec une «vision lot» : ce cas se présente quand une seule requête de livraison est générée. Par suite, le système qui pilote l'AMHS choisit un véhicule libre. Plusieurs politiques sont utilisées telles que : le véhicule le plus proche

- (Nearest Vehicle (NV)), la politique aléatoire (Random), le véhicule resté inactif le plus longtemps (Longest Idle Vehicle), Fastest Vehicle (FV)...
- **Politique de dispatching avec une vision « véhicule » :** c'est le cas d'un seul véhicule libre et plusieurs requêtes de livraison en attente. Ainsi, le véhicule doit choisir une requête selon la politique de dispatching telle que : *First Come First Serve (FCFS)*, la politique aléatoire, *Shortest Travel Distance (STD)*...

Plusieurs travaux de recherche se sont focalisés sur l'optimisation du dispatching des véhicules afin d'améliorer la performance du transport automatisé dans les wafer fabs. Kumar [52] et Li et al. [58] ont confirmé qu'une politique de dispatching optimisée peut améliorer les performances de l'unité de fabrication de semi-conducteurs. Dans d'autres travaux, une nouvelle classe de règles de dispatching a été développée par Lu et al. [65] pour minimiser le temps moyen (Fluctuation Smoothing for Mean Cycle Time (FSVCT)) et la variance (Fluctuation Smoothing policy for Variance of Cycle Time (FSVCT)) du temps de cycle. Plus tard, Kobza [50] a proposé un modèle de chaine de Markov à temps discrets pour déterminer le temps de déplacement à vide et à charge des véhicules pour une flotte d'AGVs. Ce modèle est basé sur la matrice de flux (from/to) et le temps de livraison entre les ateliers de production. Plusieurs combinaisons des politiques de dispatching (le véhicule le plus proche, le véhicule le plus rapide...) ont été testées. L'auteur a confirmé que le temps de déplacement à vide est fonction du nombre de véhicules et de la politique de dispatching. Liao et Fu [59] ont présenté une approche en deux phases fondée sur la simulation pour une affectation et un dispatching dynamique des véhicules dans une wafer fab 300mm. L'objectif est de satisfaire les exigences de transport tout en minimisant les temps de livraison. Dans le cadre d'une politique de service minimum, Kiba et al. [47] et Ben Chaabane et al. [14] ont abordé le problème d'équilibrage de la flotte de véhicules en déterminant un nombre minimal et maximal de véhicules disponibles à considérer dans chaque partie de la wafer fab pour pouvoir répondre rapidement aux requêtes de livraison. Huang et al. [39] ont étudié le problème d'affectation des véhicules dans une wafer fab 300mm. Le problème a été formulé comme un problème combiné de simulation-optimisation dans un cadre conceptuel de résolution. Les résultats ont montré que l'affectation proposée par le cadre conceptuel peut doubler la capacité de transport d'un AMHS. Dans le cadre d'un travail de design d'un AMHS pour le transport des réticules dans un atelier de photolithographie, Ndiaye et al. [84] ont évalué plusieurs politiques de dispatching en utilisant de la simulation à évènements discrets et de l'expérimentation.

D'après la revue de la littérature présentée ci-dessus, on note que la simulation est souvent l'outil le plus utilisé pour l'évaluation de la performance d'une politique de dispatching. Cet outil fournit une représentation fidèle du système réel avec une grande flexibilité dans la modélisation. Cela est fortement recommandé dans le cas des systèmes manufacturiers complexes à grande échelle tel que la fabrication de semi-conducteurs.

Pour résumer, la Table 3.3 présente une sélection d'articles ayant étudié les politiques de dispatching des véhicules dans les unités de fabrication de semi-conducteurs. La revue de la littérature montre clairement que cette problématique continue à attirer l'attention des

chercheurs. Les travaux de recherche comparent souvent plusieurs politiques ou règles de dispatching selon plusieurs indicateurs de performance liés au processus de transport et/ou à la production. Ainsi, la plupart de travaux de recherche examinent des politiques de plus en plus élaborées en combinant des règles basiques (NV, FSVCT...) et sans tenir compte de certaines limites techniques dans la mise en place de ces politiques ([59], [39]). En effet, le fournisseur du système de pilotage d'un AMHS ne permette pas toujours d'intégrer certaines règles de dispatching. Dans ce cas, il donne la main sur le paramétrage de gestion des véhicules. Ainsi, certains articles comme par exemple [47] et [100]) proposent l'optimisation des paramétrages des politiques de dispatching imposées ([47], [100]).

**TABLE 3.3 –** Sélection d'articles traitant des politiques de dispatching des véhicules pour un AMHS dans les unités de fabrication de semi-conducteurs.

| Auteurs            | Politique de dispatching               | Indicateurs de performance          |
|--------------------|--|-------------------------------------|
| Lu et al. [65]     | - Fluctuation Smoothing for Mean       | - Temps de cycle                    |
|                    | Cycle Time (FSVCT)                     |                                     |
|                    | - Fluctuation Smoothing policy for Va- |                                     |
|                    | riance of Cycle Time (FSVCT)           |                                     |
| Kobza [50]         | - Nearest Vehicle (NV)                 | - Temps de déplacement à vide,      |
|                    | - Fastest Vehicle (FV)                 | - Temps total de livraison,         |
| Lin et al. [62]    | - First-encounter-first serve (FEFS)   | - Temps de livraison                |
|                    | - Nearest Vehicle (NV)                 | - Temps d'attente                   |
|                    | - First Come First Serve (FCFS),       | - Utilisation de la flotte de véhi- |
|                    |  | cules                               |
|                    |  | - Nombre de livraison               |
| Liao et Fu [59]    | - Longest Waiting Time (LWT)           | - Temps de livraison                |
|                    | - Farthest Job First (FJF)             | - Nombre de livraison               |
|                    | - Combiner LWT et FJF                  |                                     |
| Kiba et al. [47]   | - Politique de service minimum         | - Temps de cycle                    |
|                    |  | - Productivité                      |
|                    |  | - Temps d'échange de lot sur un     |
|                    |  | équipement                          |
| Huang et al. [39]  | - First-encounter-first serve (FEFS)   | - Temps de livraison                |
|                    | - Longest Waiting Time (LWT)           | - Débit total (Throughputs)         |
|                    | -Combiner: Shortest Travel Distance    |                                     |
|                    | (STD) et Nearest Vehicle (NV)          |                                     |
| Ben Chaabane et    | - Politique de service minimum         | - Temps de livraison                |
| al. [14]           |  |                                     |
|                    | (Low Water Mark (LWM), High Water      |                                     |
|                    | Mark (HWM))                            |                                     |
| Ndiaye et al. [84] | - First Come First Serve (FCFS),       | - Temps total de livraison          |
|                    | - Nearest Vehicle (NV)                 | - Utilisation de la flotte de véhi- |
|                    |  | cules                               |
|                    | - Shortest Travel Distance (STD)       |                                     |
|                    | - Combiner FCFS, NV et STD             |                                     |
| Schmaler et al.    | - Politique de service minimum         | - Temps de livraison                |
| [100]              |  |                                     |
|                    | (Low Water Mark (LWM), High Water      | - Temps d'attente                   |
|                    | Mark (HWM))                            |                                     |

**3.1.2.1.3** Configuration du *layout*: la configuration ou disposition du *layout* est un élément déterminant qui impacte la performance du transport. Dans la littérature, plusieurs articles ont abordé cet aspect en utilisant soit des modèles analytiques, soit des modèles de simulation [60], [87].

Dans ce contexte, Pierce et Stafford [88] ont évalué trois types de configurations de rails : en spine, en périmètre et une configuration spécifique. Leurs travaux ont montré que la configuration spécifique proposée donne un gain de 16% en termes de temps de livraison com-

parée à la configuration en spine, puis en dernier la configuration en périmètre. Cela est dû principalement au fait que la distance entre les stockeurs a été réduite dans le cas de la configuration spécifique avec des raccourcis de rails (shortcuts). Dans le cas d'une wafer fab 300mm, Kurosaki et al. [53] ont étudié l'impact de la liaison entre le système de transport inter-bay et intra-bay. Les résultats ont montré que le temps de livraison dans les deux cas (liaison et non liaison) dépend fortement du trafic des véhicules. Peters et Yang [87] ont présenté une procédure basée sur la modélisation en réseau des flux afin de résoudre le problème de design d'un AMHS à base d'un OHT. Les auteurs ont considéré les deux configurations : en spine et en périmètre. Les résultats ont confirmé que la procédure proposée permet d'avoir un design efficace d'un AMHS afin d'améliorer les performances de l'unité de fabrication en terme de throughput. Plus tard, Ting et Tanchoco [111] ont utilisé une approche analytique pour étudier deux types de configuration : en spine et en double spine. L'objectif est de minimiser le temps de livraison dans le cas d'une wafer fab 300mm. Récemment, Kim et al. [49] ont comparé deux types de configuration du layout : à distance minimale et à distance maximale dans le cas d'une unité de fabrication de semi-conducteurs. Les auteurs ont validé l'efficacité de la disposition à distance minimale comparée à celle à distance maximale. Cependant, les résultats de la simulation ont montré que, en cas de grand volume de flux, la configuration à distance minimale perd de son efficacité. Cela est dû aux problèmes de congestion qui dégradent rapidement le temps de livraison.

À travers les articles présentés ci-dessus, nous soulignons l'importance de la configuration du *layout* dans le *design* d'un système de transport automatisé dans les unités de fabrication de semi-conducteurs. La configuration du *layout* a un impact direct sur les performances du processus de transport : temps de livraison, taux de congestion, charge des véhicules. . . Cependant, les travaux de recherche qui ont abordé cet aspect se concentrent souvent sur le cas d'une *wafer fab* 300mm typique et à petite échelle. À notre connaissance, aucun article n'a traité ce problème dans le cas d'une *wafer fab* 200mm qui n'a pas été initialement conçue pour recevoir du transport automatisé.

#### 3.1.2.2 Stockage automatisé

En plus de la production et du transport, le processus de stockage génère un impact significatif sur l'ensemble des performances de l'unité de fabrication. En effet, il répresente une partie intégrante du système de manutention automatisé afin de faire l'intermédiaire entre le transport et la production. Cela a été confirmé par exemple dans les travaux de [46].

De façon générale, un nombre très limité d'articles se sont focalisés sur l'étude de la performance du processus de stockage [41]. Cardarelli et Pelagagge [12] ont travaillé sur le *design* et l'optimisation de la gestion des systèmes *inter-bay* et le processus de stockage. Des méthodes probabilistes ont été utilisées pour modéliser l'aspect dynamique du processus de production. Pillai et al. [90] ont présenté l'évolution du *design* des systèmes de stockage automatisé à partir des *wafer fabs* 200mm vers celles 300mm pour le cas de *Intel Company*. Les auteurs ont montré l'existance d'une corrélation entre la solution de transport et le *design* du système de stockage. De plus, ils ont fourni des recommandations pour optimiser

l'emplacement des stockeurs et gagner en flexibilité. Mackulak et Savory [67] ont étudié les temps de livraison à partir de deux configurations de stockage (distribuée et centralisée). Les résultats de la simulation ont montré que la configuration distribuée avait un temps moyen de livraison réduit par rapport à la configuration centralisée. De plus, il y avait moins de variabilité dans l'utilisation des robots internes au stockeur dans le cas de la configuration distribuée comparée à celle centralisée. Jimenez et al. [42] ont présenté une règle de décision pour sélectionner le rail avec la distance de transport minimale entre un point source et un stockeur dans une configuration de transport non unifiée. Les indicateurs de performance ont été évalués en utilisant la simulation à événements discrets.

Bien qu'il existe plusieurs types de systèmes de stockage dans les wafer fabs (voir Chapitre 2), la plupart des travaux de recherche ont principalement étudié le stockage en *Inter-bay* en utilisant des stockeurs de grande capacité. Dans ce contexte, les problèmes liés au design des stockeurs ont été abordés en utilisant souvent des approches de simulation à évènements discrets pour optimiser la taille des stockeurs [12], leur configuration [73] et décider de leur emplacements [90]. Malgré sa grande capacité, un stockeur peut facilement devenir un élément limitant dans l'unité de fabrication à cause du temps d'accès élevé. Dans les wafer fabs modernes, les stockeurs unitaires de type Overhead Hoist Buffer (OHB) sont de plus en plus utilisés. Étant donné que les OHBs sont placés au niveau des rails au plafond, ils sont directement accessibles par des véhicules du système OHT. Ainsi, une gestion efficace du stockage conduit à une réduction du temps d'accès par rapport aux grands stockeurs. Dans la littérature, cette solution de stockage n'est pas encore beaucoup étudiée. Par exemple, une nouvelle disposition des rails et des espaces de stockages (OHBs et stockeurs) appelés Dual Unified OHT (DUO) ont été proposés par [34]. Les résultats de la simulation ont montré une amélioration du temps de livraison et une réduction des problèmes de congestion dans le cas du DUO comparé à la disposition classique des rails. Dauzère-Pérès et al. [22] ont traité un problème d'affectation des OHBs aux équipements de production dans une wafer fab 300mm. Un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes (Mixed Integer Linear Programming (MILP)) a été proposé pour ce problème. Cependant, le temps de résolution du MILP est élevé et le modèle proposé ne peut pas être directement utilisé pour des instances réelles de grande taille.

Pour résumer, la Table 3.4 présente une sélection d'articles qui ont traité des problèmes liés au stockage dans les unités de fabrication de semi-conducteurs.

**TABLE 3.4** – Sélection d'articles traitant des systèmes de stockages dans les unités de fabrication de semi-conducteurs.

| Auteurs            | Système de     | Thématique  |
|--------------------|----------------|---|
|                    | stockage       |   |
| Cardarelli et Pe-  |                | Design et optimisation du transport inter-atelier et du processus         |
| lagagge [12]       |                | de stockage en tenant compte de la production                             |
| Pillai et al. [90] |                | L'évolution du design des systèmes de stockage automatisé à               |
|                    |                | partir des wafer fabs 200mm vers les unités 300mm, et la cor-             |
|                    | Stockeur       | rélation entre la solution de transport et le <i>design</i> du système de |
|                    |                | stockage  |
| Mackulak et Sa-    |                | Comparaison de deux configurations de stockage (distribuée ou             |
| vory [67]          |                | centralisée)  |
| Yang et al. [119]  |                | Détermination les dimensions de stockage                                  |
| Murray et Miller   |                | Comparaison de deux configurations de stockage de réticules               |
| [80]               |                | (distribuée ou centralisée)   |
| Jang et al. [41]   |                | Modélisation analytique et analyse des stockeurs                          |
| Wiethoff and       |                | Evaluation de l'impact des règles de production sur la gestion du         |
| Swearingen [116]   |                | stockage  |
| Miller et al. [73] |                | Comparaison entre deux configuration de stockage (distribuée,             |
|                    |                | centralisée).   |
| Wu et al. [117]    |                | Modélisation des stockeurs en réseau de <i>Petri</i> .                    |
| Rust et al. [96]   | Stockeur et    | Evaluation de plusieurs stratégies de stockage et analyse de l'im-        |
|                    | espace de      | pact sur le transport   |
| Han et al. [34]    | stockage       | Evaluation d'une nouvelle disposition de rails et des espaces de          |
|                    | unitaire       | stockages   |
| Fischmann et al.   | (OHB)          | Comparaison de différentes stratégies de stockage                         |
| [26]               |                |   |
| Dauzère-Pérès et   | Espace de sto- | Optimisation de la gestion des espaces de stockages                       |
| al. [22]           | ckage unitaire |   |
|                    | (OHB)          |   |

La sélection d'articles présentés dans la Table 3.4 confirme l'attention accordée par la communauté scientifique aux problématiques liées au *design* et à l'optimisation du processus de stockage dans les unités de fabrication de semi-conducteurs. En particulier, une grande partie des travaux de recherche se focalisent sur le système de stockage le plus utilisé : les grands stockeurs. Cependant, un nombre limité d'articles traite des problèmes qui intègrent les stockeurs unitaires (OHBs). En effet, cette solution de stockage est plus récente comparée aux grands stockeurs et n'est utilisée que dans le cas d'un AMHS à base d'un OHT.

De façon globale, il s'avère que l'automatisation des unités de fabrications de semiconducteurs 200mm est de moins en moins traités dans la littérature. Cela est dû au fait que ces unités sont considérées comme de l'ancienne génération, en fin de vie et plus très rentables. Cependant, les tendances dans le marché de semi-conducteurs confirment le retour à la technologie sur des plaquettes de 200mm. Ainsi, la modernisation ces unités semble de nouveau un sujet d'actualité dans un contexte européen de l'industrie 4.0 où l'automatisation et la robotisation de processus à faible valeur ajoutée tels que les opérations logistiques de transport et de stockage dans les unités de production sont promus.

#### 3.1.3 Méthodes de résolution des problèmes en multicritères

On distingue généralement deux grandes classes d'approches de résolution des problèmes dans le cas de plusieurs critères : les méthodes d'optimisation mathématique et les Méthodes d'Aide à la Décision Multi-Critères (MADMC).

#### 3.1.3.1 Méthodes d'optimisation mathématique

Le principe de ces méthodes consiste à modéliser le problème sous la forme d'un modèle mathématique avec une ou plusieurs fonctions objectif et un ensemble de contraintes à satisfaire. Il s'agit en général d'un modèle linéaire, ou non-linéaire ou linéaire à nombres entiers que l'on obtient. Ce modèle est ensuite résolu pour obtenir la solution optimale [36].

Dans le cas des problèmes où l'évaluation d'une solution dépend de plusieurs critères à la fois, on définit les méthodes d'optimisation mathématique multicritères. Ces méthodes permettent d'intégrer les critères dans la fonction objectif. Ainsi, on distingue trois approches selon le mode d'intégration des critères :

- La programmation mathématique à objectifs multiples [64],
- L'agrégation des critères en une seule fonction objectif telle que la méthode de Goal Programming [94],
- L'optimisation d'un critère en fonction objectif et l'intégration des autres critères dans les contraintes, c'est le cas de la méthode  $\epsilon$ -Constrainte [5].

Chaque modélisation possède des avantages et des limitations. Les détails sont fournis dans le travail de Hammami [33] qui présente un panorama des méthodes d'optimisation mathématique avec des exemples numériques. Ces méthodes permettent d'avoir une ou plusieurs solutions à partir d'un modèle mathématique qui représente le problème à traiter. Malgré le niveau élevé de précision, elles sont souvent critiquées sur deux aspects qui sont liés aux deux étapes :

- Étape de modélisation: la modélisation d'un problème qui dépend de plusieurs critères sous la forme d'équations et d'inéquations n'est pas toujours évidente. En effet, la forme de la fonction objectif est un élément déterminant qui influence la solution optimale et par suite peut fausser les conclusions. De plus, la définition des contraintes à respecter à partir d'un problème réel nécessite un certain niveau d'abstraction surtout dans le cas d'information incertaine ou incomplète. Il s'agit alors de prendre des hypothèses qui ne sont pas toujours très réalistes.
- Étape de résolution : la méthode de résolution dépend de la nature du modèle proposé. Pour les modèles multi-objectifs, la résolution de façon optimale est souvent très difficile, en particulier dans le cas des modèles non-linéaires. Typiquement, des heu-

ristiques basées sur des algorithmes génétiques par exemple sont utilisées pour fournir des solutions approchées ou quasi-optimales.

#### 3.1.3.2 Méthodes d'aide à la décision multicritères (MADMC)

Les méthodes d'aide à la décision multicritères (MADMC) sont des outils méthodologiques trés utilisés pour résoudre des problèmes complexes à critères multiples. Elles sont appliquées quand les décideurs font face à un problème avec des informations incomplètes ou vagues [44]. Ces méthodes s'appliquent à un ensemble de solutions (actions) connues a priori. Puis, la méthode permet de choisir la meilleure solution en fonction des préférences des décideurs. La façon d'exprimer les préférences des décideurs est un point déterminant qui fait la différence entre les MADMC [95].

Le processus d'aide à la décision est défini comme un processus itératif et non linéaire résumé en 5 étapes [31] :

- 1. Définir la structure du problème décisionnel,
- 2. Modéliser les préférences pour chaque niveau de la structure, dite préférences locales,
- 3. Agréger les préférences locales pour générer une évaluation globale,
- 4. Exploiter l'agrégation pour choisir, ranger ou trier les actions,
- 5. Fournir les recommandations.

Les points forts des MADMC sont que, d'une part, le décideur peuvent intervenir directement dans la construction de la solution ainsi que dans la phase de définition du problème. D'autre part, le processus de décision permet aux décideurs d'exprimer leurs préférences soit à priori soit à posteriori selon la méthode utilisée [33].

Le grand besoin d'optimisation du processus décisionnel a conduit à une évolution importante et rapide dans les MADMC. Cette évolution s'est accompagnée du développement de plusieurs méthodes de résolution multicritères telles que PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [112]... Ces outils d'aide à la décision sont utilisés afin de fournir les meilleures solutions pour des problèmes complexes multicritères dans plusieurs domaines (production, chaine logistique, éducation...). En effet, la multitude d'alternatives, de critères et parfois des sous-critères rendent la décision compliquée et augmente le risque d'erreur.

Dans ce qui suit, on s'intéresse à la méthode AHP qui depuis son invention a été adoptée par les chercheurs et les décideurs comme un outil d'aide à la décision pour devenir l'une des méthodes de prise de décision à critères multiples les plus utilisées [114].

#### 3.1.3.3 Analytic Hierarchy Process (AHP)

Dans cette section, nous présentons les domaines d'application de la méthode AHP. Puis, nous mettons l'accent sur les avantages de cette méthode.

**3.1.3.3.1 Domaines d'application :** développée en 1980 [97], la méthode AHP est considérée comme la plus utilisée pour fournir une aide à la décision multicritère. La notion du poids (ou importance) des critères est un élément clé dans l'AHP. L'importance entre les critères est évaluée sur une échelle numérique de valeurs exactes issus des jugements des décideurs entre les différentes alternatives.

La méthode AHP est utilisée dans plusieurs domaines d'application comme la production [54], l'éducation [51], la chaine logistique [43], l'engineering [113]... En particulier, dans le domaine de la fabrication de semi-conducteurs, Chung et al. [21] ont proposé une approche pour déterminer le mix optimal de la production. Les auteurs ont comparé l'utilisation de la méthode AHP et ANP (Analytic Network Process) pour évaluer la performance de la production sous différentes configurations de mix de produits. Dans le même contexte, Lee et al. [56] ont développé une approche analytique pour traiter un problème de priorité de mix produits. La méthode AHP a été appliquée pour faire face à l'incertitude dans l'évaluation des experts toute en considérant des facteurs qualitatifs et quantitatifs. L'extension de ce travail a été faite par [45] et les auteurs ont proposé un modèle plus complet pour le classement des priorités des mix produits. Chan et al. [17] ont fourni un modèle pour les systèmes de gestion des connaissances en utilisant la méthode AHP pour l'industrie de semi-conducteurs à Taiwan. Dans un autre travail, une approche combinant la méthode *Delphi* et AHP pour l'évaluation et la sélection des fournisseurs de wafers a été proposée par [18]. Les auteurs ont fourni une aide aux décideurs pour examiner les forces et les faiblesses des fournisseurs en les comparant selon des critères et des sous-critères appropriés. Shen et al. [103] ont développé une approche basée sur la méthode AHP pour l'évaluation des défauts ambigus dans le processus de photolithographie dans la fabrication de semi-conducteurs. Le mécanisme systématique proposé permet de quantifier les causes des défauts et d'avoir une carte de diagnostic. Cela donne la possibilité au fabricant de prioriser son plan d'action et, par la suite, de mieux gérer les ressources à affecter.

De façon générale, le processus décisionnel fourni par l'AHP s'adresse à plusieurs problèmes de nature différente [114]. Commençons par les problèmes d'évaluation et de sélection. Dans le secteur du transport routier, Weiwu et Jun [115] ont proposé une méthode d'évaluation d'une autoroute en utilisant l'AHP combinée avec la méthode IDS (*Intelligent Decision Systems*). Shang et al. [102] ont présenté un processus d'aide à la décision basé sur la méthode AHP pour le choix du système de fabrication flexible le plus approprié. Al Harbi [4] a appliqué l'AHP pour déterminer le meilleur entrepreneur pour la gestion d'un projet. Pour la sélection d'un modèle de voiture, Byun [11] a utilisé une version étendue de l'AHP. L'évaluation de la qualité des journaux a été abordée dans le travail de [27]. Plus tard, Kafa et al. [43] ont traité un problème de sélection de fournisseurs dans une chaîne logistique. Les auteurs ont utilisé l'AHP avec les méthodes PROMETHEE et TOPSIS. En plus des critères économiques et sociétaux, l'aspect environnemental a été considéré dans ce travail.

Dans un contexte de classement (*ranking*) et de priorité, plusieurs travaux de recherche se sont basés sur la méthode AHP combinée souvent avec d'autres méthodes. Babic et Plazibat [6] ont présenté un classement de plusieurs entreprises à l'aide d'une approche intégrant

les méthodes AHP et PROMETHEE. Dans cette approche, l'AHP fournit l'importance de chaque critère, puis le classement est déterminé par la méthode PROMETHEE. Patil et Kant [86] ont traité un problème de gestion des connaissances dans la chaine logistique pour surmonter les obstacles. Les auteurs ont utilisé l'AHP et la notion d'ensemble floue (AHP floue) combinée avec la méthode TOPSIS. Le poids des obstacles est déterminé par l'AHP et la méthode TOPSIS donne ensuite le classement final des solutions à adopter. La même approche de résolution a été utilisée dans le travail de [91] pour l'identification et le classement des solutions pour la logistique inverse dans l'industrie électronique afin de surmonter les barrières organisationnelles et économiques. Dans un contexte de gestion des ressources humaines, Abdullah et Zulkifli [1] ont proposé une nouvelle approche pour combiner l'AHP floue avec la méthode DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory Model) floue. Récemment, un travail a été mené par [99] pour la classification des travailleurs selon les mouvements effectués dans leurs tâches en utilisant la méthode AHP floue.

Dans la littérature, plusieurs articles de recherche ont adopté la méthode AHP pour résoudre des problèmes de planification et développement. Une méthodologie de planification industrielle pour un pays en développement à faible revenu a été développée dans le travail de [25]. Les auteurs ont proposé une approche intégrant la méthode AHP avec de la Linear Goal Programming (LGP). Les objectifs de développement du pays sont classés par ordre de priorité donné par l'AHP. Puis, la structure de priorité est incorporée dans le cadre de la LGP pour développer un modèle de planification multi-objectifs. Lee et Kwak [57] ont présenté une étude de cas de planification des ressources d'information dans un système de soins. L'étude a impliqué l'utilisation de l'AHP et la Goal Programming (GP). L'objectif de la planification est de concevoir et d'évaluer un modèle efficace pour la planification des ressources d'information sur la santé et les cas de planification similaires. Mosadeghi et al. [79] ont examiné l'application de deux méthodes AHP et AHP floue dans le processus d'aménagement du territoire. Une analyse comparative du classement des critères et de l'ordre de priorité des préférences a été menée par les auteurs pour évaluer la stabilité des résultats. Dans le contexte des systèmes de santé, Hussain et al. [40] ont proposé une approche basée sur la méthode AHP pour l'aide au déploiement du Lean Management dans un système de soins publics. L'objectif de l'étude est d'identifier et hiérarchiser les opportunités d'amélioration dans les hôpitaux. L'utilisation de l'AHP a permis de transformer le jugement qualitatif des décideurs en données quantitatives et de classer les possibilités de minimisation des déchets. Récemment, Sindhu et al. [104] ont étudié le problème d'installation d'énergie solaire en Inde. Les auteurs ont proposé une approche combinant les méthodes AHP et TOPSIS pour trouver l'ordre d'emplacement pour l'installation solaire.

La Table 3.5 présente une sélection d'articles utilisant la méthode AHP dans différents domaines d'application. Nous avons choisi de mettre l'accent sur les trois thématiques les plus abordées dans la littérature (l'évaluation et sélection, le classement et la planification et développement). Cependant, on note l'utilisation de la méthode AHP dans d'autres thématiques telle que la prévision, l'affectation et l'analyse du profit et coût [114].

| Auteurs                  | Thématique             | Domaine d'application           |
|--------------------------|------------------------|---------------------------------|
| Weiwu et Jun [115]       |                        | Transport routier               |
| Shang et al. [102]       | Evaluation et          | Système de fabrication flexible |
| Byun [11]                |                        | Modèle de voiture               |
| Al Harbi [4]             | sélection              | Gestion de projets              |
| Forgionne et Kohli [27]  | Selection              | Qualité des journaux            |
| Cheng et al. [18]        |                        | Chaine logistique               |
| Kafa et al. [43]         |                        | Chaine logistique               |
| Babic et Plazibat [6]    |                        | Entrepreneuriat                 |
| Shen et al. [103]        | Classement et priorité | Maintenance                     |
| Patil et Kant [86]       |                        | Chaine logistique               |
| Prakash et Barua [91]    |                        | Logistique inverse              |
| Abdullah et Zulkifli [1] | (Ranking)              | Gestion des ressources humaines |
| Satapathy et al. [99]    |                        | Agronomie                       |
| Ehie et Benjamin [25]    |                        | Industrie                       |
| Lee et Kwak [57]         |                        | Ressources d'information        |
| Chung et al. [21]        | Planification          |                                 |
| Lee et al. [56]          | et                     | Production (semi-conducteurs)   |
| Kang et Lee [45]         |                        |                                 |
| Mosadeghi et al. [79]    | développement          | Aménagement du territoire       |
| Sindhu et al. [104]      |                        | Installation d'énergie solaire  |
| Hussain et al. [40]      |                        | Soins publics                   |

Table 3.5 – Sélection d'articles utilisant la méthode AHP dans différents domaines d'application

Les travaux de recherche présentés montrent la vaste utilisation de la méthode AHP dans plusieurs domaines d'application. À travers une large revue de la littérature (393 articles revus entre les années 2000 et 2014), Mardani et al. [68] ont confirmé que cette méthode de MADMC est la plus utilisée avec une fréquence de 32.57% du nombre total d'articles. Cela est dû aux plusieurs avantages de l'AHP qui seront présentés dans le paragraphe suivant.

### **3.1.3.3.2 Avantages de la méthode AHP :** la méthode AHP possède plusieurs avantages comparativement aux autres MADMC ([74], [33]) :

- Processus simple et clair : la décomposition du problème général de décision en des sous-problèmes de façon hiérarchique conduit à une analyse plus claire et plus approfondie de l'importance de chaque critère. La méthode AHP fournit une capacité de vérification des erreurs et des incohérences intrinsèques aux décideurs. Aussi, elle permet souvent de générer les formulaires de comparaison, ce qui est très pratique dans un processus d'aide à la décision,
- Gestion d'incertitudes : c'est une méthode pertinente pour la modélisation d'un problème de décision dans un environnement incertain. En effet, elle permet de mettre au même niveau d'échelle d'évaluation dans le cas des mesures floues,
- Prise de décision efficace : la méthode évite les préjugés et les erreurs dans la prise de

- décision. De plus, le mécanisme d'évaluation de l'AHP permet de vérifier les incohérences lors de la prise de décision,
- Vaste application : c'est une méthode qui a montré une efficacité et un succès à traiter des problèmes complexes de décision multicritères dans les travaux de recherche et sur des cas d'étude.
- Flexibilité: il est facile à partir de la méthode AHP classique de faire des extensions et de s'adapter à des situations dans les cas d'application industrielle. Cette méthode peut être facilement intégrée à différentes techniques comme la programmation linéaire et la logique des ensembles flous. Ainsi, on peut extraire les avantages des méthodes combinées et atteindre l'objectif souhaité.

Les avantages présentés ci-dessus de l'AHP expliquent l'utilisation de cette méthode dans différents logiciels commerciaux (Expert Choice, Aliah Think, Criterium Decision Plus).

### 3.2 Positionnement par rapport à la littérature

La revue de la littérature présentée précédemment nous a permis d'identifier les travaux de recherche qui ont abordé des problématiques liées à ceux traités dans le cadre de cette thèse. Dans cette section, nous allons montrer les limites des précédents travaux afin de nous positionner par rapport à la littérature et montrer ainsi les principales contributions de la thèse.

## 3.2.1 Absence d'une méthodologie globale pour l'intégration d'un AMHS dans une *wafer fab* 200mm

La problématique d'intégration d'un AMHS dans une *wafer fab* existante n'a pas été suffisamment étudiée dans la littérature. La plupart de travaux de recherche se sont orientés vers les problèmes de capacité, de *design* et de l'amélioration des performances d'un AMHS dans les *wafer fabs* 300mm [15]. Cependant, il y a très peu d'articles traitant ces problématiques pour les *wafer fabs* qui fonctionnent en mode manuelle et nécessitent une mise à niveau par l'intégration d'un AMHS. En plus, ce nombre limité d'articles ne représentent pas une vision globale pour un projet d'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication. En effet, on constate que, à l'exception du travail de [32], les articles de recherche se focalisent souvent sur un sujet très particulier tel que :

- L'intégration d'un AMHS dans un atelier spécifique [118],
- L'évaluation des avantages opérationnels et financiers de l'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs existante [81],
- Le défi technique dans l'installation d'un AMHS dans une wafer fab existante [71]...

Comparé au travail de [32] qui a proposé une approche pour l'automatisation des opérations de manutention, nous visons le développement d'une méthodologie globale qui tient compte

des différents aspects : la dynamique des flux, le processus de stockage et de transport... [89]. Cependant, Guldi et al. [32] se focalisent plus sur la préparation du projet (identification du besoin, impact de la manutention manuelle, la gestion du changement) sans fournir les détails sur le choix ou la conception d'un AMHS. Dans notre cas, la méthodologie doit fournir les lignes directrices d'un projet d'intégration d'un AMHS dans une *wafer fab* existante. Cela constitue une contribution majeure de cette thèse.

## 3.2.2 Stratégie de déploiement de l'AMHS dans une unité de fabrication

La stratégie de déploiement d'un AMHS dans une unité de fabrication existante et fonctionnelle est un facteur déterminant pour la réussite d'un projet d'automatisation de la manutention. Cela a été confirmé par [32]. Les auteurs ont proposé une planification de déploiement qui dépend des familles d'équipements dans un atelier pour minimiser le risque et l'affectation des ressources.

L'ordre de déploiement de l'AMHS est forcément lié à plusieurs critères qui rendent une prise de décision systématique très difficile. Ainsi, dans le cas de ce type de problème dont la décision est conditionnée par un ensemble de critères, les méthodes d'aide à la décision en multicritères sont souvent utilisées. Cependant, la littérature ne propose pas le développement d'un planning efficace d'intégration d'un AMHS dans la *wafer fab* en considérant les critères qui pourraient influencer la décision.

## 3.2.3 Absence d'une méthodologie pour le *design* d'un AMHS dans une *wafer fab* existante

Il existe dans la littérature très peu d'articles qui traitent de la conception d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs existante. Il s'agit souvent d'un travail d'optimisation d'un AMHS déjà installé dans l'unité de fabrication afin d'améliorer ses performance [108]. D'autres articles s'intéressent au *design* d'un AMHS dans un atelier de production ([84], [118], [70]). Dans ces travaux, les auteurs se concentrent souvent sur un élément en particulier : taille de la flotte [60], règles de dispatching des robots [48], configuration et *layout* [37], [19], système de stockage [73]... Cependant, à notre connaissance, aucun travail de recherche n'a fourni une démarche structurée pour le *design* d'un AMHS dans un atelier de production en considérant à la fois le transport et le stockage. En effet, en partant d'une manutention totalement manuelle dans un atelier donné, nous visons de concevoir un AMHS en abordant les questions relatives au nombre de robots, règles de gestion de la flotte, configuration de transport et nombre de stockeurs.

#### 3.2.4 Résolution basée sur la simulation à évènements discrets

De façon globale, une grande partie des travaux de recherche qui ont abordé la problématique du *design* d'un système de manutention automatisé ont confirmé que la simulation est un outil efficace pour la résolution de tels problèmes ([105], [39], [85], [82]). Dans la littérature, il s'agit souvent d'une approche de résolution basée sur la simulation à évènements discrets. Cette méthode semble la plus adaptée pour modéliser les systèmes manufacturiers. Elle se base sur le concept de file d'attente et la notion d'évènements. Néanmoins, le coût en terme de temps de modélisation est très élevé pour les systèmes manufacturiers complexes et à grande échelle tel que la fabrication de semi-conducteurs. De plus, il est souvent compliqué d'étendre un modèle conçu en évènements discrets à des problèmes similaires [10]. Dans ce travail de thèse, nous combinons deux méthodes de modélisation-simulation qui sont la simulation à événements discrets et multi-agents [98]. Ceci, dans le but de palier à la complexité et la dynamique de la fabrication de semi-conducteurs et de rendre le modèle de simulation flexible.

#### 3.3 Conclusion

L'intégration d'un AMHS dans une wafer fab 200mm est une problématique originale qui n'a pas été très abordée de manière globale dans la littérature. Dans ce chapitre, nous avons évoqué dans un premier temps les travaux de recherche qui se rapprochent de cette problématique : automatisation de la manutention dans les wafer fabs 200mm. Ensuite, nous avons présenté les articles de recherche qui traitent du design des systèmes de transport et de stockage dans les unités de fabrication de semi-conducteurs. Nous avons aussi revu les différentes méthodes de résolution des problèmes en multicritères. La dernière partie du chapitre a présenté notre positionnement par rapport à la littérature afin de montrer les contributions majeures de la thèse.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les travaux entrepris durant la thèse afin d'atteindre les objectifs en terme de contributions scientifiques et des livrables industriels.

### Chapitre 4

# Méthodologie pour l'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication de semiconducteurs existante et fonctionnelle

#### 4.1 Motivation

Dans ce chapitre, on propose une aide à la décision pour une intégration efficace d'un Automated Material Handling System (AMHS) dans les différents ateliers de l'unité de fabrication de semi-conducteurs (ou wafer fab). Étant donné l'importance d'un tel projet, nous visons le développement d'une méthodologie qui tienne compte de la difficulté d'implémentation d'un système de manutention automatisé dans un environnement de travail qui n'a pas à l'origine été conçu et optimisé pour un tel système. Le challenge est de proposer une démarche globale pour fournir les lignes directrices du projet d'intégration d'un AMHS dans une wafer fab 200mm existante et fonctionelle.

À notre connaissance, Guldi et al. [32] ont été les seuls à proposer une méthodologie en trois étapes pour l'automatisation de la manutention dans une unité de fabrication de semi-conducteurs 200mm :

- 1. quantifier le besoin,
- 2. identifier les changements nécessaires au niveau des équipements et du processus et,
- 3. définir la stratégie de déploiement de l'AMHS dans la wafer fab.

Bien que cette méthodologie a montré une efficacité prouvée dans l'article, les auteurs ont négligé certains aspects de grande importance. En effet, d'après Pillai [89], un projet d'intégration d'un AMHS dans une *wafer fab* repose principalement sur cinq éléments clés :

- 1. Comprendre la dynamique des flux de production,
- 2. Comprendre les exigences du stockage,
- 3. Comprendre les exigences du transport,
- 4. Comprendre les exigences pour l'interaction homme-machine,
- 5. Comprendre les exigences d'identification du matériel.

Ces éléments sont génériques et la liste peut être plus longue en fonction du cas d'étude industriel. Ainsi, dans ce chapitre, en s'inspirant du travail de Pillai [89], nous proposons une méthodologie générique pour l'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication existante.

La suite du chapitre décrit la méthodologie que nous proposons. Ensuite, nous présentons les résultats de l'application sur le cas de la *wafer fab* 200mm de STMicroelectronics Rousset.

#### 4.2 Méthodologie proposée

Il s'agit de développer une démarche efficace pour la migration d'une manutention manuelle (des opérateurs) vers une manutention automatisée (partielle ou totale). En effet, étant donné que ce type d'unité n'a pas été conçu à l'origine pour recevoir un AMHS, il semble très compliqué d'évoluer d'un système de manutention manuelle vers un système totalement ou *full* automatisé. Une configuration mixte ou hybride (manutention manuelle et automatisée) s'avère plus efficace et moins risqué. Dans ce cas, une bonne cohabitation entre les opérateurs et les robots est nécessaire dans un environnement de production très spécifique telle que la fabrication de semi-conducteurs.

Nous considérons initialement un ensemble d'ateliers de production équipés d'un processus de manutention (transport et stockage) manuelle. L'application de la méthodologie devrait permettre de migrer vers une manutention automatisée dans certains ateliers. La Figure 4.1 présente la méthodologie proposée qui consiste en cinq étapes.

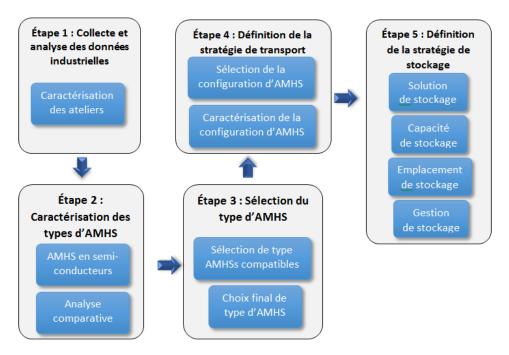


Figure 4.1 – Méthodologie proposée.

Il est important de préciser que, dans la méthodologie, nous gardons un aspect de globalité en s'inspirant de Pillai [89]. Ainsi, le niveau de détail fourni peut sembler insuffisant pour traiter tous les aspects techniques d'un projet d'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs existante. Cependant, on note que l'objectif principal de l'étude est de fournir les lignes directrices pour un tel projet.

Dans ce qui suit, les différentes étapes de la méthodologie sont présentées

#### 4.2.1 Étape 1 : Collecte et analyse des données

C'est une étape préparatrice pour la suite de la méthodologie. L'objectif est de collecter les données industrielles concernant le processus de production dans chaque atelier (flux de production, caractéristiques des équipements, productivité, spécifications physiques...). Dans cette étape, nous cherchons à caractériser chaque atelier de production et de définir le besoin de manutention induit par le processus de production.

#### 4.2.2 Étape 2 : Caractérisation des types d'AMHS

Ici, nous présentons les différents types (ou solution) d'AMHS utilisés dans l'industrie de semi-conducteurs. Puis, une étude comparative des types d'AMHS qui semblent les plus pertinents pour l'entreprise est menée. Ceci permet de caractériser chaque système en spécifiant les avantages, les points limites ainsi que les contraintes physiques et techniques pour son intégration dans un atelier.

#### 4.2.3 Étape 3 : Sélection du type d'AMHS

Les résultats de l'application des étapes 1 et 2 permettent de définir le ou les types d'AMHS qui peuvent être implémentés dans chaque atelier de production en se basant sur ses caractéristiques physiques et techniques. Dans le cas où plusieurs solutions sont possibles par atelier, nous procédons à la sélection du type d'AMHS final. A ce niveau, le critère dominant du choix final est le coût de la solution.

#### 4.2.4 Étape 4 : Définition de la stratégie de transport

À l'issue de l'étape 3, nous avons identifié le type d'AMHS à implémenter dans chaque atelier de production. Dans cette étape, l'objectif est de définir la stratégie globale de transport dans l'unité de fabrication. Il s'agit de sélectionner la configuration de l'AMHS (unifié, *inter-bay/intra-bay...*). Selon la configuration d'AMHS définie dans cette étape, il est important de préciser certains critères et de fournir les détails nécessaires pour la mise en place d'une telle configuration.

#### 4.2.5 Étape 5 : Définition de la stratégie de stockage

Les spécificités du processus de fabrication de semi-conducteurs imposent une grande quantité des encours de production (ou *Work-In-Progress (WIP)*). L'intégration de la manutention automatisée dans la *wafer fab* nécessite une amélioration de la stratégie de stockage des produits afin d'accentuer le gain dû à un AMHS. Cette étape consiste à proposer une stratégie globale de stockage du *WIP* dans l'unité de fabrication. Il s'agit ainsi de définir :

- Les solutions de stockage automatisées,
- Les emplacements des espaces de stockage,
- La capacité nécessaire,
- La politique de gestion de stockage.

La stratégie de stockage à définir dans cette étape dépend de la configuration de l'AMHS et de la stratégie de transport fournie par l'étape précédente de la méthodologie.

# 4.3 Application de la méthodologie sur un cas industriel : Cas de STMicroelectronics à Rousset

Dans cette section, nous présentons et analysons les résultats de l'application de la méthodologie proposée sur la *wafer fab* 200mm de STMicroelectronics à Rousset. Cette unité de fabrication représente un très bon exemple d'application pour évaluer l'efficacité de la méthodologie. En effet, il s'agit d'une *wafer fab* de l'ancienne génération qui a été conçue initialement pour une production de volume.

#### 4.3.1 Etape 1 : Collecte et analyse de données industrielles

Les données concernant la spécificité de chaque atelier sont collectées. Nous avons défini quatre facteurs principaux tels que présentés dans le diagramme de la Figure 4.2. Dans ce qui suit, nous revenons sur les détails de chaque facteur.

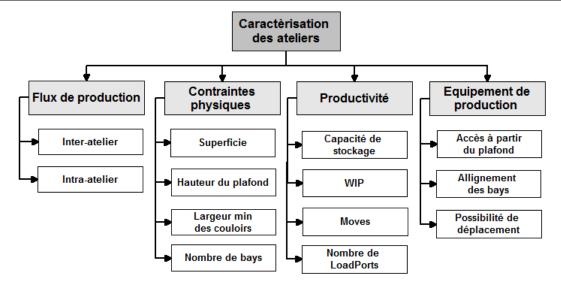


Figure 4.2 – Diagramme de caractérisation des ateliers.

#### 4.3.1.1 Flux de production

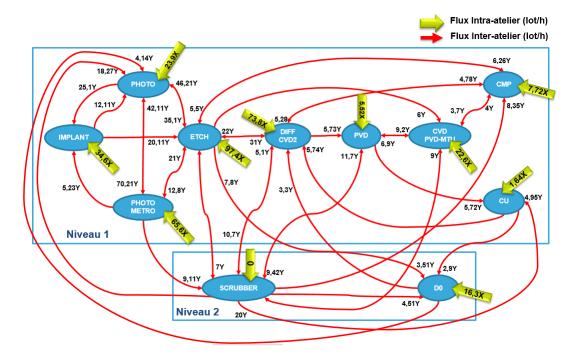
L'analyse des flux de production dans l'unité de fabrication est un élément clé dans cette étude. En effet, le transport des lots, actuellement réalisé par les opérateurs, n'est qu'un service sans valeur ajoutée pour la production. Cependant, sans ce service il n'y aurait pas de la valeur ajoutée (Kiba [47]). Ainsi, une cartographie détaillée des déplacements des lots dans l'environnement de production est indispensable afin de caractériser les besoins de transport à prévoir avec un AMHS. Du côté industriel, nous avons ressenti une forte demande à ce sujet dans le cadre du projet global de modernisation de la *wafer fab*.

La cartographie des flux a été développée en utilisant des outils d'extraction des données de la base de données de l'entreprise. Cela a permis de générer des fichiers Excel de très grande taille (plus de 700.000 lignes) selon les instances de *WIP* considérées. En plus du grand volume de données, on souligne la difficulté d'analyse sous ce format d'affichage sur Excel. Ainsi, nous avons développé un modèle de simulation au moyen du logiciel « Any-Logic » afin d'avoir une représentation plus pertinente de la cartographie des flux. Il s'agit d'un modèle à évènements discrets qui permet de visualiser les déplacements des lots entre les différentes machines de production dans les ateliers en se basant sur l'historique de l'activité. Le modèle est alors utilisé que pour des objectifs de visualisation et de collecte de statistiques.

L'outil proposé conduit à une représentation dynamique (en fonction du temps) des flux de production. Il permet d'avoir plusieurs indicateurs liés à l'activité de production dans la globalité de l'unité de fabrication, et en particulier dans chaque atelier :

- Evolution du WIP en fonction du temps,
- Débit d'entrée (ou *Input*) : valeur moyenne, écart-type et maximum,
- Débit en sortie (ou *Throughput*) : valeur moyenne, écart-type et maximum.

La Figure 4.3 est une présentation simplifiée de la cartographie des flux de production (valeur moyenne) dans la *wafer fab* pour une instance représentative du *WIP* (avec *X* et *Y* sont deux entiers différents de zéro). Deux types de flux sont considérés : inter-atelier et intra-atelier.



**FIGURE 4.3** – Représentation de la cartographie des flux de production dans la wafer fab 200mm de STMicroelectronics à Rousset.

Les déplacements des lots à partir/vers un espace de stockage (les étagères) n'a pas été inclut dans le modèle. Cela est dû au manque de traçabilité des flux de stockage dans l'unité de production. En effet, il est très compliqué en cas de manutention manuelle d'identifier l'emplacement exact d'un lot dans la salle blanche et la trajectoire suivie par un opérateur.

Le collecte et l'analyse des flux de production nous a permis de classifier les ateliers selon deux critères : le volume de flux et le pourcentage du flux inter-atelier par rapport au flux total. Pour chaque critère, trois niveaux sont définis (élevé, moyen et faible) calculé sur la base des valeurs maximales et minimales. Les valeurs numériques ne peuvent pas être fournies pour des raisons de confidentialité. La Figure 4.4 présente les résultats de la classification. La lecture du diagramme peut se faire dans les deux sens :

- **Du haut vers le bas :** chaque classe (Classe A, par exemple) contient des sous classes (Classe A.1, par exemple) qui regroupent certains ateliers,
- **Du bas vers le haut :** en remontant le diagramme, les caractéristiques de chaque atelier sont facilement identifiées.

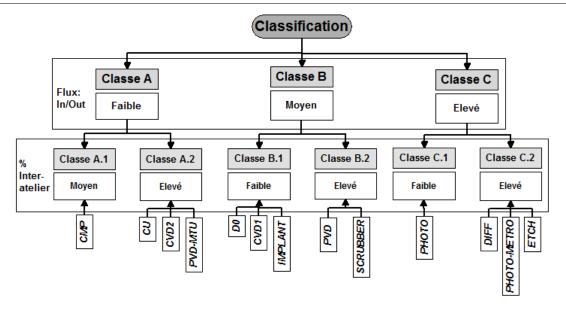


Figure 4.4 – Classification des ateliers selon le critère de flux de production.

La démarche de classification présentée précédemment est utilisée tout au long de cette étape.

#### 4.3.1.2 Contraintes physiques

La détermination des contraintes et des spécifications physiques des ateliers est réalisée à travers des réunions avec le partenaire industriel et des visites sur terrain. La Figure 4.5 montre les critères de classification des ateliers. Ces critères sont sélectionnés afin de prévoir les contraintes techniques lors de l'implémentation d'un AMHS. En effet, la hauteur du plafond et les dimensions des couloirs sont des éléments décisifs dans le choix d'une solution de manutention automatisée. De même, la performance d'un type d'AMHS comparé à un autre peut dépendre de la superficie de l'atelier et du nombre de baies (*bays*).

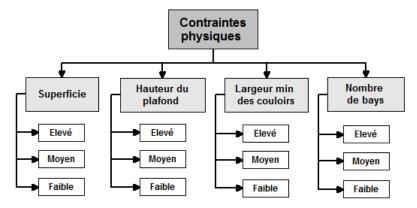


FIGURE 4.5 – Critères de classification des ateliers en fonction des contraintes physiques.

La Figure 4.6 présente les résultats de la classification. On observe généralement une grande diversité entre les ateliers de la *wafer fab* du point de vue des contraintes physiques. Cependant, il est important de noter que la plupart des ateliers dans le premier niveau de la *wafer fab* 

ont une hauteur de plafond assez élevée. Au niveau 2 de l'unité de fabrication, on remarque que les ateliers (D0 et Scrubber) sont similaires sur tous les critères physiques sélectionnés.

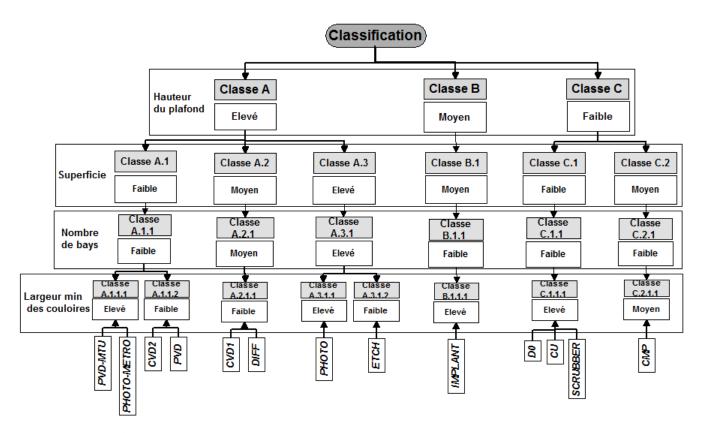


Figure 4.6 – Classification des ateliers selon le critère des contraintes physiques.

#### 4.3.1.3 Productivité

Le critère de productivité est un élément principal pour évaluer les systèmes manufacturiers dans l'industrie de semi-conducteurs. En effet, le premier objectif dans ce type d'industrie est de maximiser l'utilisation des machines et le débit de l'atelier. Dans la Figure 4.7, nous présentons les quatre indicateurs (ou critères) sélectionnés pour représenter la productivité d'un atelier :

- Moves : c'est le nombre d'opérations réalisées dans l'atelier,
- WIP : c'est la quantité d'encours de produits dans l'atelier,
- Capacité de stockage : c'est le nombre total des positions de stockage prévus dans l'atelier pour stocker le *WIP*.
- Nombre de *LoadPort* : c'est le nombre total de ports de chargement/déchargement des machines de production dans l'atelier.

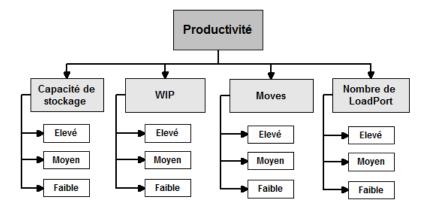


Figure 4.7 – Critères de classification des ateliers en fonction de la productivité.

Le critère *Moves* est souvent considéré pour mesurer le niveau de performance d'un système manufacturier en semi-conducteurs. Le niveau de *WIP* et la capacité de stockage permettent d'évaluer le rythme de la production et d'identifier les goulots d'étranglement (ou *bottle-necks*). Le dernier facteur (nombre de *LoadPorts*) a été sélectionné afin de caractériser le système de production (les machines). En effet, la capacité de production dépend du nombre de machines dans chaque atelier. Ainsi, étant donné le nombre variable de ports de chargement par machine, on n'a considéré que le nombre total.

La Figure 4.8 résume les résultats de la classification. De façon générale, on observe trois grandes classes d'atelier :

- **Forte productivité :** ce sont les ateliers caractérisés par un niveau d'activité élevé (*Moves*, *WIP*, capacité de stockage). Il s'agit des ateliers critiques de la *wafer fab* qui représentent généralement les points *bottlenecks* (Photo, Photo-Metro, Etch et Diff/CVD2).
- **Faible productivité :** ce sont les ateliers qui possèdent un faible niveau d'activité et souvent un faible nombre de machines comparé aux autres ateliers de la *wafer fab*. Cette classe représente les ateliers à faible activité tel que l'atelier CMP et PVD.
- **Moyenne productivité :** c'est la classe intermédiaire qui regroupe les ateliers possédant une activité moyenne (Implant, CVD1, Scrubber). Ces ateliers ne représentent pas des bottlenecks permanent dans l'unité de fabrication. Cependant, ils sont susceptibles à tout moment de la devenir sous certaines conditions de production telles qu'une panne d'une machine ou un mixte spécifique de produits.

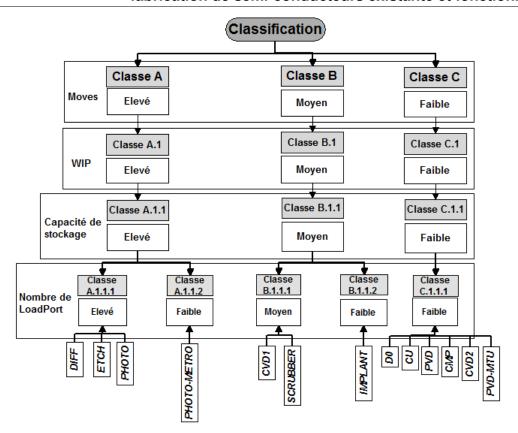
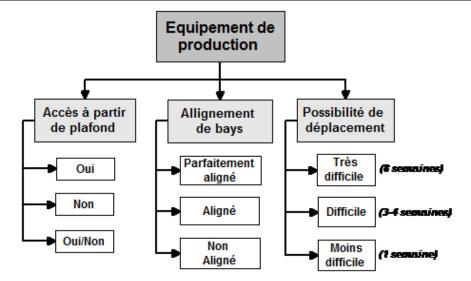


Figure 4.8 – Classification des ateliers selon le critère de productivité.

### 4.3.1.4 Équipements de production

Les différentes étapes de production nécessite des familles d'équipements spécialisées pour réaliser les opérations. Dans les *wafer fabs* 200mm d'ancienne génération, on constate une grande diversité de technologie des familles d'équipements dans un même atelier. Ce sont les anciennes machines qui sont remplacées au fur et à mesure par des nouvelles, qui ont une technologie plus modernes et des cadences plus élevées. Cela impacte le *layout* des machines dans l'atelier (alignement des *bays*). Cette diversité d'équipements de production est adressée dans cette section afin de pouvoir évaluer ensuite l'impact sur le choix et l'intégration d'une solution d'AMHS dans chaque atelier.

La Figure 4.9 présente les trois critères considérés. En premier, l'accès aux *LoadPorts* de la machine à partir du plafond est une caractéristique technique principale pour l'interfaçage entre les robots du système de transport automatisé et les machines. Ensuite, l'alignement des *bays* caractérise le *layout* de l'atelier. Ce facteur possède un impact significatif sur la performance d'un AMHS. Ainsi, en cas de non alignement, nous évaluons la possibilité de déplacement des machines.



**FIGURE 4.9 –** Critères de classification des ateliers en fonction des spécificités des équipements de production.

La Figure 4.10 résume les résultats de la classification. Globalement, le diagramme montre une grande différence entre les ateliers de l'unité de fabrication. On remarque aussi que la majorité des machines sont accessibles à partir du plafond pour charger ou décharger les lots. Au niveau du *layout*, d'une part, la majorité des *bays* dans les ateliers ont un bon alignement (ou un alignement parfait). D'autres part, il est important de noter que les *bays* des équipements de métrologie repartis dans tous les ateliers sont caractérisés par un non alignement. Cependant, ces équipements sont considérés comme les plus faciles et les moins chers à déplacer comparativement aux autres équipements de la *wafer fab*.

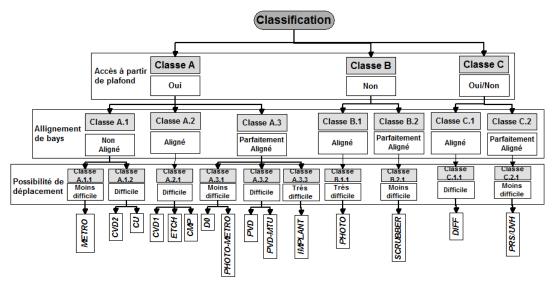


Figure 4.10 – Classification des ateliers selon les spécificités des équipements de production.

De façon générale, l'étude réalisée précédemment nous a permis de mieux connaître la spécificité de chaque atelier. La Table 4.1 présente les classes d'ateliers proposées en fonction des

# Chapitre 4 : Méthodologie pour l'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs existante et fonctionnelle

différents facteurs sélectionnés. Il ne s'agit pas d'une classification unique, mais, nous avons essayé de rassembler les ateliers possédant le maximum de critères en commun. L'objectif est d'avoir une idée globale sur les caractéristiques des ateliers dans l'unité de fabrication.

60

 Table 4.1 – Les groupes d'ateliers.

|                      | Critère                             |  |   |  |  |  |  |
|----------------------|-------------------------------------|--|---|--|--|--|--|
| Groupe<br>d'ateliers | Flux de production                  | Contraintes physiques  | Productivité  | Équipements de production                                |  |  |  |
| Etch, Diff           | -Flux In/ Out : élevé               | -Hauteur de plafond :<br>élevée                                | -Moves : élevé  | -Accès à partir de plafond : oui                         |  |  |  |
|                      | - Flux intra-atelier : élevé        | - Superficie : élevée  | -WIP : élevé  | - Alignement de bays : aligné                            |  |  |  |
|                      |                                     | -Nombre de <i>bays</i> : élevé<br>- Largeur des cou-           | -Capacité de sto-<br>ckage : élevée<br>-Nb de <i>LoadPorts</i> :          | - Possibilité de dépla-<br>cement : difficile            |  |  |  |
|                      |                                     | loirs : faible   | élevé   |  |  |  |  |
| Photo                | -Flux In/ Out : élevé               | -Hauteur de plafond :<br>élevée                                | -Moves : élevé  | -Accès à partir de plafond : non                         |  |  |  |
| FIIOLO               | - Flux intra-atelier : faible       | - Superficie : élevée  | -WIP : élevé  | - Alignement de bays : aligné                            |  |  |  |
|                      |                                     | -Nombre de <i>bays</i> : élevé                                 | -Capacité de sto-<br>ckage : élevée                                       | - Possibilité de dépla-<br>cement : très difficile       |  |  |  |
|                      |                                     | - Largeur des cou-<br>loirs : élevée                           | -Nb de <i>LoadPorts</i> : élevé   |  |  |  |  |
|                      | Flux In/ Out : élevé                | -Hauteur de plafond :  | -Moves : élevé  | -Accès à partir de                                       |  |  |  |
|                      | ·                                   | élevée   |   | plafond : oui  |  |  |  |
| Photo-<br>metro      | - Flux intra-atelier :<br>élevé     | - Superficie : faible  | -WIP : élevé  | - Alignement de bays : parfaitement aligné               |  |  |  |
|                      |                                     | -Nombre de <i>bays</i> : faible                                | -Capacité de sto-<br>ckage : élevée                                       | - Possibilité de dépla-<br>cement : moins diffi-<br>cile |  |  |  |
|                      |                                     | - Largeur des cou-<br>loirs : élevée                           | -Nb de <i>LoadPorts</i> : faible  |  |  |  |  |
|                      | Flux In/Out : moyen                 | -Hauteur de plafond : faible                                   | -Moves : moyen/-<br>faible  | -Accès à partir de plafond : oui/non                     |  |  |  |
| Scrubber,<br>D0      | - Flux intra-atelier : faible/élevé | - Superficie : faible  | -WIP: moyen/faible  | - Alignement de bays : parfaitement aligné               |  |  |  |
|                      |                                     | -Nombre de <i>bays</i> : faible                                | -Capacité de sto-<br>ckage : moyenne/-<br>faible                          | - Possibilité de dépla-<br>cement : moins diffi-<br>cile |  |  |  |
|                      |                                     | - Largeur des cou-<br>loirs : élevée                           | -Nb de <i>LoadPorts</i> : moyen/faible                                    |  |  |  |  |
|                      | Flux In/ Out : faible               | -Hauteur de plafond : moyenne                                  | -Moves : moyen  | -Accès à partir de plafond : oui                         |  |  |  |
| Implant              | - Flux inter-atelier : élevé        | - Superficie : moyen   | -WIP : moyen  | - Alignement de bays : parfaitement aligné               |  |  |  |
|                      |                                     | -Nombre de <i>bays</i> : faible - Largeur des couloirs : élevé | -Capacité de sto-<br>ckage : faible<br>-Nb de <i>LoadPorts</i> :<br>élevé | - Possibilité de dépla-<br>cement : très difficile       |  |  |  |

|                      | Critère                             |  |  |   |  |  |
|----------------------|-------------------------------------|--|--|---|--|--|
| Groupe<br>d'ateliers | Flux de production                  | Contraintes physiques  | Productivité   | Équipements de production                     |  |  |
|                      | Flux In/ Out : faible               | -Hauteur de plafond : faible   | -Moves : élevé   | -Accès à partir de plafond : oui              |  |  |
| CMP, CU              | - Flux inter-atelier : élevé/moyen  | - Superficie : faible  | -WIP : élevé   | - Alignement de bays : non aligné             |  |  |
|                      |                                     | -Nombre de <i>bays</i> : faible - Largeur des couloirs : moyen/élevée  | -Capacité de sto-<br>ckage : élevée<br>-Nb de <i>LoadPorts</i> :<br>élevé  | - Possibilité de dépla-<br>cement : difficile |  |  |
|                      | Flux In/ Out : moyen                | -Hauteur de plafond :  | -Moves : moyen/-   | -Accès à partir de                            |  |  |
|                      | Trax my out : moyen                 | élevée   | faible   | plafond : oui                                 |  |  |
| CVD1,<br>PVD         | - Flux inter-atelier : élevé/faible | - Superficie : moyen-<br>ne/faible                                     | -WIP : moyen/faible  | - Alignement de bays : aligné                 |  |  |
|                      | ,                                   | -Nombre de <i>bays</i> : moyen/faible                                  | -Capacité de sto-<br>ckage : moyenne/-<br>faible                           | - Possibilité de dépla-<br>cement : difficile |  |  |
|                      |                                     | - Largeur des cou-<br>loirs : faible                                   | -Nb de <i>LoadPorts</i> : moyen/faible                                     |   |  |  |
|                      | Flux In/ Out : faible               | -Hauteur de plafond :<br>élevée  | -Moves : faible  | -Accès à partir de plafond : oui              |  |  |
| CVD2,<br>PVD-<br>MTU | - Flux inter-atelier : élevé        | - Superficie : faible  | -WIP : faible  | - Alignement de bays : non aligné/aligné      |  |  |
|                      |                                     | -Nombre de <i>bays</i> : faible - Largeur des couloirs : faible/élevée | -Capacité de sto-<br>ckage : faible<br>-Nb de <i>LoadPorts</i> :<br>faible | - Possibilité de dépla-<br>cement : difficile |  |  |

## 4.3.2 Étape 2 : Caractérisation des types d'AMHS

Dans cette section, nous présentons d'abord les types d'AMHS les plus utilisés dans les wafer fabs. Ensuite, nous menons une analyse comparative afin de fournir les avantages et les points faibles de chaque système.

#### 4.3.2.1 Types d'AMHS dans les wafer fabs

La manutention des lots ou réticules dans les *wafer fabs* nécessite un système rapide et fiable. Les solutions automatisées les plus utilisées dans ce type d'industrie ont été présenté dans le chapitre 2. Il s'agit de 4 types d'AMHS : AGV, RGV, OHS et OHT.

## 4.3.2.2 Analyse comparative des types d'AMHS

Le travail de Yamagishi [118] fournit une évaluation des quatre types d'AMHS. Les résultats sont résumés dans la Table 4.2 (avec J : Juste, O : Bien et X : Excellent).

| Type<br>d'AMHS | Capabilité de<br>transport | Empreinte | Particule | Vibration | Sécurité | coût | Globalement |
|----------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|------|-------------|
| AGV            | J                          | J         | J         | J         | J        | X    | J           |
| RGV            | X                          | J         | О         | J         | J        | X    | J           |
| OHS            | О                          | О         | X         | X         | X        | J    | O           |
| OHT            | О                          | X         | X         | X         | X        | О    | X           |

**Table 4.2 –** Résultats de l'évaluation des types d'AMHS (Yamagishi[118].

Cette évaluation reste subjective et ne peut pas être considérée comme définitive pour deux raisons principales :

- Depuis la date de la publication (2003), la robotisation a subit une forte évolution technologique,
- L'auteur n'a pas fourni les détails des critères de comparaison. En plus, il ne tient pas compte de certains aspects (gestion de transport, fiabilité, exigences physiques, impact sur le processus de production en cas de panne) dans la comparaison.

Ainsi, dans cette étape, nous réalisons une étude comparative plus approfondie et mise à jour qui tienne compte d'un maximum de critères. Dans le cas de STMicroelectronics à Rousset, deux types d'AMHS sont sélectionnés pour l'intégration dans les différents ateliers de l'unité de fabrication : OHT ou AGV. Ce choix est basé sur les qualités de ces systèmes. Une large gamme de critères de comparaison est définie (capabilité de transport, gestion de transport, compatibilité avec la salle blanche...). Pour chaque critère, nous considérons un ensemble de sous critères de comparaison auxquels on associe des poids. La Table 4.3 présente les niveaux d'importance des sous-critères.

**TABLE 4.3** – Niveau d'importance et poids correspondant.

| Poids | Description           |
|-------|-----------------------|
| 5     | Extrêmement important |
| 4     | Très important        |
| 3     | Important             |
| 2     | Modérément important  |
| 1     | Moins important       |

L'analyse comparative menée dans cette étape est basée sur la méthode de la somme pondérée (*Linear averaging method or weighted point method*) [110]. D'abord, un score qui varie entre 1 et 2 est attribué à chaque solution d'AMHS (OHT, AGV) sur l'ensemble de sous-critères. Notons que le score le plus élevé correspond à la meilleure solution sur un

sous critère donné. Ensuite, on calcule un score total tel que suivant :

$$ScoreTotal_{OHT/AGV} = \sum_{i=1}^{n} Poids \ Score_{OHT/AGV}$$
 (4.1)

Avec *n* est le nombre de sous-critères. Le score moyen est calculé aussi afin d'avoir une mesure normalisée :

$$Scoremoyen_{OHT/AGV} = \frac{ScoreTotal_{OHT/AGV}}{Nbr.sous\ critres}$$
(4.2)

Les résultats de l'analyse comparative sont présentés dans l'Annexe A. On note que la comparaison est basée sur un fournisseur identifié pour chaque solution d'AMHS. À la fin de cette section, nous fournissons un résumé de l'étude comparative menée précédemment entre les deux types d'AMHS sélectionnés. La Table 4.4 montre le score moyen par critère de comparaison. Notons que le score moyen le plus élevé correspond à la solution d'AMHS la plus pertinente par critère. La différence entre les scores moyens sur un critère représente le *gap*.

Critère Score moyen OHT **AGV** Gap 5.25 Capabilité de transport 6.75 1.5 Gestion de transport 5 7.69 2.69 Compatibilité avec la salle 10 10 0 blanche Sécurité 8.75 6.625 2.125 4.33 8.67 4.34 Coût 6.75 7.25 0.5 Maintenance et support Exigences physiques 5 7.6 2.6

Points techniques

Table 4.4 – Echelle numérique de [97]

D'après la Table 4.4, on observe que le système OHT possède une meilleure capabilité de transport que le système AGV. Cependant, au niveau de la gestion des requêtes de livraison, le système AGV donne plus de flexibilité dans la gestion de la flotte de véhicules comparé à l'OHT. Du point de vue de la sécurité, la comparaison confirme l'avantage du système OHT par rapport à l'AGV. Cela est dû au fait qu'un AMHS au plafond de la salle blanche réduit le risque de contact avec les opérateurs et le matériel au sol.

5.83

6.5

0.67

De plus, nous remarquons un gap très important entre les deux solutions sur le critère de coût. En effet, l'intégration d'un AMHS à base d'AGV permet de réduire considérablement le coût comparé à un OHT. Cela est dû aux nombreux éléments qui conduisent à des coûts supplémentaires (rail, installation, contrôleur de flotte...) dans le cas d'un système OHT.

En ce qui concerne le critère de maintenance et support, on observe un léger avantage des AGVs par rapport à un système OHT. En effet, l'inconvénient majeur d'un AMHS à base de rails (OHT, OHS) est la dégradation rapide de la performance du processus de transport en cas d'une panne d'un robot ou d'une intervention sur un segment de rail. Par contre, la panne d'un AGV ne peut pas avoir un impact significatif sur le fonctionnement du reste de la flotte de véhicules. Il est clair aussi que l'intégration d'un AMHS à base d'AGV nécessite moins d'exigences physiques comparé à l'OHT.

Pour finir, les points techniques abordés dans cette comparaison n'ont pas montré un grand avantage d'un type d'AMHS par rapport à un autre.

## 4.3.3 Étape 3 : Sélection du type d'AMHS

Dans cette étape, nous nous intéressons à la sélection du type d'AMHS le plus compatible avec chaque atelier de la *wafer fab* en se basant sur les étapes précédentes de la méthodologie. Ainsi, nous procédons par deux phases : dans un premier temps, l'espace de solutions de l'AMHS qui peuvent être intégrées dans chaque atelier est défini. Puis, dans un second temps, il s'agit de limiter le choix et de déterminer le type final d'AMHS à installer.

#### 4.3.3.1 Sélection des types d'AMHS compatibles

Un arbre de décision est développé en tenant compte des spécificités de chaque atelier et des caractéristiques de chaque type d'AMHS. Le processus consiste à explorer les différentes branches de l'arbre par l'ensemble des ateliers. Dans certain cas, on est obligé d'aller dans les détails des baies.

La Figure 4.11 présente l'arbre de décision. En parcourant les branches, un atelier ou un *bay* peut avoir trois types de solutions :

- **OHT** : les caractéristiques de l'atelier imposent le choix d'un système OHT,
- AGV : les caractéristiques de l'atelier imposent le choix des AGVs,
- Solution adaptative: dans ce cas, l'intégration directe d'un AGV ou un OHT n'est pas possible dans cet atelier. à cause des contraintes physiques qui empêchent l'installation d'un OHT (la hauteur du plafond, par exemple) ou des AGVs (la largeur des couloirs, par exemple). Ainsi, une solution adaptative à base d'OHT et/ou d'AGV est à considérer. Cette solution nécessite un travail de recherche et développement et plus de réflexion. À titre d'exemple, en cas de non accès aux machines à partir du plafond, on peut considérer un système OHT avec un robot 6-axes qui permet le chargement/déchargement des lots sur les LoadPorts. En plus, une décision de garder une manutention manuelle (les opérateurs) est possible.

La Figure 4.12 présente le *layout* de la *wafer fab* 200mm à Rousset et les types d'AMHS compatibles avec les différentes baies de chaque atelier. Une observation générale indique que certains ateliers ou *bays* possèdent une solution unique d'AMHS (Implant, Photo-metro,

CMP...). Cependant, il est possible, dans certain cas, d'intégrer un OHT ou un AGV (PVD, CVD1...).

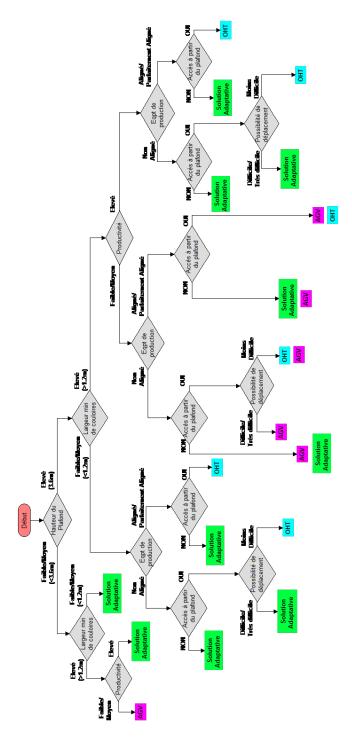


FIGURE 4.11 – Arbre de décision.

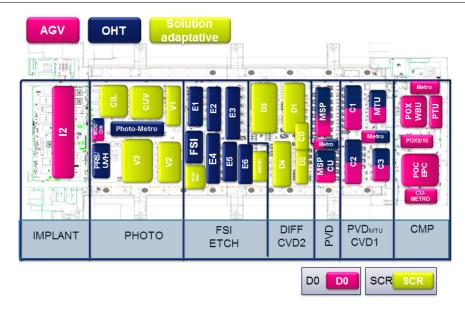


Figure 4.12 – Layout de l'unité de fabrication et types d'AMHS compatibles

#### 4.3.3.2 Choix final du type d'AMHS

L'objectif est de prendre la décision finale du type d'AMHS à considérer pour chaque *bay* dans les diffèrents ateliers dans le cas de plusieurs solutions possibles. Pour la *wafer fab* de STMicroelectronics à Rousset, la Table 4.5 résume le choix final du type d'AMHS dans le cas de plusieurs solutions possibles.

Dans la Table 4.5, le critère dominant de choix entre un OHT et un AGV pour le cas de l'ateliers (CVD1/PVD-MTU, PVD) est le coût de la solution. La productivité élevée dans les bays de certains ateliers (Diff/CVD2, Photo, Etch) oriente le choix d'une solution adaptative à base d'un système OHT. Par ailleurs, dans le cas de l'atelier Scrubber, une solution adaptative à base d'un système AGV est sélectionnée à cause de la hauteur du plafond. Enfin, malgré la productivité moyenne dans les bays MDD, OIN, WCM et POG, une solution adaptative à base d'un système OHT est définie afin d'avoir un seul type d'AMHS dans un même atelier.

La Figure 4.13 présente le *layout* de la *wafer fab* avec le type d'AMHS à intégrer dans chaque atelier.

**TABLE 4.5** – Choix final de type d'AMHS.

| Atelier    | Baies           | Types d'AMHS     | Choix final de      | Critère de choix    |
|------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|
|            |                 | compatibles      | l'AMHS              |                     |
| CVD1, PVD- | C1, C2, C3, Me- | OHT/AGV          | AGV                 | - Coût moins chers, |
| MTU        | tro, MTU        |                  |                     |                     |
| PVD        | MSP, MSP-CU,    | OHT/AGV          | AGV                 | - Coût moins chers, |
|            | Metro           |                  |                     |                     |
| DIFF, CVD2 | C0, D1, D2, D3, | Solution adapta- | Solution adaptative | - Productivité éle- |
|            | D4              | tive             | à base d'un OHT     | vée,                |
| SCRUBBER   | SCR             | Solution adapta- | Solution adaptative | - Plafond bas,      |
|            |                 | tive             | à base d'un AGV     |                     |
|            |                 |                  |                     | - Productivité      |
|            |                 |                  |                     | moyenne,            |
|            | MDD, OIN        | OHT/AGV          | OHT                 | - OHT installé dans |
|            |                 |                  |                     | les autres bays de  |
|            |                 |                  |                     | l'atelier.          |
| PHOTO      |                 |                  |                     | - Productivité      |
|            |                 |                  |                     | moyenne,            |
|            | V1, V2, V3,     | Solution adapta- | Solution adaptative | - Productivité éle- |
|            | CUV, CIL        | tive             | à base d'un OHT     | vée,                |
|            | Metro           | Solution adapta- | Solution adaptative | - Productivité éle- |
|            |                 | tive             | à base d'un OHT     | vée,                |
| ETCH       | WCM, POG        | Solution adapta- | Solution adaptative | - OHT installé dans |
|            |                 | tive             | à base d'un OHT     | les autres bays de  |
|            |                 |                  |                     | l'atelier.          |
|            |                 |                  |                     | - Productivité      |
|            |                 |                  |                     | moyenne,            |

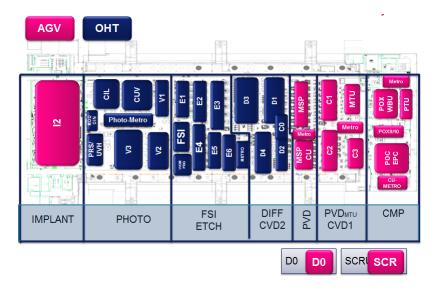


Figure 4.13 – Layout de la wafer fab et type d'AMHS par atelier.

## 4.3.4 Étape 4 : Définition de la stratégie de transport

À l'issue des précédentes étapes de la méthodologie, nous avons identifié le type d'AMHS à installer dans chaque atelier de la *wafer fab*. Il s'agit maintenant de proposer une stratégie globale de transport des lots entre les ateliers (inter-atelier) et aussi à l'intérieur de chaque atelier (intra-atelier). Fournir tous les détails techniques sur la configuration de l'AMHS et la stratégie de gestion des requêtes est assez complexe. Ainsi, nous gardons un certain niveau d'abstraction dans cette étape pour conserver l'aspect générique de la méthodologie.

#### 4.3.4.1 Niveau d'intégration d'un AMHS dans la wafer fab

Le niveau d'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs dépend de trois facteurs principaux :

- Le niveau d'automation dans l'unité de fabrication : c'est le degré d'intégration du processus informatique dans l'environnement de production,
- La planification de la production : ce sont les règles d'ordonnancement des produits à traiter sur les équipements de production. S'agit-il d'une planification optimisée ou juste des règles basiques de planification?
- La technologie des équipements de production : possibilité d'interfaçage direct entre les robots et les machines.

Selon ces facteurs, tels que représentés dans la Figure 4.14, nous distinguons trois niveaux d'intégration d'un AMHS dans une *wafer fab* :

- Niveau 1 : c'est le niveau le plus basique qui consiste à utiliser un système séparé inter-bay/intra-bay. Il ne nécessite pas un processus d'automation très développé, ni une gestion de production très optimisée dans l'unité de fabrication. La performance du processus de transport est souvent mesurer par le nombre de requêtes de transport réalisées par jour.
- Niveau 2 : ce niveau est basé sur le concept du transport unifié, ce qui nécessite une planification de production assez optimisée. Le suivi du temps de livraison (moyenne, écart-type) permet d'évaluer la performance de l'AMHS. Le passage du niveau de base vers ce niveau intermédiaire peut réduire le WIP dans la wafer fab.
- Niveau 3 : il s'agit du niveau le plus avancé dans l'industrie de semi-conducteurs. En effet, une vision « lot » est considérée dont l'objectif est de livrer juste à temps (On-Time). Ainsi, on parle d'un ordonnancement de WIP. En pratique, la mise en place d'un AMHS avec ce niveau d'intégrité est très compliqué.

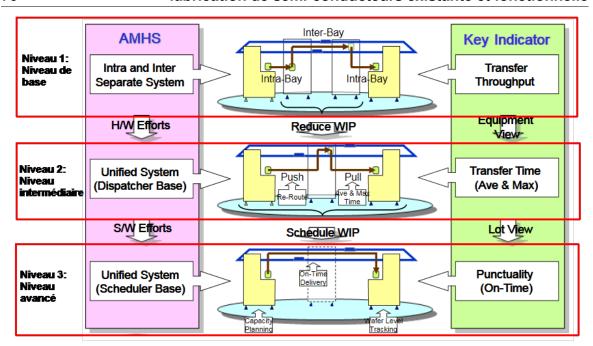


Figure 4.14 – Niveaux d'intégration d'un AMHS dans une wafer fab.

#### 4.3.4.2 Sélection de la configuration de l'AMHS

Tel que décrit précédemment dans le chapitre 2, on distingue principalement trois types de configuration d'un AMHS : le transport *inter-bay/intra- bay*, le transport unifié et le transport partiellement unifié. On peut trouver également une quatrième configuration très particulière : c'est le cas de plusieurs systèmes de transport avec des systèmes d'échanges de lots. Dans la Table 4.6, on présente le nombre de requêtes de transport générées en fonction de la configuration d'AMHS.

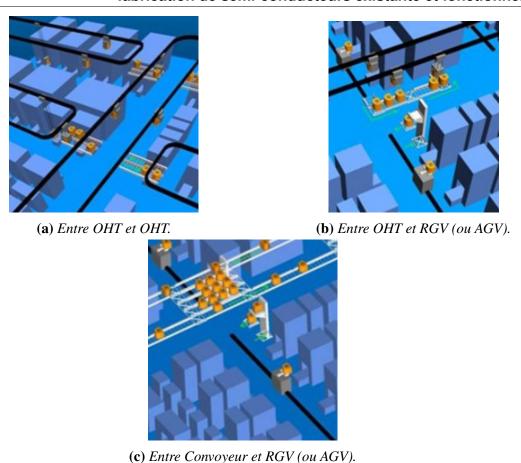
Globalement, d'après la Table 4.6, une configuration de transport unifié conduit à une seule requête de transport pour livrer un lot d'un point d'origine vers sa destination finale. Malgré cet avantage comparé aux autres configurations, le transport unifié peut générer des problèmes de congestion et de trafic sur les rails. En ce qui concerne le système séparé *interbay/intra-bay*, la livraison d'un produit à sa destination finale nécessite jusqu'à trois requêtes de transport. Dans le cas de plusieurs solutions de transport avec des systèmes d'échanges, le nombre de requête de transport dépend non pas seulement de la destination du produit à transporter, mais aussi de la particularité de chaque *wafer fab* (nombre de systèmes d'échanges, types d'AMHS, *layout* de la *wafer fab*...).

Type de requête de transport Configuration Entre deux Entre deux eqpts Entre deux eqpts Entre un eqpt de l'AMHS de la même bay de différentes bays et un stockeur stockeurs Inter-bay et 1 mouvement ou Intra-bay séparé 1 mouvement 3 mouvements 2 mouvements 1 mouvement (stockeur distant) Inter-bay et Intra-1 mouvement 1 mouvement ou bay séparé avec 1 mouvement (bays connectées) 2 mouvements 1 mouvement quelques bays unifié ou 3 mouvements (stockeur distant) Transport unifié 1 mouvement 1 mouvement 1 mouvement 1 mouvement 1 mouvement ou 1 mouvement Différentes solu-3 mouvements 2 mouvements 1 mouvement tions de transport avec des systèmes (stockeur distant) d'échanges

**Table 4.6** – Requête de transport pour les différentes configurations de l'AMHS.

Les résultats de l'application de la méthodologie sur le cas de la wafer fab 200mm à Rousset, à ce stade, ont montré la nécessité de considérer deux types d'AMHS (OHT et AGV) dans les différents ateliers. Ainsi, des systèmes d'échanges sont à prévoir pour le transfert des lots entre le système OHT et les AGVs. La Figure 4.15 présente des exemples des systèmes d'échanges. Dans notre cas, on ne s'intéresse qu'aux systèmes d'échanges ente un OHT et les AGVs (Figure 4.15b).

L'environnement de travail dans la *wafer fab* (niveau d'automation, planification de la production, technologie des équipements) permet d'avoir un niveau intermédiaire (Niveau 2) d'intégration de l'AMHS (voir Figure 4.14). Une configuration de transport unifié est alors à considérer tout en ayant comme objectif d'optimiser les temps de livraison. Cependant, l'hétérogénéité des types d'AMHS dans le cas d'étude implique une configuration partiellement unifiée. Cela signifie qu'un lot peut être transporté en une seule requête de transport de son origine jusqu'à sa destination s'il ne doit pas passer par un système d'échanges. Ainsi, il est possible de prévoir un transport unifié entre deux ateliers qui possèdent le même type d'AMHS, à condition que ces deux ateliers soient directement connectés.



**FIGURE 4.15 –** *Systèmes d'échanges de lots.* 

#### 4.3.4.3 Caractérisation de la configuration de l'AMHS

Après avoir déterminé la configuration d'AMHS à installer dans la *wafer fab* et son niveau d'intégration, il est question de fournir les détails qui semblent les plus pertinents afin de caractériser cette configuration. Dans un premier temps, nous visons la détermination des zones de transport unifiées dans l'ensemble de la *wafer fab*. Puis, les systèmes d'échanges sont dimensionnés en fonction des flux des lots entre les différents types d'AMHS.

**4.3.4.3.1 Transport unifié:** l'objectif est d'identifier les groupements d'ateliers qui peuvent avoir du transport unifié. Tels que décrit précédemment, les systèmes d'échanges sont prévus afin de permettre le transfert des lots entre les groupements d'ateliers. Ainsi, nous pouvons considérer ce problème comme un problème d'affectation de chaque atelier à un groupement d'ateliers de transport unifié en respectant des contraintes de type d'AMHS et des contraintes physiques liées au *layout* de la *wafer fab*.

Soit (At) l'ensemble d'ateliers de la wafer fab et  $(G_p)$  l'ensemble de groupement d'ateliers pour le transport unifié. On définit  $(F_{ij})$  le flux des lots entre l'atelier i et j, et (G) une matrice

binaire qui indique les restrictions sur les groupements des ateliers. C'est-à-dire si  $G_{ij} = 1$ , l'atelier i et j ne peuvent pas être regroupé. Ainsi, la matrice (G) est une donnée du problème qui dépend des contraintes physiques dans l'unité de fabrication et du type de l'AMHS dans chaque atelier.

Les variables de décision du problème sont :

- $x_i^k = 1$  si l'atelier i appartient au groupement d'atelier k, avec  $i \in At$ ,  $k \in G_p$ , 0 sinon,
- $y_{ij}^k = 1$  si les ateliers i et j sont dans le même groupement k, 0 sinon,
- $z_{ij} = 1$  si les ateliers i et j sont dans le même groupement, 0 sinon.

La formulation mathématique proposée est la suivante :

$$Min((\sum_{i \in At} \sum_{j \in At} W_{intra} F_{ij} z_{ij}) + (\sum_{i \in At} \sum_{j \in At} W_{inter} F_{ij} (1 - z_{ij})))$$

$$(4.3)$$

Sous-contraintes:

$$\sum_{k \in G_n} x_i^k = 1 \quad ; \quad \forall i \in At \tag{4.4}$$

$$(x_i^k + x_i^k) \le 1 \; ; \; \forall i, j \in At, \; i \ne j \; et \; G_{ij} = 1$$
 (4.5)

$$y_{ij}^{k} = x_i^k + x_j^k - 1 \; ; \; \forall k \in G_p, \; \forall i, j \in At \; et \; i \neq j$$
 (4.6)

$$\sum_{i \in At} \sum_{i \in At} y_{ij}^{k} F_{ij} \le Ca_{intra}; \quad \forall k \in G_{p},$$

$$\tag{4.7}$$

$$\sum_{i \in At} \sum_{i \in At} z_{ij} \ F_{ij} \le Ca_{inter} \tag{4.8}$$

$$z_{ij} = \sum_{k \in G_n} y_{ij}^k \; ; \; \forall i, j \in At, \tag{4.9}$$

$$x_i^k$$
,  $y_{ij}^k$ ,  $z_{ij} \in \{0, 1\}$  (4.10)

La fonction objectif proposée (4.3) est la minimisation du flux total entre les groupements d'ateliers (flux inter-groupement) et à l'intérieur de chaque groupement (flux de transport unifié). Ces flux transportés par un AMHS sont pondérés par des poids  $W_{inter}$  et  $W_{intra}$ . Les contraintes (4.4) expriment le fait qu'un atelier doit être affecté à un et un seul groupement. Les contraintes (4.5) imposent les contraintes de regroupement selon la matrice  $G_{ij}$ . Les contraintes (4.6) assurent la liaison entre les variables  $x_i^k$  et  $y_{ij}^k$ . Les contraintes (4.7) et (4.8) assurent le respect de la capacité de transport inter-groupement et intra-groupement. Les contraintes (4.9) assurent la liaison entre les variables  $z_{ij}$  et  $y_{ij}^k$ .

Des tests numériques sont réalisés afin de permettre l'analyse de la performance du modèle proposé en programmation linéaire en nombre entiers. Des instances du problème sont générées aléatoirement toute en gardant les caractéristiques principales des données industrielles et sans perte de généralité. Les expérimentations ont été effectuées avec le solveur IBM ILOG-CPLEX (12.6) en utilisant un processeur *Intel Core i5-4200U CPU*, 2.30GHz. Les flux inter-atelier et intra-atelier sont fixés entre 0 et 50 lots/heures. La matrice  $G_{ij}$  est générée aléatoirement pour avoir les possibilités de regroupement d'ateliers. La Table 4.7 présente les résultats obtenus sur les instances avec différents nombres d'ateliers. La capacité de transport dans un groupement d'atelier ( $Ca_{Intra}$ ) et la capacité de transport entre les groupements d'ateliers ( $Ca_{inter}$ ) sont considérées comme des variables pour les expérimentations. La durée de résolution, la valeur de la fonction objectif, ainsi que les groupements d'ateliers sont présentés dans cette table.

| Inst. | Nombre     | Cainter | $Ca_{intra}$ | Temps de résolution | Fonction | Nombre de group-  |
|-------|------------|---------|--------------|---------------------|----------|-------------------|
|       | d'ateliers | (lot/h) | (lot/h)      | (s)                 | objectif | -ement d'ateliers |
| 1     |            | 500     | 200          | 0.1                 | 314      | 2                 |
| 2     | 4          | 500     | 30           | 0.1                 | 358      | 3                 |
| 3     |            | 100     | 200          | 0.12                | 352      | 3                 |
| 4     |            | 30      | 200          | 0.11                | 420      | 4                 |
| 5     |            | 500     | 200          | 0.36                | 619      | 3                 |
| 6     | 8          | 500     | 30           | 0.41                | 766      | 6                 |
| 7     |            | 100     | 200          | 0.19                | 828      | 7                 |
| 8     |            | 500     | 200          | 0.8                 | 4464     | 7                 |
| 9     | 12         | 500     | 30           | 0.66                | 4774     | 9                 |
| 10    |            | 1000    | 200          | 0.7                 | 4411     | 6                 |

**TABLE 4.7 – Résultats obtenus pour les instances générées.** 

De façon globale, une augmentation légère de temps du calcul est observée quand le nombre d'ateliers augmente, mais ce temps reste très faible (inférieur à une seconde). En réduisant la capacité de transport d'un AMHS à l'intérieur d'un groupement d'atelier ( $Ca_{Intra}$ ), la valeur de la fonction objectif augmente et la composition des groupements d'ateliers change. En effet, le programme essaye de regrouper le maximum d'ateliers dans un minimum de groupements afin de minimiser le flux total. Cependant, les contraintes de capacité imposées forcent la solution à avoir plus de groupements. Cela conduit à une augmentation de la fonction objectif. Concernant la capacité de transport d'un AMHS entre les groupements d'ateliers, les analyses précédentes sont aussi valides.

Pour notre cas d'étude, rappelons que la wafer fab 200mm de STMicroelectronics à Rousset est composée principalement de 10 ateliers répartis sur deux niveaux. Deux types d'AMHS à installer dans les différents ateliers (solution à base d'un système OHT et des AGVs) sont précédemment identifiés. Les résultats de l'expérimentation menée avec les données industrielles en considérant une capacité infinie de transport d'un AMHS ( $Ca_{inter}$ ,  $Ca_{Intra}$ ) sont présentés dans la Figure 4.16.

Nous constatons, d'après la Figure 4.16, la décomposition de la *wafer fab* en cinq groupements d'ateliers. D'une part, la solution indique qu'on peut considérer un transport unifié à base d'un système OHT dans l'ensemble d'ateliers (Photo, Photo-metro, Etch et Diff/CVD2). D'autre part, les ateliers prévus pour être équipés d'un AMHS à base des AGV sont décomposés en quatre groupes : (Implant), (PVD, CVD), (CMP/CU) et (Scrubber, D0). Cette décomposition est due essentiellement à des contraintes physiques liées à la structure de la

wafer fab.

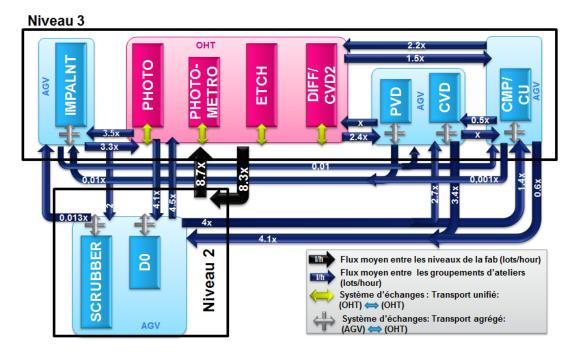


Figure 4.16 – Groupement d'ateliers pour le transport unifié.

De plus, un système de transport entre les groupements d'ateliers est à prévoir. Dans notre cas d'étude, étant donné la grande quantité de flux à échanger entre les groupements d'ateliers, un système OHT a été sélectionné pour assurer ce besoin de transport. À ce stade, il est important aussi de penser aux systèmes d'échanges qui permettent le transfert des lots entre l'OHT et les AGVs. Dans cette direction, nous abordons dans ce qui suit une étude qui vise le dimensionnement des systèmes d'échanges.

**4.3.4.3.2 Dimensionnement des systèmes d'échanges :** d'un point de vue fonctionnel, le système d'échanges a pour mission de recevoir des lots d'un type d'AMHS (OHT par exemple) et les rendre accessibles à l'autre type (AGV par exemple). Ainsi, techniquement, c'est un système automatisé composé principalement de deux parties :

- Un système de manutention : qui assure le transfert souvent d'un seul lot entre les deux types d'AMHS,
- Un système de *Buffer* avec une capacité limitée qui permet de stocker temporairement les lots.

Le diagramme de la Figure 4.17 présente le processus de livraison d'un lot arrivant d'un système OHT (ou AGV) et de transfert vers des AGVs (ou OHT) par un système d'échanges.

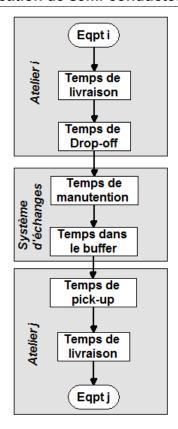


Figure 4.17 – Processus de livraison d'un lot entre deux ateliers avec différents types d'AMHS.

D'aprés la Figure 4.17, le système d'échange fait l'intermédiaire entre les deux types d'AMHS. Le temps de manutention est un paramètre fixe qui dépend de la technologie du système. Les positions dans le *buffer* permettent d'absorber la variabilité du processus d'arrivée des lots. Le temps d'attente dans le *buffer* est une variable qui dépend de la performance de l'AMHS dans l'atelier destinataire (*Atelier j*, dans la Figure 4.17). Il reflète le temps nécessaire pour qu'un robot ou un véhicule puisse répondre à la requête de livraison d'un lot dans le *buffer* du système d'échanges.

Dans cette étude, on se focalise sur le dimensionnement des systèmes d'échanges afin de mutualiser les différents types d'AMHS. L'objectif est d'optimiser deux éléments : (1) le nombre de systèmes d'échanges nécessaire entre deux groupements d'atelier et (2) la taille du *buffer* de chaque système d'échange. Une approche de simulation et d'expérimentation est utilisée pour résoudre ce problème. Un modèle de simulation à évènements discrets est développé sous le logiciel « Anylogic » afin de représenter globalement le processus de transfert des lots entre les deux types d'AMHS (voir Figure 4.17). Il s'agit d'une représentation macroscopique de l'échange des lots entre les groupements d'ateliers de production. Le modèle a été vérifié et validé afin de garantir la fiabilité des résultats. De plus, un plan d'expériences complet à deux facteurs a été généré pour définir les expérimentations à mener. Trois niveaux sont considérés pour chaque facteur :

— Facteur 1 : le nombre de systèmes d'échanges (1, 2, 3),

— Facteur 2 : le Temps Moyen pour qu'un véhicule ou un robot aille Récupérer un lot du *Buffer* (TMRB) (30s, 60s 90s).

La performance du processus de transfert des lots est évaluée selon deux indicateurs : (1) le nombre maximum des lots dans un *buffer*, et (2) le temps d'attente d'un lot dans le *buffer*.

La Table 4.8 présente les principaux paramètres de la simulation. L'horizon de simulation est fixé à une semaine de production et la durée d'une expérimentation est d'environ une minute. Cette durée était suffisante pour atteindre le régime stationnaire (ou permanent). Trois réplications sont nécessaires pour chaque expérimentation pour absorber la variabilité du modèle.

| Paramètre                                     |     | Valeur                   |
|---|-----|--------------------------|
| Temps de manutention du système d'échanges(s) |     | Triangulaire(4, 6, 8)    |
| Tampa da duan off (a)                         |     | Triangulaire (4, 6, 8)   |
| Temps de drop-off (s)                         | AGV | Triangulaire (8, 10, 12) |
| Towns do mistr um (s)                         | OHT | Triangulaire (4, 6, 8)   |
| Temps de pick-up (s)                          | AGV | Triangulaire (8, 10, 12) |
| Horizon de la simulation (semaine)            |     | 1                        |
| Nombre de réplication                         |     | 3                        |

Table 4.8 – Paramètres de la simulation.

Les expérimentations sont menées avec des instances représentatives du *WIP*. La Table 4.9 présente les résultats de la simulation pour le transfert des lots arrivants du niveau 3 (Implant, Photo, Photo-metro, Etch, Diff/CVD2, PVD, CVD1, CMP/CU) au niveau 2 (Scrubber, D0) de la *wafer fab* avec différents nombre de système d'échanges.

|            | Nombre de système d'échanges |                     |               |               |               |               |
|------------|------------------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|            | 1                            |                     |               | 2             | 3             |               |
| TMRB       | # lot dans le                | Temps dans le       | # lot dans le | Temps dans le | # lot dans le | Temps dans le |
| <b>(s)</b> | buffer                       | <i>buffer</i> (min) | buffer        | buffer (min)  | buffer        | buffer (min)  |
|            | (moy.,max)                   | (moy.,Ec.ty)        | (moy.,max)    | (moy.,Ec.ty)  | (moy.,max)    | (moy.,Ec.ty)  |
| 30         | (1.2, 9)                     | (0.47, 0.65)        | (0.74, 3)     | (0.15, 0.2)   | (0.74, 2)     | (0.09, 0.12)  |
| 60         | (> 100, >                    | (> 300, >           | (1.25, 12)    | (1, 1.5)      | (0.85, 5)     | (0.47, 0.68)  |
|            | 200)                         | 300)                |               |               |               |               |
| 90         | (> 100, >                    | (> 300, >           | (> 100, >     | (> 300, >     | (1.2, 10)     | (1.8, 2.18)   |
|            | 200)                         | 300)                | 200)          | 300)          |               |               |

**TABLE 4.9 – Résultats des expérimentations.** 

La performance de l'AMHS dans l'atelier destinataire représentée dans la Table 4.9 par le paramètre TMRB impacte largement la performance du processus de transfert des lots. Ainsi, il est important de fixer les objectifs (ou targets) à atteindre en terme de manutention automatisée dans les ateliers pour mieux dimensionner les systèmes d'échanges. Pour expliquer,

si par exemple les targets de temps de livraison dans l'atelier destinataire permettent d'avoir un TMRB moyen de 30 secondes, les résultats confirment qu'un seul système d'échanges peut satisfaire tout le besoin de transfert de lots. Dans ce cas, une capacité maximale de 9 lots dans le *buffer* est nécessaire. Le fait d'avoir un deuxième système d'échanges donne plus de marge dans le TMRB (jusqu'à 60 secondes) avec un *buffer* de 12 lots. De même, en considérant trois systèmes d'échanges, le transfert des lots est plus performant même avec un TMRB de 90 secondes.

Cependant, il est important de mentionner que le transfert de lots peut devenir un élément *bottleneck* pour le processus de transport automatisé. En effet, prenons, par exemple, le cas d'un TMRB de 90 secondes avec un seul système. Nous remarquons une dégradation très importante du temps d'attente dans le *buffer*. Cela conduit à une augmentation rapide et forte du nombre de lots dans le *buffer* (> 300 lots en pic d'activité).

Des expérimentations similaires à celles décrites précédemment ont été menées afin de dimensionner le processus de transfert des lots entre les différents groupements d'ateliers dans toute l'unité de fabrication. Suite à des discussions avec les ingénieurs de l'entreprise, un TMRB de 90 secondes semble être cohérent avec les objectifs de l'entreprise en termes de transport automatisé. De plus, une capacité maximale de 8 lots par *buffer* a été imposée pour des contraintes physiques et techniques. En considérant ces critères, la Figure 4.18 schématise la configuration de l'AMHS dans la *wafer fab*.

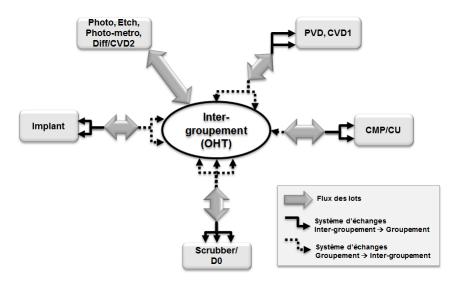


Figure 4.18 – Configuration de l'AMHS dans la wafer fab.

Le système OHT sélectionné pour le transport des lots entre les groupements d'atelier est au centre de la configuration de l'AMHS dans la Figure 4.18. À l'intérieur des cinq groupements d'ateliers, le transport unifié permet de livrer les lots en interne (intra-atelier) et aussi entre les ateliers (inter-atelier) qui font partie du même groupement. Les systèmes d'échanges assurent le transfert des lots entre les deux types d'AMHS (AGV et OHT) dans les deux sens : du inter-groupement vers un groupement, et d'un groupement vers l'inter-groupement. Les expérimentations réalisées dans cette étude nous ont permis de déterminer le nombre de sys-

tème d'échanges en considérant une capacité de *buffer* égale à 8 lots. Prenons l'exemple du flux sortant de l'atelier « Implant » vers le système d'inter-groupement, d'après la Figure 4.18, on constate que le transfert des lots devrait se faire en utilisant deux systèmes d'échanges afin d'éviter la perte de performance du processus de transport automatisé.

Dans cette étape de la méthodologie, on s'est concentré sur la définition d'une stratégie globale de transport automatisé dans la *wafer fab*. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons à l'aspect stockage des lots.

## 4.3.5 Étape 5 : Définition de la stratégie de stockage

L'automatisation des opérations de transport dans l'unité de fabrication nécessite la migration des méthodes traditionnelles de stockage manuel vers un processus automatisé. Cette étape présente une réflexion sur une stratégie globale de stockage du *WIP* dans les différents ateliers de la *wafer fab*.

#### 4.3.5.1 Solutions de stockage

L'objectif principal dans cette section est de caractériser les différentes solutions de stockage dans l'industrie de semi-conducteurs qui dépendent des spécificités du processus de production. Dans la Table 4.10, on présente les critères caractérisant les solutions de stockages. Vu le dynamisme de l'industrie de semi-conducteurs et la multitude des pistes d'évolution, l'idéal est d'avoir un espace de stockage de grande capacité, qui n'occupe pas trop d'espace et qui est facile à intégrer avec un faible temps d'accès.

Le critère de capacité est un facteur déterminant dans la conception d'une solution de stockage étant donné la quantité de WIP à gérer dans l'unité de production. L'avantage majeur d'un stockeur est sa capacité très élevée comparée aux autres solutions de stockage. Cependant, le temps de manutention des lots à l'intérieur et les pannes d'un stockeur peuvent avoir un impact direct sur la performance du processus de production (Kiba [47]). Quand il s'agit d'un AMHS à base d'un système OHT, les Overhead Hoist Buffers (OHB) sont considérés comme la meilleure solution de stockage au niveau du plafond. Cette solution offre une souplesse pour stocker les lots sans occuper de la place sur le plancher de la salle blanche. En contre partie, une gestion optimisée et dynamique (affectation des lots au OHBs) est nécessaire dans ce cas afin d'améliorer la performance de l'AMHS et s'adapter au mixe de produits en production.

Ces dernières années, une nouvelle technologie est en cours d'installation dans les *wafer fabs* modernes. Il s'agit d'un système de stockage, dit *Tool-Buffer*, de capacité d'environ 12 lots à proximité de chaque module de production. Ainsi, il est indispensable de prévoir suffisamment d'espace devant l'équipement de production pour installer un tel système. De plus, accessible directement par un système OHT, le temps de manutention de *Tool-Buffer* reste faible (autour de 15 secondes) comparé à un stockeur.

|  | Type de stockage       |                            |                           |                    |                        |  |
|--|------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|--|
| Critère                                  | LoadPorts              | Tool-Buffer                | OHB                       | Étagère            | Stockeur               |  |
| Capacité                                 | Technologie            | De 4 à 12 lots             | Très faible : 1 lot/OHB   | Elevé              | Très élevé             |  |
|  | (max 5 lots)           |                            | (dépends des rails)       | (variable)         |                        |  |
| Empreinte                                | Non                    | Oui/Non (tech-<br>nologie) | Non                       | Non                | Oui                    |  |
| Accès à par-<br>tir du pla-<br>fond(OHT) | Oui/Non (technologie)  | Oui                        | Oui                       | Non                | Oui                    |  |
| Place dans la salle blanche              | Non (intégré à l'eqpt) | Oui (dans les couloirs)    | Non                       | Oui                | Oui (trop<br>d'espace) |  |
| Temps de manu-<br>tention                | Très faible            | Faible (15s) (technologie) | Très faible (5s, Muratec) | Faible             | Elevé                  |  |
| Gestion                                  | Non                    | Oui (intégré)              | Oui (optimisa-<br>tion)   | Oui (optimisation) | Oui (intégré)          |  |
| Impact d'une panne                       | Très élevé             | Faible (technologie)       | Non impact                | Non impact         | Très élevé             |  |

**TABLE 4.10** – Analyse comparative de principales solutions de stockages dans les wafer fabs.

Il existe encore des solutions de stockage basées sur des étagères au sol dans la salle blanche. C'est le cas souvent des *wafer fabs* de l'ancienne génération qui sont équipées d'un système de manutention manuelle (des opérateurs). Cette solution de stockage reste très efficace dans ce type de *wafer fab* grâce à la flexibilité qu'elle donne au processus de stockage. En effet, des étagères mobiles sont souvent utilisées pour absorber la variabilité du *WIP* entre les différents ateliers. Un autre avantage important de l'utilisation des étagères est l'aptitude à les adapter face à une évolution d'un transport manuel vers un AMHS à base d'AGV.

Pour finir, selon la Table 4.10, les ports de chargement/déchargement (ou *LoadPort*) d'un équipement de production peuvent être considérés comme des solutions de stockage à capacité très limitée. Le fait qu'ils soient intégrés dans la machine, une panne d'un *LoadPorts* impacte directement la cadence.

#### 4.3.5.2 Emplacement des espaces de stockage

Le type ou la solution de stockage des lots à considérer dans une unité de production dépend principalement du système de manutention (des opérateurs ou un AMHS). La conception d'un espace de stockage est souvent prévue lors du dimensionnement de l'unité de fabrication. Dans notre cas, le problème est beaucoup plus compliqué. En effet, la *wafer fab* 200mm de STMicroelectronics à Rousset a été initialement conçue et optimisée avec une manutention manuelle et un processus de stockage basé sur des étagères fixes et mobiles. En intégrant un AMHS, c'est au nouvel espace de stockage automatisé de s'adapter à l'environnement complexe de production. La solution à mettre en place pour stocker le *WIP* dans

les différents ateliers ne doit pas seulement satisfaire les besoins de stockage, mais aussi respecter les contraintes physiques (dimension des couloirs, hauteur du plafond, *layout* des machines...). La Table 4.11 indique les solutions de stockage possibles par atelier.

| AMITC    | Atelier     | OHD | Tool-  | Etagères de | Etagères de | Etagères  | C4 o alsour |
|----------|-------------|-----|--------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| AMHS     | Ateller     | OHB | Buffer | proximités  | bays        | d'atelier | Stockeur    |
|          | Photo       | Oui | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Non         |
|          | Photo-metro | Oui | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Non         |
| Solution |             |     |        |             |             |           |             |
| à base   | Etch        | Oui | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Non         |
| d'OHT    |             |     |        |             |             |           |             |
|          | Diff / CVD2 | Oui | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Non         |
|          | Inter-      | Oui | Non    | Non         | Non         | Non       | Non         |
|          | groupement  | Oui | INOII  | INOII       | NOII        | INOII     | NOII        |
|          | Implant     | Non | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Non         |
|          | PVD         | Non | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Non         |
| Solution |             |     |        |             |             |           |             |
| à base   | CVD1        | Non | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Non         |
| d'AGV    |             |     |        |             |             |           |             |
|          | CMP / CU    | Non | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Non         |
|          | Scrubber    | Non | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Non         |
|          | D0          | Non | Non    | Oui         | Oui         | Oui       | Oui         |

**TABLE 4.11 –** Solutions de stockage possibles par atelier.

On note que les dimensions actuelles des couloirs et le *layout* des machines ne permettent pas l'installation des *Tool-Buffers*. De plus, il n'est possible dans les conditions actuelles d'intégrer un gros stockeur qu'au niveau 2 de l'unité de fabrication (atelier D0). Ainsi, d'une part, des espaces de stockage unitaires de type OHB peuvent être considérées dans le cas d'un système OHT (Photo, Photo-metro, Etch, Diff/CVD2). D'autre part, des étagères à proximité des équipements de production, des *bays* et des ateliers sont dédiées au stockage des lots dans les ateliers prévus pour du transport avec des AGVs (Implant, PVD, CVD1, CMP/CU, Scrubber, D0).

#### 4.3.5.3 Capacité des espaces de stockage

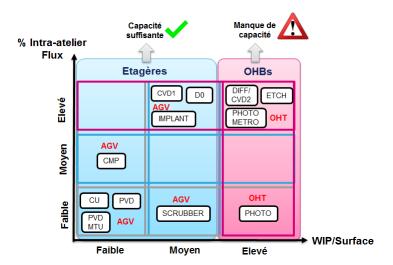
Dans cette section, on se focalise sur la détermination de la capacité nécessaire pour stocker le *WIP* dans les différents ateliers en présence d'un AMHS. À ce sujet, il est important de mesurer l'impact de l'intégration d'un AMHS sur le niveau de *WIP* dans la *wafer fab*. L'automatisation des opérations de manutention pourrait réduire le temps de transport et de stockage. Cela conduit à une baisse du *WIP*. Cependant, cette conclusion n'est pas toujours valide et dépend du processus actuel de calcul de *WIP* (avec la manutention manuelle). Ainsi, deux cas se présentent :

— L'intégration d'un AMHS permet de baisser le WIP : le niveau du WIP actuel (avec

la manutention manuelle) est élevé par rapport au besoin du processus de production. Cela signifie que, dans la méthode de calcul actuel, le temps de transport et le temps de stockage sont surestimés. En pratique, le fait d'avoir un WIP plus élevé assure l'approvisionnement des machines afin de maximiser leurs débits. Par contre, une quantité de WIP très élevée qui s'accumule devant les machines conduit à une charge de manutention plus élevé pour les opérateurs et pourrait poser des problèmes en terme de capacité de stockage, surtout dans les ateliers bottleneck.

L'intégration d'un AMHS n'a pas d'impact significatif sur le WIP: une estimation plus cohérente des temps de manutention (transport, stockage) permet d'avoir un niveau de WIP calculé plus proche des besoins réels dans la fab. En pratique, souvent, les temps de manutention sont utilisés comme curseur pour l'ajustement du WIP dans les ateliers. Dans ce cas, il s'avère qu'un AMHS ne pourrait pas réduire significativement le WIP.

Dans notre cas, des réunions avec nos partenaires industriels nous ont permis de confirmer que probablement l'intégration d'un AMHS ne conduira pas à une baisse significative du niveau de *WIP* dans l'unité de fabrication. Ainsi, pour définir la capacité nécessaire de stockage, nous considérons les paramètres du *WIP* sur la base de l'activité réelle dans les différents ateliers de production. La Figure 4.19 positionne les ateliers en fonction du pourcentage de flux (intra-atelier) et du *WIP* par surface de l'atelier.



**FIGURE 4.19** – Les ateliers en fonction du pourcentage de flux (intra-atelier) et du WIP par surface de l'atelier.

Rappelons que les solutions de stockage définies dans la section précédente sont des étagères (pour un AMHS à base d'AGVs) ou des OHBs (pour un AMHS à base d'OHT). L'analyse de la capacité de stockage sur la base des instances représentatives en pic d'activité confirme que, dans le cas d'une solution à base d'AGVs, le nombre d'étagères localisés dans les ateliers concernés est suffisant pour stocker tous le WIP. C'est le cas des ateliers : PVD, CMP/CU, Scrubber, D0, Implant et CVD1. En ce qui concerne les ateliers caractérisés par un WIP trop élevé, les emplacements de stockage des lots au niveau des rails du système OHT ne peuvent en aucun cas absorber la grande quantité de WIP. En effet, l'étude menée a montré

un manque de capacité total d'environ 600 places pour l'ensemble des ateliers (Diff/CVD2, Photo, Photo-Metro et Etch). Cela est principalement dû aux contraintes de poids maximum supporté par les rails ainsi que des contraintes budgétaires. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons pas fournir les détails de cette étude. Ainsi, un complément de capacité est indispensable pour stocker le *WIP* restant (autour de 600 lots). Nous présentons dans la Table 4.12 les solutions alternatives proposées face au problème de manque de capacité.

|                                 | Solution alternative |            |                 |  |
|---------------------------------|----------------------|------------|-----------------|--|
| Critère                         | Stockeur             | Etagères   | OHB             |  |
| Capacité                        | Suffisante           | Suffisante | Dépend de rails |  |
| Accès direct à l'OHT            | Oui                  | Non        | Oui             |  |
| Temps de manutention pour accès | Dépend (emplace-     | Moyen      | Faible          |  |
| à l'OHT                         | ment de stockeur)    |            |                 |  |
| Exigences physiques             | Espace non suffisant | Système    | Plus de rails   |  |
|                                 | au niveau 3          | d'échanges |                 |  |
| Coût                            | Très élevé           | Faible     | Elevé (coût de  |  |
|                                 |                      |            | rail + élevé)   |  |

**Table 4.12 –** Solutions alternatives pour le stockage des lots.

L'intégration d'un stockeur au niveau 3 de la *wafer fab* est impossible pour des raisons de place. Une réflexion qui s'avère intéressante consiste à localiser un stockeur au niveau 2. Cependant, cela peut conduire à un temps de transport très élevé. L'utilisation des étagères semble moins chère en termes de coût d'acquisition et d'installation. Par contre, il est important de prévoir un matériel additionnel pour le transfert des lots entre les étagères de stockage et le système OHT. Pour finir avec la Table 4.12, pour une meilleure performance du processus de transport, on peut suggérer l'ajout des rails afin d'installer plus d'OHBs. En effet, malgré le coût supplémentaire de rails, cette solution présente le moins de risque et de complexité par rapport aux deux autres solutions. On souligne également qu'une solution mixte de ces trois propositions est possible.

Dans notre cas, les discussions avec les ingénieurs et les décideurs de l'entreprise montrent leurs avis défavorable sur l'intégration d'un stockeur dans la *wafer fab* sur la base des retours d'expérience des autres sites de production de STMicroelectronics. De même, l'ajout des rails pour avoir une capacité de stockage supplémentaire ne semble pas de grande intérêt selon notre partenaire industriel. La décision est plutôt de considérer des étagères de stockage. À court terme, les tâches de gestion des étagères et de transfert des lots seront réalisées par des opérateurs qualifiés pour ce travail. À moyen-long termes, la mise en place d'une flotte d'AGVs est très probable pour l'automatisation complète de la manutention.

Dans ce qui suit, nous abordons la problématique de gestion des espaces de stockage.

#### 4.3.5.4 Gestion des espaces de stockage

Une gestion optimisée des espaces de stockage est de plus en plus demandée dans les unités de fabrication de semi-conducteurs. En particulier, en présence d'un AMHS, la performance du processus de transport est liée à celle du processus de stockage [78]. Rappelons que, dans cette étape de la méthodologie, nous visons la définition d'une stratégie globale de stockage des lots dans une ancienne *wafer fab* en phase d'intégration d'un AMHS. Ainsi, nous gardons un degré de généralité et nous présentons les grandes lignes sans fournir tous les détails.

La configuration de l'AMHS définie dans l'étape 3 de la méthodologie considère des groupements d'ateliers équipés d'un transport unifié. De ce fait, nous proposons deux niveaux de gestion de stockage selon les groupements d'ateliers :

- Niveau global: c'est la gestion du stockage des lots entre les groupements d'ateliers. Il s'agit, alors, de gérer le WIP qui s'accumule en fonction du flux inter-groupement. L'hypothèse de base considérée dans cette réflexion est que l'unité de fabrication opère en flux tiré (ou Push). Cela signifie que c'est la prochaine étape de traitement d'un lot qui dirige le flux de production. Ainsi, à la fin du traitement du lot sur un équipement de production dans un groupement d'ateliers (par exemple, Photo, Photo-Metro, Etch et Diff/CVD2), il est transporté vers le groupement d'ateliers destinataire. À ce niveau, si le prochain équipement de production est disponible, le lot est directement transporté vers le LoadPort. Sinon, le lot est acheminé vers un espace de stockage local (dans l'atelier destinataire) jusqu'à sa date de traitement.
- Niveau local: on se focalise sur le stockage des lots à l'intérieur d'un groupement d'atelier. À ce niveau local, le préacheminement est la notion clé dans le processus de gestion de stockage en intra-groupement. Le principe consiste à essayer de rapprocher un lot planifié vers l'endroit de stockage le plus proche (OHB, étagère) de l'équipement de production qualifié. Cela permet de réduire le temps de transport total, mais il nécessite une gestion optimisée de l'affection des espaces de stockage pour anticiper la livraison des lots.

Pour résumer, nous proposons une gestion de stockage du *WIP* à deux niveaux qui dépend de la planification de chaque lot. La décision d'affecter un lot à un espace de stockage (OHB, étagère) est prise selon l'emplacement de l'équipement de production destinataire. La Table 4.13 présente tous les cas possibles de destination des lots.

4.4 Conclusion 85

| Destination du lot      | Type d'AMHS | Espace de stockage             | Niveau de stockage |
|-------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------|
| Eqpt dans le            | AGV         | Etagère de proximité d'eqpt    | Local              |
| même bay                | OHT         | ОНВ                            | Local              |
| Eqpt dans un bay dif-   | AGV         | Etagère de proximité de bay    | Local              |
| fèrent                  |             |                                |                    |
| du même atelier         | OHT         | ОНВ                            | Local              |
| Eqpt dans un autre ate- | AGV         | Etagère de proximité d'atelier | Local              |
| lier                    |             |                                |                    |
| dans le même groupe-    | OHT         | ОНВ                            | Local              |
| ment d'ateliers         |             |                                |                    |
| Eqpt dans un autre      | AGV         | Etagère d'entrée d'atelier     | Global             |
| un groupement d'ate-    | OHT         | ОНВ                            | Global             |
| liers                   |             |                                |                    |

**TABLE 4.13 –** *Gestion de stockages des lots en fonction de leurs destinations.* 

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthodologie pour une intégration efficace d'un AMHS dans les différents ateliers de production d'une wafer fab existante et fonctionnelle. La méthodologie présentée vise, dans une première étape, à collecter et à analyser les données afin d'identifier les spécificités de chaque atelier de production. Puis, dans une seconde étape, une analyse comparative est menée afin d'identifier les avantages et les points faibles de chaque type d'AMHS. On sélectionne ensuite le type d'AMHS qui peut satisfaire les contraintes physiques et techniques de chaque atelier. La quatrième étape de la méthodologie consiste à fournir une stratégie globale de transport par la définition du niveau d'intégration nécessaire de l'AMHS dans la wafer fab. Nous visons aussi la configuration du transport automatisé et la caractérisation de ses principaux facteurs. En dernière étape, la méthodologie propose des éléments de réponse pour le stockage. Elle permet d'identifier les solutions de stockage et leurs emplacements dans les différents ateliers et la capacité de celles-ci sont déterminées afin de garantir un espace suffisant en période d'activité de pointe. La méthodologie proposée a été appliquée sur un cas d'étude industrielle : la wafer fab 200mm de STMicroelectronics à Rousset.

En considérant les résultats de ce chapitre, nous présentons dans le chapitre suivant une aide à la décision afin de fournir un planning de déploiement de l'AMHS dans les différents ateliers de l'unité de fabrication de semi-conducteurs.

## Chapitre 5

# Aide à la décision multicritère pour le déploiement d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs

La méthodologie proposée dans le chapitre précédent a permis d'identifier le type d'AMHS à installer dans chaque atelier de production d'une unité de fabrication de semi-conducteurs existante et fonctionnelle. Dans ce chapitre, nous nous intéressons au développement d'un planning efficace pour le déploiement de l'AMHS dans la *wafer fab*. Ce problème dépend de plusieurs critères qui peuvent influencer l'ordre de déploiement. Ainsi, nous proposerons une approche de résolution du problème en multicritères. Elle sera par la suite appliquée au cas de la *wafer fab* de STMicroelectronics à Rousset.

## 5.1 Description du problème

L'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs est un projet lourd en termes d'investissements et de ressources pour une entreprise. Ce projet peut durer plusieurs années surtout pendant la phase d'installation. Ainsi, il est indispensable d'avoir une stratégie efficace pour planifier l'intégration d'un AMHS dans les différents ateliers de l'unité de fabrication afin de garantir la réussite du projet. Dans ce contexte, Guldi et al. [32] présente trois possibilités :

- L'automatisation totale de l'ensemble de l'unité de fabrication dans une seule étape,
- L'automatisation par étapes en fonction des équipements de production,
- L'automatisation par étapes en fonction des groupements d'équipements dans un atelier.

Parmi ces trois options, le déploiement d'un AMHS en une seule phase dans la globalité de l'unité de fabrications semble très difficile d'un point de vue technique et opérationnel, voire impossible d'un point de vue financier. Dans un environnement très spécifique telle que la fabrication de semi-conducteurs, le fait de procéder par étapes dans l'intégration en fonction des familles d'équipements de production (2éme option) ou des ateliers (3éme option) permet de réduire la complexité et de concentrer les efforts et les ressources [32]. Dans le cadre

## Chapitre 5 : Aide à la décision multicritère pour le déploiement d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs

de cette thèse, des réunions avec le partenaire industriel ont permis de valider le choix de la troisième option dans la stratégie de déploiement de l'AMHS. Une planification efficace des différentes phases d'intégration est alors primordiale pour garantir la réussite du projet. Il s'agit de déterminer et justifier l'ordre de déploiement de l'AMHS dans les ateliers de production. Cela dépend de plusieurs critères (gain financier, problème de santé dû à la manutention manuelle, complexité des opérations de manutention...) qui peuvent impacter deux types de décision :

- Quel est le premier atelier (ou l'atelier pilote) dans le planning?
- Quel est l'ordre des autres ateliers dans le planning?

Dans ce qui suit, nous allons essayer de répondre à ces questions en adoptant une approche d'aide à la décision multicritères.

## 5.2 Approche de modélisation et résolution

Le déploiement d'un AMHS dans une unité de fabrication est une problématique qui dépend de plusieurs critères. L'objectif de cette étude est de fournir une aide à la décision aux manageurs. Ainsi, le challenge est de proposer un outil qui est capable, d'une part, de trouver le meilleur planning en fonction des critères définis. D'autre part, l'outil doit permettre aux décideurs d'évaluer l'impact de l'importance de chaque critère sur l'ordre de déploiement.

#### 5.2.1 Choix de la méthode de résolution

Pour traiter le problème sous étude, les méthodes de résolution des problèmes en multicritères sont souvent utilisées que ce soit les méthodes d'optimisation mathématique ou les MADMC (voir Chapitre 3). Dans notre cas, rappelons que les solutions sont connues à priori : l'ordre de chaque atelier dans le planning de déploiement. Ainsi, nous avons choisi d'utiliser une MADMC étant donné le contexte de cette étude, la nature du problème à traiter et les avantages de ce type de méthode. En particulier, la méthode AHP a montré une grande flexibilité et efficacité dans le cas des problèmes dont la solution est conditionnée par plusieurs critères [114].

Dans cette étude, nous proposons une approche de résolution basée sur la méthode AHP pour l'évaluation des critères et le classement des ateliers dans le planning de déploiement. La Figure 5.1 présente le schéma global de l'approche de résolution.

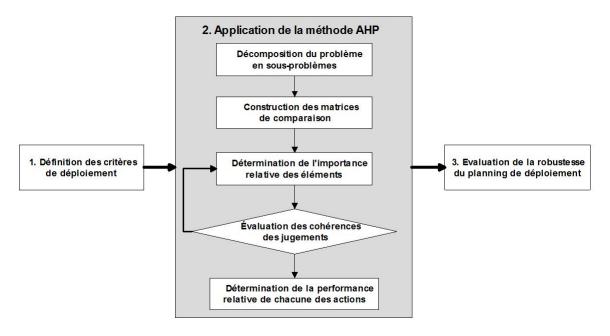


Figure 5.1 – Approche de résolution proposée

L'approche de résolution consiste en trois phases principales :

- 1. La définition des critères de déploiement : il s'agit d'identifier les critères qui peuvent influencer l'ordre de déploiement des ateliers.
- 2. L'application de la méthode AHP : les critères sont pondérés par des poids ce qui permet d'évaluer l'importance d'un critère par rapport à un autre en utilisant la méthode AHP.
- 3. L'évaluation de la robustesse du planning de déploiement : une analyse de sensibilité est menée dans la dernière phase afin d'évaluer la robustesse de la solution proposée. L'idée consiste à mesurer l'impact du changement du poids des critères sur le planning fourni.

# 5.2.2 Étapes de la méthode AHP

Le principe de la méthode consiste à modéliser le problème de décision sous la forme d'une structure hiérarchique qui décompose le problème général en des sous-problèmes. À chaque niveau hiérarchique de décision, l'évaluation des sous-problèmes est réalisée en comparant les éléments par paires. L'algèbre matricielle est utilisée pour trouver les poids des critères d'évaluation, ce qui permet la prise de décision. Les étapes de la méthode présentée dans la Figure 5.1 sont les suivantes [33]:

— Étape 1 : le problème est décomposé en des sous-problèmes sous une structure hiérarchique. Tel que présenté dans la Figure 5.2, l'objectif global du problème est au sommet de la hiérarchie, puis les autres éléments sont aux niveaux inférieurs. Les actions sont localisées au dernier niveau.

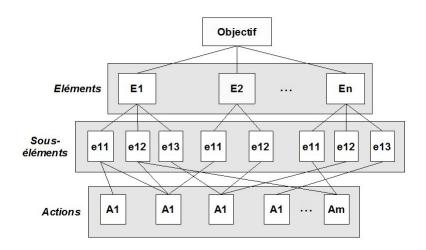


Figure 5.2 – Structure hiérarchique du problème

Étape 2 : pour chaque niveau hiérarchique, des comparaisons par paires des éléments sont réalisées par rapport à un seul élément du niveau supérieur afin d'obtenir les matrices de comparaison. Un questionnaire est souvent adressé aux experts afin de spécifier de façon très précise leurs jugements en répondant à des questions de type : Combien l'élément X est plus important que l'élément Y, par rapport à l'objectif global? Puis, les jugements sont transformés en valeurs numériques d'importance proposée par [97] qui sont présentés dans la Table 5.1.

Table 5.1 – Échelle numérique de [97]

| Echelle numérique | Définition et explication  |
|-------------------|--|
| 1                 | Importance égale des deux éléments                                       |
| 3                 | Importance faible : un élément est un peu plus important que l'autre     |
| 5                 | Importance forte : un élément est plus important que l'autre             |
| 7                 | Importance attestée : un élément est beaucoup plus important que l'autre |
| 9                 | Importance absolue : un élément est absolument plus important que        |
|                   | l'autre  |
| 2, 4, 6, 8        | Valeurs intermédiaires entre deux jugements, utilisées en cas de besoin  |
|                   | pour affiner le jugement   |

- **Étape 3 :** l'importance relative des éléments est déterminée par le calcul des valeurs propres et des vecteurs propres des matrices de comparaisons.
- Étape 4 : la vérification de la cohérence des résultats est basée d'abord sur le calcul de l'Indice de Cohérence (IC) par la formule suivante :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{5.1}$$

Avec *n* correspond au nombre d'éléments et  $\lambda_{max}$  est la valeur propre maximale de la matrice de comparaison par paires. Le Ratio de Cohérence (RC) est ensuite calculé

comme suit:

$$RC = \frac{IC}{ICM}100\tag{5.2}$$

Le terme ICM est l'Indice de Cohérence Moyen calculé pour une matrice générée aléatoirement de même taille. La Table 5.2 présente un exemple d'ICM en fonction de la taille n de la matrice.

Table 5.2 – Indice de cohérence moyen

| n   | 1 | 2 | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-----|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| ICM | 0 | 0 | 0.58 | 0.9 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

En général, un RC inférieur ou égal à 10% est considéré acceptable. Dans le cas contraire, certaines révisions sont nécessaires pour réduire les incohérences dans les jugements.

— **Étape 5 :** la performance relative de chaque action est calculée en fonction de l'importance des éléments dans chaque niveau hiérarchique par la formule suivante :

$$P_k(e_i^k) = \sum_{i=1}^{n_{k-1}} P_{k-1}(e_i^k) P_k(\frac{e_i^k}{e_i^{k-1}}) \text{ sachant que } \sum_{i=1}^{n_k} P_k(e_i^k) = 1$$
 (5.3)

Avec  $n_k$  désigne le nombre d'éléments du niveau hiérarchique k, et  $P_k$  ( $e_i^k$ ) est la priorité associée à l'élément  $e_i$  dans un niveau hiérarchique k.

Après avoir présenté le problème à traiter dans ce chapitre ainsi que l'approche de résolution proposée, la section suivante est dédiée à l'application pour le cas de la wafer fab 200mm de STMicroelectronics à Rousset.

# 5.3 Illustration et application : cas de la wafer fab de STMicroelectronics à Rousset

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'application de l'approche de résolution sur le cas de la *wafer fab* 200mm de STMicroelectronics à Rousset. D'abord, nous présentons les critères d'évaluation sélectionnés. Ensuite, nous abordons le problème de sélection du premier atelier (atelier pilote) à considérer dans le planning de déploiement. Puis, nous procédons à la détermination de l'ordre de déploiement des autres ateliers. Enfin, l'analyse de sensibilité menée pour évaluer la robustesse du planning de déploiement est présentée.

## 5.3.1 Définition des critères de déploiement

Des réunions ont été programmées avec le partenaire industriel afin de définir les principaux critères repartis sur trois aspects : financier, technique et humain.

#### 5.3.1.1 Performance financière

Le retour sur investissement (ou *Return On Investment (ROI)*) est souvent l'indicateur le plus utilisé pour évaluer le risque financier d'un projet. Dans le cas d'étude, d'après les discussions avec les responsables de l'entreprise, il s'avère que le calcul d'un ROI relatif à l'intégration d'un AMHS dans chaque atelier est très compliqué. Ainsi, un autre critère a été proposé. Il s'agit de la valeur monétaire attendue ou *Expected Monetary Value (EMV)* qui représente la somme d'argent gagnée suite à une certaine décision.

#### 5.3.1.2 Trouble MusculoSquelettique (TMS)

Les problèmes de santé chez les opérateurs dus à la manutention manuelle sont parmi les principales raisons de la décision d'intégrer un AMHS dans la *wafer fab*. Ainsi, le taux de TMS généré dans chaque atelier de production doit être considéré dans le processus décisionnel. Plus le taux de TMS est important dans un atelier, plus l'intérêt d'intégrer un AMHS dans cet atelier est élevé.

#### 5.3.1.3 Évolution des effectifs ou Heads Evolution (HE)

Il est important de souligner que l'objectif de l'entreprise en intégrant un AMHS est d'améliorer les conditions de travail (l'ergonomie) et la performance du processus de production. Ainsi, dans notre cas, on parle d'une automatisation qualifiante qui permet aux employés de l'entreprise d'évoluer dans leurs carrières [28]. L'idée consiste à éliminer les tâches sans valeurs ajoutées (telle que la manutention) réalisées par les opérateurs et les remplacer par d'autres tâches. La Figure 5.3 présente un exemple d'une évolution d'effectif due à l'intégration d'un AMHS.

Nous considérons une architecture typique d'une équipe de travail à trois niveaux : (1) opérateurs, (2) techniciens/agents de contrôle et (3) managers. L'intégration d'un AMHS conduit forcément à l'élimination des tâches liées à la manutention sur les trois niveaux. D'autre part, des nouvelles tâches de gestion, de contrôle et de maintenance de l'AMHS doivent être réalisées par l'équipe de travail. Ainsi, la nouvelle architecture nécessite une évolution de carrières des employées d'un niveau à un autre : (1) vers (2) et (2) vers (3). Il est possible également d'avoir une évolution au sein d'un même niveau. Il est ainsi plus intéressant d'intégrer rapidement un AMHS dans l'atelier qui présente une évolution importante dans la carrière des employés.

Dans cette étude, l'HE est considéré comme un critère qui peut influencer l'ordre de déploiement de l'AMHS. Pour chaque atelier, l'estimation de l'importance de ce critère due à l'intégration de l'AMHS doit être réalisée par le service de ressources humaines en collaboration avec celui des méthodes industrielles dans l'entreprise.

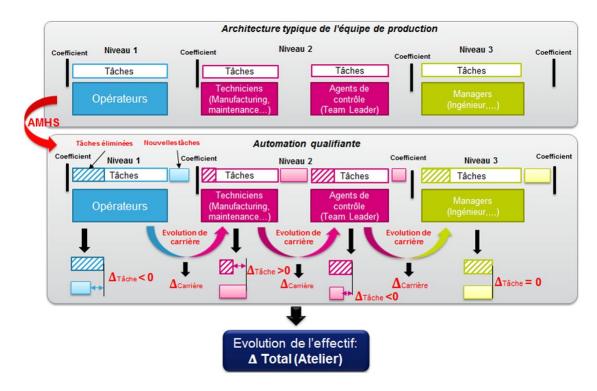


Figure 5.3 – Exemple d'une évolution de l'effectif due à l'intégration d'un AMHS

#### 5.3.1.4 Disponibilité du type d'AMHS à intégrer dans l'atelier (DAMHS)

Rappelons que le type d'AMHS à intégrer dans chaque atelier a été identifié par la méthodologie proposée dans le chapitre précédent. Le critère (DAMHS) correspond à la disponibilité du point de vue technique de la solution d'AMHS sur le marché. En effet, des contraintes techniques peuvent empêcher l'installation directe d'un AMHS dans un atelier. Ainsi, un travail de Recherche et Développement (R&D) est parfois nécessaire pour l'adaptation d'une solution d'AMHS existante sur le marché à la configuration d'un atelier. Cela conduira à un délai et un coût additionnels ce qui peut influencer la décision concernant l'ordre de déploiement. En effet, un industriel a plus d'intérêt d'intégrer une solution d'AMHS directement dans un atelier pour éviter le retard et le coût dus aux études de R&D.

#### 5.3.1.5 Complexité des Opérations de Manutention (COP)

Ce critère est défini afin de mesurer la charge de travail liée aux opérations de manutention dans chaque atelier de production. Typiquement, trois types d'opérations de manutention des lots remplis et parfois vides (cas de l'atelier de diffusion (DIFF)) sont réalisés par les opérateurs dans une *wafer fab* : le transport, le stockage et le chargement/déchargement. Un autre

# Chapitre 5 : Aide à la décision multicritère pour le déploiement d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs

type de manutention s'ajoute dans le cas de la photolithographie (PHOTO). En effet, en plus des lots, les opérateurs se chargent de la manutention des réticules.

L'intégration d'un AMHS permet de réduire ou de supprimer totalement les opérations de manutention manuelle dans l'unité de fabrication. Ainsi, il est important d'évaluer la complexité de la charge de travail actuelle effectuée par les opérateurs afin de bien planifier la migration vers un AMHS.

#### 5.3.1.6 Interaction entre les ateliers (IA)

L'identification de ce critère n'a pas été aussi évidente au début de cette étude. L'idée de base était inspirée par la notion d'objectifs hebdomadaires de production, dite *focus*. Il s'agit de fixer le *throughput* à atteindre par atelier (ou par baie) par type d'opération et par semaine. Pour réaliser ces objectifs, un processus d'optimisation de la planification est utilisé afin de fournir les quantités à traiter dans chaque *bay*. Dans le cadre du projet global de modernisation de la *wafer fab* à Rousset, une étude en court, qui vise le développement d'un outil d'ordonnancement (ou *Scheduler*) dans l'atelier de photolithographie, a montré qu'une optimisation locale (dans un seul atelier) sans tenir compte des *focus* des autres ateliers ne conduit pas forcement à une amélioration de la performance globale de l'unité de fabrication. Le fait d'optimiser la planification de la production localement dans un seul atelier permet de maximiser son *throughput*, mais cela peut dégrader la performance des ateliers en amont ou en aval si leurs *focus* hebdomadaires (ou *daily*) de production ne sont pas considérés dans l'optimisation.

Le critère (IA) modélise de façon grossière la notion de *focus* de production. Dans notre cas, nous avons estimé la notion d'interaction entre deux ateliers par le flux total de transport sur la base des instances représentatives du *WIP*. Si on considère que, par hypothèse, l'intégration d'un AMHS dans un atelier permet d'améliorer sa performance, l'impact sur le respect des *focus* de production est beaucoup plus important sur les ateliers à forte interaction. Ainsi, ces derniers deviennent prioritaires sur le planning de déploiement de l'AMHS. Pour identifier l'atelier pilote dans le planning de déploiement, ce critère est négligé. En effet, comme il s'agit du premier atelier à automatiser, on estime que le critère (IA) ne peut pas influencer la décision de commencer par un atelier plutôt qu'un autre.

Dans ce qui suit, les différentes étapes de la méthode AHP sont appliquées afin de déterminer le planning de déploiement.

# 5.3.2 Application de la méthode AHP

Cette section est dédiée à l'application de la méthode AHP pour identifier d'abord le premier atelier (atelier pilote) sur le planning de déploiement de l'AMHS. Ensuite, nous proposons un processus itératif pour trouver l'ordre de déploiement des autres ateliers de production.

#### 5.3.2.1 Sélection de l'atelier pilote

Pour identifier l'atelier pilote, nous procédons à l'application des différentes étapes de la méthode AHP.

Étape 1 : Décomposition du problème en des sous-problèmes.
 Une prise de décision de façon systématique est souvent très compliquée dans le cas de plusieurs critères d'évaluation [72]. Ainsi, le fait de décomposer le problème en des sous problèmes dans une structure hiérarchique dans la méthode AHP permet de

des sous-problèmes dans une structure hiérarchique dans la méthode AHP permet de réduire la complexité. Dans notre cas, on retient la hiérarchie présentée dans la Figure 5.4.

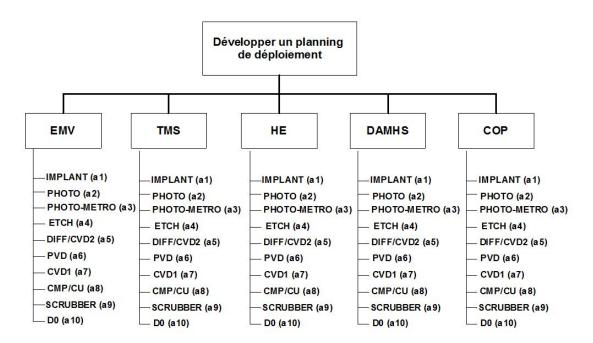


FIGURE 5.4 – Hiérarchie du problème de déploiement de l'AMHS selon la méthode AHP

Rappelons que le problème général consiste à développer un planning de déploiement de l'AMHS dans les différents ateliers de production de la *wafer fab*. Les critères identifiés sont au deuxième niveau de la structure. Les ateliers de production représentent les 10 alternatives possibles pour choisir l'atelier pilote.

— **Étapes 2+3 :** Comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique et détermination de l'importance relative des éléments.

Un questionnaire a été adressé aux experts de l'entreprise afin de fournir un jugement sur l'importance entre chaque deux paires d'éléments (voir Annexe B). Cela permet d'avoir la matrice de comparaison (M1) présentée dans la Table 5.3.

**TABLE 5.3 –** *Matrice de comparaison de l'importance des éléments (Matrice 1).* 

| Indicateur | EMV  | TMS  | HE   | DAMHS | COP  |
|------------|------|------|------|-------|------|
| EMV        | 1.00 | 3.00 | 5.00 | 9.00  | 7.00 |
| TMS        | 1/3  | 1.00 | 3.00 | 7.00  | 5.00 |
| HE         | 1/5  | 1/3  | 1.00 | 5.00  | 3.00 |
| DAMHS      | 1/9  | 1/7  | 1/5  | 1.00  | 1/3  |
| COP        | 1/7  | 1/5  | 1/3  | 3.00  | 1.00 |

Le calcul matriciel permet de trouver la valeur propre maximale et le vecteur propre correspondant :

$$\lambda_{max} = 5.2375 \text{ et } \omega_i = \begin{pmatrix} 0.8630 \\ 0.4401 \\ 0.2170 \\ 0.0561 \\ 0.1067 \end{pmatrix} \text{ ce qui donne } \omega_{i(Norma.)} = \underline{\omega_i} = \begin{pmatrix} 0.5128 -> EMV \\ 0.2615 -> TMS \\ 0.1290 -> HE \\ 0.0333 -> DAMHS \\ 0.0634 -> COP \end{pmatrix}$$

Les résultats montrent que le critère EMV est le plus important et que le critère DAMHS est le moins important d'après le jugement des experts. Nous procédons maintenant à la comparaison par paire d'actions (ateliers) selon les différents critères. Les matrices de comparaison (Matrice 2 (EMV)), (Matrice 3 (TMS)), (Matrice 4 (HE)), (Matrice 5 (DAMHS)) et (Matrice 6 (COP)) sont fournies dans l'Annexe B. Le traitement de ces matrices permet de calculer  $\lambda_{max}$  et le vecteur propre normalisé par critère  $\omega_i$ . La Table 5.4 résume les résultats du calcul matriciel.

Table 5.4 – Matrice de comparaison de l'importance des éléments

|                 |   |  | Critère   |   |   |
|-----------------|---|--|---|---|---|
| Paramètre       | EMV   | TMS  | HE  | DAMHS   | COP   |
| $\lambda_{max}$ | 10.4163   | 11.0663  | 10.4125   | 10.2082   | 10.0938   |
| $\omega_i$      | $\omega_2 = \begin{pmatrix} 0.0225 \\ 0.1969 \\ 0.1023 \\ 0.0166 \\ 0.0713 \\ 0.0326 \\ 0.0326 \\ 0.2795 \\ 0.0488 \end{pmatrix}$ | $\omega_3 = \begin{pmatrix} 0.1969 \\ 0.1668 \\ 0.0677 \\ 0.1939 \\ 0.016 \\ 0.0447 \\ 0.0321 \\ 0.2162 \end{pmatrix}$ | $\omega_4 = \begin{pmatrix} 0.0145 \\ 0.2238 \\ 0.0706 \\ 0.1493 \\ 0.0248 \\ 0.0248 \\ 0.0796 \\ 0.2238 \end{pmatrix}$ | $\omega_5 = \begin{pmatrix} 0.1659 \\ 0.0549 \\ 0.1659 \\ 0.0549 \\ 0.0202 \\ 0.1659 \\ 0.1659 \\ 0.1659 \\ 0.0202 \end{pmatrix}$ | $\omega_6 = \begin{pmatrix} 0.0422 \\ 0.1739 \\ 0.0422 \\ 0.0772 \\ 0.4183 \\ 0.0422 \\ 0.0422 \\ 0.0772 \\ 0.0422 \\ 0.0772 \\ 0.0422 \end{pmatrix}$ |
|                 | (0.1969)  | (0.0209)   | (0.0485)  | (0.0202)  | (0.0422)  |

D'après la Table 5.4, si par exemple on ne tient compte que du critère TMS, c'est l'atelier (SCRUBBER) qui est sélectionné comme atelier pilote.

Étape 4 : Évaluation des cohérences des jugements.
 Dans cette étape, nous calculons les Indices de Cohérence (IC) et les Ratios de Cohérence (RC) pour chaque matrice de comparaison. La Table 5.5 présente les valeurs d'IC et RC.

|     | Matrice 1 | Matrice 2 | Matrice 3 | Matrice 4 | Matrice 5 | Matrice 5 |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| IC  | 0.0594    | 0.0463    | 0.1185    | 0.0458    | 0.0231    | 0.0104    |
| ICM | 1.12      | 1.49      | 1.49      | 1.49      | 1.49      | 1.49      |
| RC  | 5.30%     | 3.10%     | 7.95%     | 3.08%     | 1.558%    | 0.708%    |

Table 5.5 – Résultats des cohérences des jugements.

D'après la Table 5.5, la valeur de RI pour toutes les matrices est inférieure à 10%. Cela permet de confirmer la cohérence des jugements.

Étape 5 : Performance relative de chaque action.
 Dans cette dernière étape de la méthode AHP, la priorité de chaque action est calculée en fonction de la priorité des éléments dans chaque niveau hiérarchique. La formule suivante permet de calculer les priorités de chaque atelier :

D'après le vecteur des priorités des ateliers, on confirme que l'atelier (PHOTO) (a2) qui possède le poids le plus élevé (0.1863) doit être considéré comme l'atelier pilote dans le planning d'intégration de l'AMHS. Cette décision est la meilleure étant donné les priorités des ateliers. Cependant, nous pouvons considérer l'importance des gaps de priorités entre deux ateliers successifs dans l'ordre de déploiement pour prendre la décision. Par exemple, il est possible, d'après la formule 5.4, de sélectionner les deux ateliers PHOTO (a2) et CMP/CU (a8) à cause de la différence très faible entre leur priorités (0.1863 et 0.1724). Dans notre cas, on se limite à la sélection d'un seul atelier à la fois toute au long de cette étude.

Dans ce qui suit, nous nous focalisons sur l'identification des prochains ateliers dans le planning de déploiement en utilisant une méthode itérative basée sur l'AHP.

#### 5.3.2.2 Sélection des prochains ateliers dans le planning de déploiement

Après avoir sélectionné l'atelier pilote, la méthode AHP est utilisée dans cette section afin de fournir le planning complet de déploiement. Dans la première étape de l'AHP, le critère (IA) est ajouté aux éléments dans la structure hiérarchique présenté dans la Figure 5.5. En même temps, l'atelier pilote (PHOTO) est enlevé de la liste d'ateliers dans le niveau le plus bas de la structure.

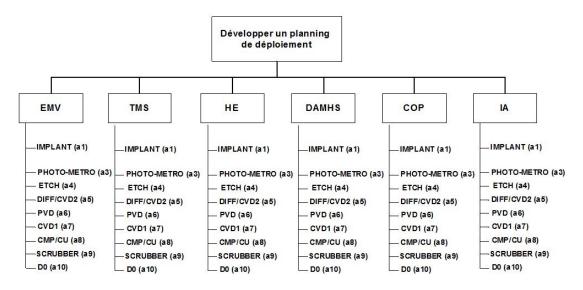


Figure 5.5 – Hiérarchie du problème de déploiement de l'AMHS selon la méthode AHP.

Ensuite, dans l'étape 2 et 3, la matrice de comparaison des éléments (voir Table 5.3) est mise à jour pour intégrer le jugement de l'important du critère (IA). La Table 5.6 présente la nouvelle matrice M1.

| <b>Table 5.6</b> – <i>Matr</i> | ice de comi | paraison de | l'importance | des éléments | (Matrice 1) |
|--------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
|                                |             |             |              |              |             |

| Indicateur | EMV  | TMS  | HE   | <b>DAMHS</b> | COP  | IA   |
|------------|------|------|------|--------------|------|------|
| EMV        | 1.00 | 3.00 | 5.00 | 9.00         | 7.00 | 4    |
| TMS        | 1/3  | 1.00 | 3.00 | 7.00         | 5.00 | 2    |
| HE         | 1/5  | 1/3  | 1.00 | 5.00         | 3.00 | 1/2  |
| DAMHS      | 1/9  | 1/7  | 1/5  | 1.00         | 1/3  | 1/6  |
| COP        | 1/7  | 1/5  | 1/3  | 3.00         | 1.00 | 1/4  |
| IA         | 1/4  | 1/2  | 2    | 6.00         | 4.00 | 1.00 |

D'autre part, une nouvelle matrice (M7) relative aux priorités des actions (les ateliers) pour le critère (IA) est générée. Nous procédons ensuite au calcul matriciel réalisé précédemment pour déterminer :

$$\lambda_{max} = 6.2656 \text{ et } \underline{\omega_1} = \begin{pmatrix} 0.4489 - EMV \\ 0.2253 - TMS \\ 0.0996 - HE \\ 0.0272 - DAMHS \\ 0.0496 - COP \\ 0.1493 - IA \end{pmatrix}$$

Nous évaluons ensuite la cohérence des jugements relative aux matrices (M1) et (M7). Les résultats de calcul présentés dans la Table 5.7 confirment la cohérence des jugements.

**TABLE 5.7** – Résultats des cohérences des jugements.

|     | Matrice 1 | Matrice 7 |
|-----|-----------|-----------|
| IC  | 0.0531    | 0.0434    |
| ICM | 1.24      | 1.45      |
| RC  | 4.28%     | 2.99%     |

La dernière étape de la méthode AHP permet de sélectionner l'action la plus profitable : le deuxième atelier sur le planning de déploiement après l'atelier pilote. Ainsi, pour développer tout le planning, plusieurs itérations sont réalisées. Le processus consiste à appliquer les étapes 1, 2, 3, 4 et 5 de l'AHP pour sélectionner le prochain atelier dans le planning. Une fois ce dernier trouvé, une autre itération est réalisée pour sélectionner l'atelier suivant. Le nombre d'itérations nécessaires dépend du nombre d'ateliers. À chaque itération, deux mises à jour sont effectuées :

- **Étape 1 :** l'atelier sélectionné dans l'itération précédente est enlevé de la liste d'ateliers.
- Etape 2, 3, 4 et 5 : la matrice (M7) est mise à jour pour tenir compte des interactions entre les ateliers déjà sélectionnés dans le planning et le reste des ateliers. De plus, les autres matrices de comparaison (M2, M3, M4, M5 et M6) sont aussi misent à jour. Il est important de souligner que la cohérence des jugements (IC et RC) pour toutes les matrices est vérifiée à chaque itération.

La formule 5.5 montre le calcul fait pour sélectionner le deuxième atelier. C'est l'atelier (CMP/CU). La matrice de comparaison des alternatives (ateliers) pour le critère IA (matrice M7) est présentée dans l'Annexe B.

En appliquant les itérations nécessaires, la Table 5.8 présente l'ordre de déploiement de l'AMHS dans les différents ateliers dans le cas de STMicroelectronics à Rousset. Le classement des ateliers proposé dans la Table 5.8 permet d'avoir une planification à moyen et long terme pour l'entreprise. En effet, on conclut que la meilleure décision consiste à commencer l'intégration de l'AMHS dans l'atelier (PHOTO), suivi de l'atelier (CMP), puis l'atelier (D0)...etc.

| Atelier     | Ordre dans le planning de déploiement |
|-------------|---------------------------------------|
| IMPLANT     | 10éme                                 |
| PHOTO       | Atelier Pilote (1er)                  |
| PHOTO-METRO | 4éme                                  |
| ETCH        | 7éme                                  |
| DIFF/CVD2   | 5éme                                  |
| PVD         | 9éme                                  |
| CVD1        | 8éme                                  |
| CMP/CU      | 2éme                                  |
| SCRUBBER    | 6éme                                  |
| D0          | 3éme                                  |

Table 5.8 – Ordre de déploiement de l'AMHS

En partant des jugements des décideurs, nous fournissons un outil d'aide à la décision en multicritères. La décision est fortement liée aux préférences des décideurs qui sont associés à une échelle numérique (voir Table 5.1). Cela peut introduire des biais et influencer la qualité des résultats. Face à ce problème, dans ce qui suit, nous proposerons une analyse de sensibilité pour évaluer l'impact d'une variation de l'importance des critères sur le classement des alternatives.

# 5.3.3 Évaluation de la robustesse du planning de déploiement

Dans cette section, une analyse de sensibilité est menée afin de mesurer la robustesse du planning de déploiement fourni par l'approche de résolution. L'idée consiste à modifier

5.4 Conclusion 101

les poids des critères et à évaluer son impact sur le classement proposé dans la Table 5.8. Cette étude est primordiale dans le cas d'une incertitude dans la définition de l'importance des critères. En se basant sur le travail de [101], nous avons réalisé plusieurs expérimentations en inversant à chaque fois le poids d'une paire de critères. Prenons l'exemple de la paire  $(EMV,TMS)=(C_1,C_2)$  (avec  $C_1$  est le poids de EMV et  $C_2$  est le poids de TMS), l'expérimentation menée consiste à échanger le poids entre les deux critères, ce qui donne  $(EMV,TMS)=(C_2,C_1)$ .

Dans cette étude, on se concentre sur l'analyse de sensibilité pour évaluer l'influence de l'importance des critères sur le choix de l'atelier pilote. Ainsi, dix expérimentations ont été menées. La Table 5.9 présente les résultats de l'analyse de sensibilité.

| N°           | e poids entre : Critère 1, Critère 2 | Atolian nilata |                |
|--------------|--------------------------------------|----------------|----------------|
| d'expérience | Critère 1                            | Critère 2      | Atelier pilote |
| 1            | EMV                                  | TMS            | PHOTO          |
| 2            | EMV                                  | HE             | PHOTO          |
| 3            | EMV                                  | DAMHS          | IMPLANT        |
| 4            | EMV                                  | COP            | DIFF           |
| 5            | TMS                                  | HE             | PHOTO          |
| 6            | TMS                                  | DAMHS          | PHOTO          |
| 7            | TMS                                  | COP            | CMP/CU         |
| 8            | HE                                   | DAMHS          | CMP/CU         |
| 9            | HE                                   | COP            | PHOTO          |
| 10           | DAMHS                                | COP            | PHOTO          |

Table 5.9 – Résultats de l'analyse de sensibilité.

On remarque d'après la Table 5.9 que l'atelier (PHOTO) possède la valeur d'importance la plus élevée dans 60% des expérimentations, puis l'atelier (CMP/CU) dans 20% des expérimentations. Ainsi, nous pouvons confirmer la robustesse de l'approche proposée en ce qui concerne la décision de sélectionner l'atelier (PHOTO) comme un atelier pilote pour l'intégration d'un AMHS. En effet, le processus d'aide à la décision est faiblement sensible au poids des critères.

# 5.4 Conclusion

L'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs existante et fonctionelle représente projet à un risque pour les décideurs de haut niveau (ou *top level management*) vu son ampleur financière et opérationnelle. Ce projet possède une grande importance pour une entreprise car il pourrait impacter de façon considérable sa performance à moyen-long terme. Le planning de déploiement est un facteur clé dans un tel projet afin de minimiser le risque opérationnel et financier. Dans ce chapitre, nous proposons une aide à

# Chapitre 5 : Aide à la décision multicritère pour le déploiement d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs

la décision afin de trouver le meilleur ordre de déploiement de l'AMHS dans les ateliers de production de la *wafer fab* en fonction des jugements des experts de l'entreprise.

Une approche de résolution des problèmes d'aide à la décision multicritères a été proposée. Dans un premier temps, les critères qui peuvent influencer l'ordre de déploiement ont été définis en se basant sur le retour d'expérience du partenaire industriel. Ensuite, les décideurs ont fourni des évaluations linguistiques des critères et des alternatives. Il est important de souligner l'impact possible d'une information imprécise ou incomplète sur la qualité des résultats. Ainsi, une attention très particulière doit être accordée à la subjectivité des opinions et à l'ambiguïté due aux caractéristiques linguistiques. Les jugements sont traduits en échelle numérique pour déterminer l'importance des critères et des alternatives en utilisant la méthode AHP. Une analyse de sensibilité a été finalement réalisée afin d'évaluer l'influence du poids des critères sur le processus de prise de décision. Dans cette analyse, on s'est focalisé sur l'impact du poids des critères que sur le choix du premier atelier dans le planning de déploiement (atelier pilote). Cependant, le travail peut être étendue prochainement pour mesurer la robustesse de tout le planning de déploiement.

La simplicité et la facilité d'application constituent la force majeure de la méthodologie proposée. Une telle méthodologie basée sur la méthode AHP incite, de façon générale, les décideurs à définir des critères de décision et leur importance à partir d'un jugement des experts. Rappelons que l'objectif principal dans le chapitre est de fournir un ordre de déploiement d'un AMHS dans les différents ateliers d'une unité de fabrication de semi-conducteurs. L'application de la méthode AHP pour résoudre un tel problème constitue l'originalité de ce travail. En plus, l'utilisation d'une approche itérative dans l'utilisation de l'AHP classique est une autre contribution de cette étude. Il est important aussi de souligner l'aspect générique de l'approche de résolution. En effet, indépendamment du secteur industriel, la méthodologie proposée peut être utilisée comme un outil d'aide à la décision pour planifier l'intégration d'un AMHS dans une unité de fabrication.

Cependant, l'approche proposée dans ce chapitre présente quelques limites. D'une part, certain critères définis sont spécifiques à l'industrie de semi-conducteurs (par exemple (IA)). Mais, son adaptation ne devrait pas être trop compliquée dans le cas d'autres secteurs industriels. D'autre part, le fait de considérer une échelle numérique de valeurs exactes issues des jugements d'experts entre les différents critères et alternatives peut générer des biais et de l'incohérence. Une extension de la méthode est possible pour tenir compte de l'incertitude dans les jugements. On parle ainsi d'une AHP floue [109]. Une autre piste possible des futurs travaux est de combiner la méthode AHP avec d'autres méthodes telles que PROME-THEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) ou TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) [43].

# Chapitre 6

# Méthodologie pour la conception d'un AMHS dans un atelier existant et fonctionnel : Cas de la photolithographie

Dans ce chapitre, nous proposons une démarche générique et innovante de conception (design) d'un Automated Material Handling System (AMHS) pour un atelier existant et fonctionnel. Cette démarche est basée sur un enchainement de cinq phases que nous détaillons dans la première partie du chapitre.

Ensuite, la démarche est appliquée sur un atelier de photolithographie. Ainsi, nous revenons en détail sur le fonctionnement de cet l'atelier et la solution d'AMHS sélectionnée. Enfin, le modèle de simulation développé pour le cas d'application et la stratégie d'expérimentation seront présentées.

# 6.1 Méthodologie proposée

Cette section est dédiée à la description de la méthodologie de résolution d'un problème général de conception d'un AMHS adéquat et optimisé pour un atelier existant et fonctionnel. Il s'agit d'un processus d'aide à la décision composé de cinq phases telles que présentées dans la Figure 6.1. Cette démarche possède plusieurs avantages :

- **Générique :** elle peut être appliquée à n'importe quel atelier existant et fonctionnel, indépendamment de la nature de l'activité ou du processus de production dans l'atelier.
- **Simple et efficace :** bien qu'elle consiste en 5 étapes seulement, l'enchainement de ces étapes permet d'avoir une vision globale d'un projet de conception d'un AMHS et de bien planifier et repartir les tâches entre les différents collaborateurs.
- **Innovante :** dans la littérature, à notre connaissance, aucune démarche similaire n'a été proposée dans ce contexte.

Chapitre 6 : Méthodologie pour la conception d'un AMHS dans un atelier existant 104 et fonctionnel : Cas de la photolithographie

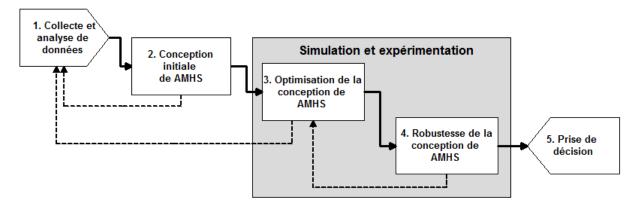


Figure 6.1 – Méthodologie pour la conception d'un AMHS pour un atelier existant et fonctionnel.

Il est important de souligner que, dans le cadre de cette méthodologie, nous considérons que le besoin d'intégration d'un AMHS a été, en partie, identifier et analyser par le partenaire industriel.

Dans ce qui suit, nous présentons les différentes phases de la démarche.

#### 6.1.1 Phase 1 : Collecte et vérification de données industrielles

L'objectif est d'extraire les données nécessaires qui sont principalement stockées dans les bases de données de l'entreprise. Dans un contexte industriel, la complexité de flux de données, la grande quantité d'informations et la pénibilité du processus d'extraction de données peuvent rendre cette phase longue. De plus, certaines données techniques doivent être issues des réunions avec les spécialistes de l'atelier ou des visites sur terrain. Une étape de vérification est indispensable afin de valider la cohérence de ces données. La vérification des informations peut se faire à travers des tests de cohérence et des réunions avec les spécialistes de l'atelier.

Il est absolument nécessaire de définir la liste exhaustive des données à collecter. Cette liste doit contenir le maximum d'informations a priori nécessaires pour les prochaines phases de la démarche. Cette étape permet, en partie, de chiffrer et analyser le besoin d'intégration d'un AMHS.

# 6.1.2 Phase 2: Conception initiale d'AMHS

Cette phase consiste à développer un *design* de l'AMHS basique qui satisfait les différentes contraintes techniques et physiques (emplacement et technologie des équipements de production, dimension des couloirs...) dans l'atelier. En effet, dans un atelier fonctionnel, déplacer les équipements de production est souvent une tâche compliquée et très coûteuse voir non envisageable d'un point de vue capacité. Ainsi, c'est lors de la conception initiale que l'AMHS doit, dans les limites du possible, s'adapter à la structure de l'atelier.

D'autre part, le *design* développé doit répondre aux besoins de manutention du processus de production. Dans ce contexte, le recours à des hypothèses simplificatrices est fortement conseillé afin de faciliter la tâche. En cas de manque de données, un retour à la « Phase 1 » est possible.

## 6.1.3 Phase 3 : Optimisation de la conception d'AMHS

Il s'agit, dans cette phase, de partir de la conception initiale de l'AMHS (« Phase 2 ») afin de développer un *design* optimisé. Pour cela, nous avons proposé une approche basée sur la simulation et l'expérimentation. L'idée consiste à modéliser le fonctionnement de l'atelier et à évaluer différents *designs* de l'AMHS en se basant sur des indicateurs clés de performance. L'objectif est de présenter les avantages et les limites de chaque alternative de *design*.

Cette phase constitue le cœur de la démarche et nécessite d'être abordée en détail. Ainsi, un manque de données est très probable, ce qui nécessite le retour à la « Phase 1 ».

## 6.1.4 Phase 4: Robustesse de la conception d'AMHS

Dans la phase précédente, un *design* optimisé de l'AMHS est proposé. Le but dans cette phase est d'évaluer la robustesse de ce *design*. L'idée consiste à mesurer la capabilité de la conception de l'AMHS proposée à supporter les évolutions possibles dans le processus de production de l'atelier. Il s'agit d'analyser l'impact d'une augmentation de la capacité de production sur la performance de la manutention automatisée. La même approche de simulation et d'expérimentation utilisée dans la « Phase 3 » est appliquée. Les scénarii à expérimenter sont définis avec les spécialistes et les ingénieurs de l'entreprise.

La robustesse d'un *design* est un élément clé dans un projet d'intégration d'un AMHS. Ainsi, une évaluation négative d'un seul élément de l'AMHS nécessite une révision du *design* optimisé (« Phase 3 »).

#### 6.1.5 Phase 5 : Prise de décision

La prise de décision sur la conception d'un AMHS à considérer pour l'implémentation réelle est la dernière étape de la méthodologie. La décision doit être principalement basée sur les conclusions et recommandations de la « Phase 3 » et la « Phase 4 ». En effet, ce sont les résultats de l'étude de simulation et d'expérimentation qui, normalement, orientent le choix du *design* final de l'AMHS. Ainsi, une démarche de sélection du/des meilleurs *designs* est à définir avec les collaborateurs du projet (le fabricant de l'AMHS, les ingénieurs et spécialistes de l'atelier, les décideurs dans la compagnie).

Dans ce qui suit, nous présentons le cas d'étude : l'atelier de photolithographie, en décrivant son fonctionnement, la manutention manuelle ainsi que la solution d'AMHS proposée.

# 6.2 Cas de l'atelier de photolithographie

Pour le cas de STMicroelectronics Rousset, l'application de l'approche d'aide à la décision en multicritère (voir Chapitre 5) a confirmé l'importance de l'atelier de photolithographie dans un projet d'intégration d'un AMHS dans l'unité de fabrication. En effet, cet atelier a été sélectionné comme étant l'atelier pilote pour commencer l'installation du système.

#### 6.2.1 Fonctionnement et manutention manuelle

L'opération de photolithographie est considérée comme l'une des plus complexes dans le processus de fabrication de semi-conducteurs pour plusieurs raisons (voir Chapitre 2). En particulier, l'utilisation des ressources auxiliaires (appelées réticules ou masques) est nécessaire pour la réalisation de l'opération sur une machine. Un réticule est habituellement associé à une opération d'un produit donné. Il est important d'avoir le bon réticule sur le bon équipement au bon moment pour effectuer l'opération. De plus, la zone de photolithographie est habituellement une zone critique (bottleneck) car elle possède les machines les plus coûteuses de l'usine, qui sont par conséquent en nombre limité. Pour éviter l'inactivité des machines, l'atelier contient habituellement un nombre important de lots en attente. Ainsi, toute amélioration de la gestion des flux de production aura un impact significatif sur l'ensemble de la performance de l'unité de fabrication.

L'atelier de photolithographie de la wafer fab de STMicroelectronics à Rousset possède plus de 25 équipements (ou modules de production) repartis sur une superficie de plus de  $1500 \, m^2$ . Le niveau des encours de production (ou WIP) dans l'atelier peut atteindre plus de  $20000 \, \text{plaquettes}$ . Les lots et les réticules (plus de  $4000 \, \text{réticules}$ ) sont gérés manuellement par des opérateurs qualifiés pour ces tâches : le chargement/déchargement des équipements de production, le transport et le stockage. Ces tâches répétitives et pénibles peuvent engendrer des effets négatifs aussi bien sur les opérateurs que sur le système opérationnel de fabrication.

#### 6.2.2 Solution d'AMHS

L'application de la méthodologie d'intégration d'un système de manutention automatisé dans une unité de fabrication de semi-conducteurs sur le cas de STMicroelectronics à Rousset (voir Chapitre 4) a orienté le choix de la solution de l'AMHS dans l'atelier de photolithographie. Cette solution consiste en un système OHT à base de rails unidirectionnels au plafond utilisés par deux flottes hétérogènes de véhicules : une pour transporter les lots, et l'autre pour transporter les réticules.

La Figure 6.2 représente un schéma simplifié de la solution de l'AMHS à implémenter dans l'atelier de photolithographie. Pour rentrer les lots dans l'atelier, un système appelé *In-Buffer* (avec une capacité maximale de 12 lots) est utilisé pour stocker temporairement les lots et les acheminer vers une position unique, dite *High position*, directement accessible par les véhicules. Ensuite, le lot est pris par un véhicule et il est transporté vers sa destination qui

est soit un port de chargement (ou *LoadPort*) d'un module de production soit une position unique de stockage, appelée *Overhead Hoist Buffer (OHB)*. Au vu des contraintes techniques imposées par la technologie de certains équipements de production, le lot ne peut être déposé directement sur le *LoadPort*. Ainsi, un système intermédiaire composé d'un port d'entrée (appelé *In-Tool*), d'un port de sortie (appelé *Out-Tool*) et d'un robot à 6 axes (appelé *Side-Loader*) a été conçu afin de permettre le chargement/déchargement d'un lot sur un *LoadPort*. Pour quitter l'atelier, le lot est transporté par un véhicule vers un système dédié, appelé *Out-Buffer*.

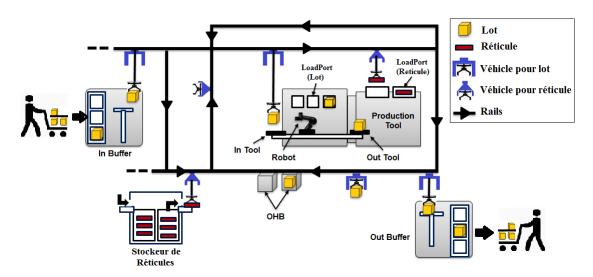


Figure 6.2 – Schéma de l'AMHS proposé dans l'atelier de photolithographie.

En ce qui concerne les réticules, une solution de stockage locale a été prévue pour garder les réticules proches des équipements de production dans l'atelier de photolithographie. Il s'agit d'un stockeur de grande capacité (plus de 1500 places) permettant de stocker les réticules dans un environnement sécurisé. En cas de requête de livraison d'un réticule, un système de robot permet de sortir le container unitaire (appelé *Pod*) contenant le réticule du stockeur et de le déposer sur un port de sortie directement accessible par un véhicule. Puis, le *Pod* est transporté par un véhicule vers le *LoadPort* du module de production dédié au chargement/déchargement des réticules.

La Figure 6.3 présente les éléments du système OHT :

- Les rails : il faut définir le réseau optimisé des rails afin de garantir l'accessibilité à tous les modules de production. L'objectif est aussi de réduire les temps de parcours des véhicules sans engendrer de la congestion sur des segments de rails.
- La flotte de véhicules: il faut déterminer le nombre de véhicules capables de répondre à toutes les requêtes de livraison pour les lots et les réticules (deux flottes hétérogènes). En effet, le facteur de la taille de chacune des flottes aura forcément un impact significatif sur la performance de l'AMHS. De plus, les politiques de gestion des véhicules sont à définir. Il faut aussi noter que l'utilisation du même réseau de rails par les deux flottes hétérogènes de véhicules peut conduire à des interactions. Celles-ci doivent être

- analysées afin d'évaluer leurs impacts possibles sur le processus de transport et de production dans l'atelier.
- Le stockage : pour les lots, nous avons à déterminer le nombre d'OHBs à mettre en place et la façon de gérer ce type de stockage unitaire. Des contraintes de capacité des rails et du plafond à supporter le poids des OHBs ainsi que des contraintes budgétaires imposent que leur nombre soit limité. Pour les réticules, il s'agit de définir le besoin en termes de stockage : la taille, l'emplacement et la politique de gestion des stockeurs.

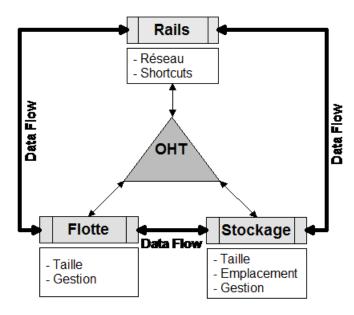


FIGURE 6.3 – Les éléments d'un AMHS à base d'un OHT.

Concevoir un AMHS dans un atelier de photolithographie qui n'a pas été bâti pour recevoir un tel système automatisé, représente un challenge compte tenu de la complexité des flux de production, des contraintes physiques, des algorithmes de gestion de production, etc. Pour le cas de STMicorelectronics Rousset, il est question de caractériser les différents éléments de l'AMHS (*In-Buffer*, *Out-Buffer*, véhicules, rails, stockeur, OHB).

# 6.3 Simulation et expérimentation

Dans cette section, nous présentons en détail l'étude de la simulation et d'expérimentation proposée pour optimiser le *design* d'un AMHS (« Phase 3 ») et mesurer sa robustesse (« Phase 4 »). D'abord, le choix de la méthode de simulation pour la résolution du problème est argumenté. Puis, on fournit les détails sur le modèle de simulation développé et la stratégie d'expérimentation utilisée dans le cas de l'atelier de photolithographie à STMicroelectronics Rousset.

#### 6.3.1 Choix de la simulation

Outre la complexité du processus de fabrication, le marché de semi-conducteurs a subi une forte évolution technologique ces dernières années. C'est pourquoi, les besoins de modélisation, d'analyse et d'optimisation du processus dans un temps raisonnable sont absolument nécessaires pour être en adéquation avec les évolutions technologiques. À ce sujet, deux grandes classes d'approche de modélisation sont utilisées : les méthodes analytiques (ou mathématiques) et les méthodes de modélisation-simulation (voir Chapitre 3).

La première méthode est basée sur des concepts mathématiques pour modéliser le problème. Bien que ce type de méthodes peut apporter des solutions optimales, un haut degré d'abstraction et de simplification est souvent nécessaire. En effet, les éléments stochastiques et le comportement dynamique du processus de fabrication en semi-conducteurs sont très difficilement descriptibles par des formules et des relations mathématiques. Afin de réduire la complexité, les problèmes traités sont souvent de petite taille. Ainsi, modéliser mathématiquement un processus complexe, comme celui de fabrication de semi-conducteurs, en tenant compte d'un ensemble d'incertitudes et de facteurs pouvant influencer la performance du processus tels que les opérations de manutention, est très difficile.

La deuxième méthode qui est basée sur des approches de modélisation-simulation est de plus en plus utilisée pour résoudre des problèmes issus de l'industrie de semi-conducteurs. Ce type d'approche a montré beaucoup plus d'efficacité pour modéliser et résoudre les systèmes complexes comparés aux approches mathématiques. La simulation est un outil puissant qui offre une bonne compréhension d'un système complexe, aide à prédire le comportement futur d'un système, permet d'évaluer l'impact des variations de paramètres, et d'analyse la performance opérationnelle. Les méthodes basées sur la simulation possèdent plusieurs avantages :

- La flexibilité par la facilité relative de modification, d'adaptation et de reconfiguration du modèle,
- La fiabilité avec la possibilité de vérifier (même visuellement) et de valider le fait que le modèle représente le système réel. De plus, la simulation permet une modélisation plus fidèle du processus en intégrant des caractéristiques réalistes,
- La réduction du temps de modélisation et de résolution grâce à un bon choix de la méthode de simulation (Évènement-Discret (ED), Multi-agent (MA)...) et de l'outil de simulation.

L'efficacité des méthodes de modélisation-simulation pour la résolution des différents problèmes de fabrication de semi-conducteurs a été confirmée par plusieurs travaux de la littérature (voir Chapitre 3). En particulier, concernant le *design* et l'optimisation de l'AMHS, la simulation est probablement l'approche la plus utilisée dans le cas des systèmes manufacturiers complexes [39].

Dans ce travail de thèse, nous adaptons une approche de modélisation-simulation pour "optimiser" (par expérimentation) le *design* d'un AMHS et évaluer sa robustesse. La section suivante donne les détails du modèle de simulation développé pour l'atelier de photolithographie de STMicroelectronics Rousset.

#### 6.3.2 Construction du modèle de simulation

L'objectif de cette section est de construire un modèle de simulation qui représente correctement le processus de fabrication dans l'atelier de photolithographie (flux de production, disposition des équipements, cadence des machines), ainsi que le AMHS.

#### 6.3.2.1 Modèle combiné : Évènements Discrets (ED) et Multi-Agents (MA)

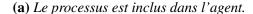
Il existe trois grandes familles de méthodes de simulation celles des Évènements Discrets (ED), la méthode Multi-Agents (MA) et la Dynamique des Systèmes (DS). Le choix de la méthode doit être basé sur la structure du système ou le processus à modéliser et des objectifs à atteindre. Dans notre cas, la méthode ED basée sur la notion de file d'attente peut sembler la plus appropriée pour modéliser le problème de conception d'un AMHS. Mais, la méthode ED est basée sur des informations statiques et prédéterminées et elle est souvent coûteuse en termes de temps de développement pour des systèmes manufacturiers à grande échelle. De plus, la structure d'un modèle conçu en ED reste statique et souvent ne peut pas être réutilisée pour un problème similaire.

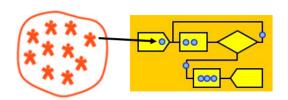
L'approche MA est plus flexible puisqu'elle est basée sur la notion de population d'individus (ou agents) qui sont capables de communiquer entre eux dans un environnement donné. Cette approche peut convenir à la modélisation des systèmes complexes de fabrication à grande échelle. Cependant, le concept de file d'attente, qui constitue le cœur du système manufacturier, n'est pas défini dans la méthode MA [10].

Dans notre cas, une méthode de simulation flexible comme MA et qui intègre le concept de file d'attente comme ED, est développée pour modéliser le problème. La Figure 6.4 représente les deux façons possibles de combiner la méthode ED et la méthode MA :

- Le processus est inclus dans l'agent (Figure 6.4a). Il s'agit de modéliser les éléments du système de grande échelle sous la forme des agents (qui peut être par exemple la fabrication, la distribution ou la chaîne d'approvisionnement). Puis, on modélise le processus interne à chaque agent, qui présente généralement une séquence d'opérations, en utilisant l'évènement discret.
- Les entités dans le processus sont définies comme des agents (Figure 6.4b). Dans certains modèles conçus en ED, les entités ont différentes stratégies et des façons d'agir en parcourant un système. Elles peuvent être, alors, définies comme des agents pour avoir plus de flexibilité dans le système.







**(b)** Les entités dans le processus sont définies comme des agents.

FIGURE 6.4 – Les deux façons de combiner la méthode ED et MA dans un modèle de simulation.

Dans notre cas, les deux façons décrites ci-dessus sont utilisées pour développer un modèle de simulation combinant les deux méthodes ED et MA. La Figure 6.5 représente la méthode de simulation utilisée pour modéliser le problème. Cette approche originale par rapport aux travaux qui ont abordé des problèmes similaires permet de dépasser les limites d'une modélisation en ED et d'avoir plus de flexibilité grâce à l'aspect MA.

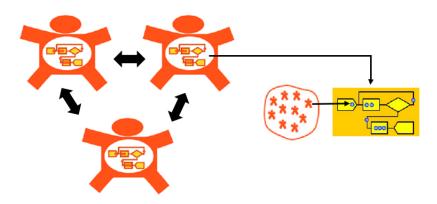


Figure 6.5 – Méthode de simulation utilisée pour modéliser le problème.

Les éléments clés de cette modélisation sont les agents :

- L'agent « Lot » transformé en entité; il contient les spécifications d'un lot (Identité « ID », type...) et les spécifications de chaque étape de production (recette, équipement, réticule...).
- L'agent « Réticule » transformé en entité; il contient les spécifications d'un réticule (Identité « ID », statut...) et les spécifications de chaque étape de production (recette, équipement...).
- L'agent « Equipement de production » qui contient le processus de traitement à l'intérieur de l'équipement en utilisant des blocs d'évènements discrets (source d'entités, ressources, ...).
- L'agent « Stockeur de réticules » qui contient le processus de stockage des réticules dans chaque stockeur.

# Chapitre 6: Méthodologie pour la conception d'un AMHS dans un atelier existant et fonctionnel: Cas de la photolithographie

— L'agent principal (ou « Main »); c'est l'agent de plus haut niveau dans le modèle. Il permet l'exécution du modèle, le contrôle des paramètres de simulation et la collecte des statistiques. Il contient aussi toutes les populations d'agents. De plus, l'agent principal comprend le réseau de rails du système OHT, les éléments d'animation et de la logique de l'AMHS (règles de transport, gestion des véhicules...).

Les agents définis dans le modèle sont capables pendant la simulation de communiquer et d'échanger des messages pour signaler par exemple le début ou la fin du traitement d'un lot.

Les processus modélisés sous la forme d'évènements discrets sont principalement :

- Le processus d'entrée et de sortie des lots de l'atelier de photolithographie; il s'agit de la modélisation des systèmes *In-Buffer* et *Out-Buffer*.
- Les séquences de production; c'est le processus de traitement des lots à l'intérieur des modules de production.
- Les opérations de transport : tel que l'affectation, le déplacement ou la libération d'un véhicule.
- Le processus de stockage d'un lot dans un OHB,
- Le processus de stockage d'un réticule dans un stockeur.

Le modèle de simulation a été développé en utilisant le logiciel « Anylogic » [10]. Ce logiciel possède plusieurs avantages comparé à d'autres logiciels de simulation. En effet, il est possible sous « Anylogic » de combiner plusieurs méthodes de simulation (ED, MA, DS) dans un seul modèle avec une interface graphique de 2 ou 3 dimensions (2D ou 3D). Le logiciel est développé en langage de programmation « Java », ce qui permet à l'utilisateur d'interagir pour programmer les détails désirés pendant la phase de modélisation. De plus, plusieurs exemples et tutoriaux sont mis à disposition dans « Anylogic », ce qui facilite sa prise en main.

#### 6.3.2.2 Logique des événements dans le modèle

Le diagramme de la Figure 6.6 présente la logique des évènements dans le modèle de simulation. D'abord, le modèle est initialisé (bloc 1) par les paramètres de simulation (durée, étape...) et les paramètres liés aux opérations de manutention automatisées (nombre de véhicules, temps de manutention, vitesse...) (bloc 2). Les instances du WIP qui contiennent les attributs des lots et des réticules sont aussi injectées initialement dans le modèle (bloc 3).

Ensuite, le processus d'arrivée des lots dans l'atelier commence de la façon suivante (bloc 4) : un opérateur transporte les lots par groupe (ou *batch*) vers le système *In-Buffer* (bloc 6). Puis, une requête de livraison est générée selon la planification du *Scheduler* pour transporter un lot vers sa destination : un équipement de production ou un OHB. Dans le diagramme de la Figure 6.6, on a considéré que le lot est directement transporté sur l'équipement de production pour simplifier le schéma. Si le lot est acheminé par un véhicule vers un OHB, il attend sa date de début de traitement définie par le *Scheduler* pour être transporté sur un

*LoadPort* de l'équipement de production. Le contrôleur de la flotte assure la gestion des véhicules (bloc 9,..., bloc 13) : affectation, mouvement et libération.

Une fois le lot chargé sur le *LoadPort* par le robot *Side-Loader* (bloc 14), le traitement peut commencer (bloc 15). À ce moment, le système fait appel à un réticule afin de préparer la deuxième phase de traitement du lot (bloc 16). Quand le réticule est disponible, le contrôleur de la flotte lance une mission de livraison du réticule (bloc 18,..., bloc 22) de sa position d'origine vers l'équipement de production (bloc 23). Le temps dans le modèle avance et la deuxième phase de traitement est réalisée (bloc 24, bloc 25). Ainsi, le réticule est déchargé (bloc 26), puis il est transporté vers sa nouvelle destination (équipement de production ou stockeur).

Le lot poursuit sa dernière phase de traitement (bloc 27, bloc 28), ensuite, il est déchargé (bloc 29). Puis, selon la planification proposée par le *Scheduler* (bloc 30), le lot est transporté par un véhicule vers le système *Out-Buffer* (bloc 31). Cette logique implémentée dans le modèle est suivie durant la simulation (bloc 32). Lorsque le temps de simulation est écoulé, l'expérimentation s'arrête et génère automatiquement les statistiques et les indicateurs de performance (bloc 33, bloc 34).

Chapitre 6 : Méthodologie pour la conception d'un AMHS dans un atelier existant 114 et fonctionnel : Cas de la photolithographie

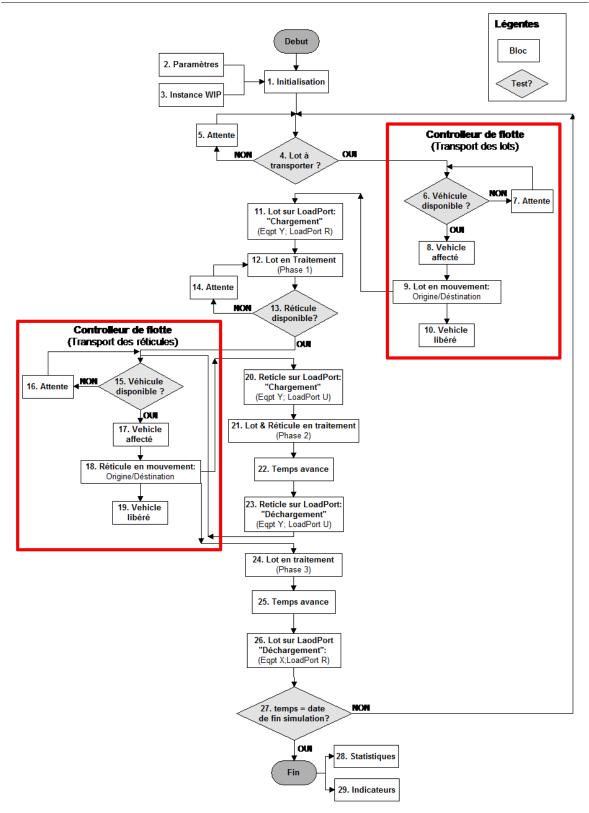


FIGURE 6.6 – Diagramme de logique des évènements dans le modèle.

#### 6.3.2.3 Structure générale du modèle de simulation

L'AMHS est au centre de la structure du modèle de simulation tel que présenté dans la Figure 6.7. Les lots et les réticules planifiés sont donc transportés selon une matrice *From/To* qui fournit le couple (Origine, Destination) pour chaque requête de livraison. L'AMHS dans la structure joue un rôle principal. En effet, il assure la liaison entre la planification de la production, le stockage, le module de production et les systèmes d'entrée/sortie (*In-Buffer* et *Out-Buffer*). Vue l'inaccessibilité aux informations sur le fonctionnement interne des modules de production, ces derniers sont modélisés en considérant seulement les temps de traitement et sans tenir compte des opérations de manutention des lots ou des réticules à l'intérieur de la machine.

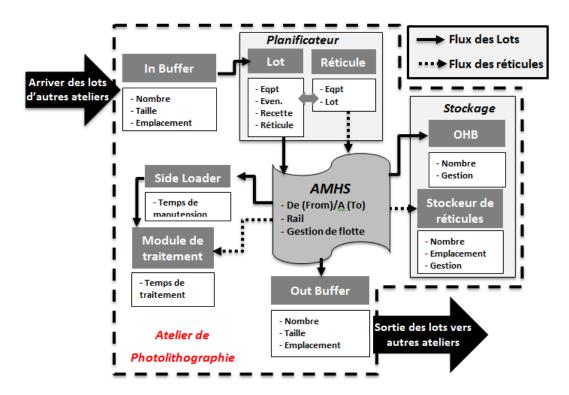


Figure 6.7 – Schéma de la structure générale du modèle.

Le modèle de simulation développé considère la disposition réelle de l'atelier de photolithographie (dimension, couloirs...) et la proposition initiale de réseaux de rails donnée par le fournisseur du système OHT. De plus, la position actuelle, la cadence et la technologie des équipements de production sont pris en compte dans le modèle. Les différents éléments qui caractérisent la flotte de véhicules (la vitesse du véhicule, le temps de manutention, les règles de gestion...) sont aussi inclus dans le modèle en se basant sur les données du fabricant.

## 6.3.3 Hypothèses de modélisation

On termine la description du modèle de simulation par la présentation des hypothèses considérées pendant la phase de modélisation. Quand il s'agit d'utiliser une approche basée sur la simulation pour modéliser des systèmes complexes, certaines hypothèses sont souvent considérées pour réduire la complexité et diminuer le temps de développement. Le modèle de simulation ainsi doit contenir uniquement les détails nécessaires, mais sans trop d'hypothèses de simplification. La granularité du modèle découle de plusieurs discussions avec les ingénieurs et les spécialistes de l'atelier de photolithographie. Les principales hypothèses considérées dans le modèle sont les suivantes :

- La manutention manuelle pour entrer ou sortir des lots de l'atelier de photolithographie par des opérateurs n'a pas été modélisée afin de se concentrer sur l'objectif principal de l'étude (conception d'un AMHS).
- Une seule politique d'assignation ou d'affectation d'un véhicule à une requête de livraison a été implémentée dans le modèle : dans le cas de deux véhicules libres, la requête de transport est affectée au véhicule le moins utilisé (*Less used*) et la plus proche (*Nearest Vehicle (NV)*). L'idée est d'éviter des problèmes de déséquilibre dans l'utilisation de la flotte.
- Les composantes du système OHT (rails, véhicules, stockeurs et OHB) sont considérées comme fiables (taux de panne et maintenance négligeable). En effet, la haute fiabilité de ce type d'AMHS est son atout majeur comparé à d'autres types de système de manutention [39].

#### 6.3.4 Validation du modèle de simulation

Le concept de validation dépend fortement de la nature du modèle développé et des objectifs de l'étude. Dans notre cas, le rôle de l'AMHS à implémenter est d'assurer un service pour la production : c'est la manutention automatisée (stockage, transport, chargement/déchargement). Ainsi, il faut valider que le modèle respecte la logique des requêtes de livraison (origine, destination) pour les lots et les réticules. Cependant, la logique du processus de production liée à la planification ou à la maintenance pourrait ne pas être considérée. En effet, même si aucun AMHS ne peut être séparé du système manufacturier, l'interface de contrôle des requêtes de livraison peut être dissociée du système de planification ou *Scheduler*.

Nous avons validé le modèle de simulation à travers les processus de comparaison et d'analyse suivants :

- La matrice (Origine/Destination); l'idée est de comparer les flux réels des lots et réticules avec les flux issus du modèle de simulation. La Table 6.1 présente la matrice de flux des réticules (avec X, Y entiers différents de zéro) extraite du modèle de simulation. Les valeurs dans la Table 6.1 ont permis de valider la cohérence entre les flux réels dans l'atelier et les statistiques données par le modèle.
- La planification des lots; le planning des lots (le couple (lot, équipement)) fourni par les instances réelles du *WIP* ont été comparées avec les statistiques du modèle de

- simulation. Les résultats de la comparaison ont montré que la planification réelle est bien respectée dans le modèle de simulation.
- Les indicateurs de performance; il s'agit de comparer, dans la limite du possible, les valeurs de quelques indicateurs de performance actuels de production dans l'atelier de photolithographie avec les valeurs obtenues du modèle. La Table 6.2 montre les résultats de cette comparaison et confirme la fiabilité du modèle développé. En effet, la marge d'erreur entre les valeurs réelles et les résultats du modèle est très réduite (moins de 2%).

L'étape de validation, assez longue, n'est pas négligée dans cette étude. À l'issue de cette étape, la validité et la fiabilité du modèle de simulation développé ont été confirmées.

**TABLE 6.1 –** *Matrice (Origine/Destination) entre les équipements et les stockeurs : distance (position haute) et flux de réticules (position bas, nombre total de transports).* 

|      |          |        |        | Origine | )      |            |
|------|----------|--------|--------|---------|--------|------------|
|      |          | CUV01  | CUV02  | CUV03   | •••    | Stockeur 2 |
|      | CUV01    | -      | 5.78X  | 2.2X    | •••    | 66.98X     |
| ш.   |          | -      | -      | Y       | •••    | 1181Y      |
| atic | CUV02    | 5.78X  | -      | 5.65X   | •••    | 61.36X     |
| ţį   |          | -      | -      | 17Y     | •••    | 1253Y      |
| )esi | •••      |        | •••    | -       | •••    |            |
|      | Stockeur | 66.93X | 61.36X | 55.3X   | 64.83X | -          |
|      | 2        | 1182Y  | 1249Y  | 1344Y   | 1186Y  | -          |

**TABLE 6.2** – Comparaison entre les indicateurs de performance réels et ceux donnés par le modèle.

| Indicateur         | Mod./Réali.  | Équipement |       |     | Débit | Erreur(%)  |
|--------------------|--------------|------------|-------|-----|-------|------------|
| mulcateur          | Mou./ Reall. | CUV09      | CUV17 | ••• | total | Effeur (%) |
| Throughput (lots)  | Modèle       | 295        | 438   |     | 5976  | 1.02       |
|                    | Réalité      | 298        | 442   |     | 6038  |            |
| Taux d'utilisation | Modèle       | 83.3       | 84.88 |     | 89.91 | 1.04       |
| moyen (%)          | Réalité      | 83.92      | 84.94 |     | 90.86 |            |

# 6.3.5 Stratégie d'expérimentation

Dans ce qui suit, on présente la stratégie d'expérimentation couplée à la simulation. Le schéma de la Figure 6.8 représente la stratégie d'expérimentation proposée. Le modèle de simulation est alimenté par des instances réelles de *WIP*, extraites directement de la base de données de l'entreprise, qui fournissent les données relatives à la planification de la production (le triplet (Lot ID, Réticule ID, Equipement ID), temps de traitement...). Puis, on réalise plusieurs réplications et on fournit à chaque fin de simulation les résultats statistiques.

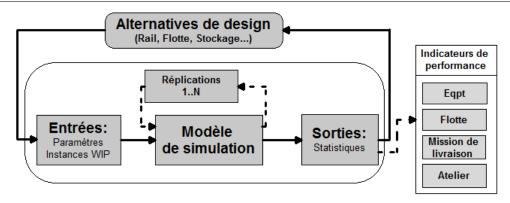


FIGURE 6.8 – Schéma de la stratégie d'expérimentation.

Les alternatives de *design* sont évaluées sur la base des indicateurs clés de performances. On peut à ce sujet prendre l'exemple de deux alternatives simples :

- Le « Design » n°1 : un seul stockeur de réticules est considéré dans le modèle, avec une configuration standard des autres éléments de l'AMHS (rails, véhicules...).
- Le « Design » n°2 : deux stockeurs de réticules sont considérés dans le modèle, avec la même configuration des autres éléments de l'AMHS que le « design » n°1.

Les alternatives de *design* peuvent être déterminées en utilisant le concept de plan d'expérience (ou *Design Of Experiences* (DOE)). Cependant, dans le cas d'un grand nombre de facteurs (multifactoriel), le *DOE* engendre un nombre élevé de combinaisons à tester et à évaluer, ce qui peut être compliqué dans un milieu industriel. Dans notre cas, toutes les caractéristiques des éléments (ou composantes) de l'AMHS sont considérées comme des facteurs :

- Facteur 1 : nombre de véhicules dédiés pour les lots,
- Facteur 2 : nombre de véhicules dédiés pour les réticules,
- Facteur 3 : politique de gestion de la flotte,
- Facteur 4 : nombre de stockeurs,
- Facteur 5 : emplacement des stockeurs,
- Facteur 6 : politique de gestion des stockeurs,
- Facteur 7 : nombre de OHBs,
- Facteur 8 : politique de gestion des OHBs,
- Facteur 9 : réseaux de rails,
- Facteur 10 : nombre de systèmes *In-Buffer*,
- Facteur 11 : nombre de systèmes *Out-Buffer*.

Par conséquent, tester toutes les combinaisons de ces facteurs, à plusieurs valeurs ou niveaux, peut être chronophage. En plus, l'analyse des interactions entre les facteurs et leurs effets sur les résultats est souvent très compliquée. Ainsi, dans cette étude, l'idée principale consiste à faire varier un ou deux facteurs au maximum à la fois, ce qui permet de réduire

significativement le nombre d'expérimentations et d'avoir une analyse plus approfondie des résultats. Cette méthode a été déjà utilisée dans le travail de [84] pour l'étude d'un problème très similaire et elle a montré une grande efficacité.

L'utilisation d'un *DOE* multifactoriel peut conduire à des résultats plus intéressants comparé au cas d'un ou deux facteurs. Cependant, dans notre cas, des expérimentations préliminaires sont conduites afin de déterminer les interactions possibles entre les facteurs. Ainsi, dans ce qui suit, nous ne présentons que les résultats des simulations en cas d'interaction significative entre les facteurs.

#### 6.3.5.1 Paramétrage du modèle de simulation

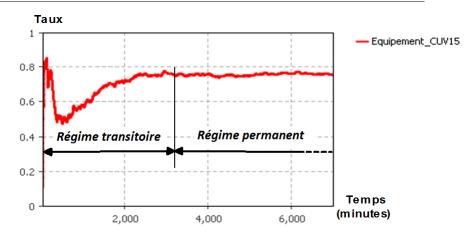
Cette section est dédiée à la description du paramétrage du modèle. Elle est divisée en deux parties : d'abord, on présente les paramètres nécessaires pour la configuration de l'AMHS dans le modèle, puis les paramètres liés à la simulation sont abordés.

La Table 6.3 résume les différents paramètres qui caractérisent l'AMHS. Les valeurs des paramètres de configuration de la flotte de véhicules et les temps de manutention sont dérivés principalement des données du fournisseur du système OHT.

| Elément d'AMHS        | Paramètre  | Valeur              |
|-----------------------|--|---------------------|
|                       | Nombre de véhicules (lots, réticules)            | (14, 8)             |
|                       | Vitesse maximale (mètre/seconde)                 | 3.33                |
| Véhicule              | Temps de ramassage ( <i>Pick-up</i> ) (secondes) | uniforme (4.5, 5.5) |
|                       | Temps de dépose (Unloading) (secondes)           | uniforme (4.5, 5.5) |
|                       | Temps de descente ( <i>Hoist</i> ) (secondes)    | uniforme (8, 9)     |
| In-Buffer             | Nombre   | 3                   |
|                       | Temps de manutention (secondes)                  | uniforme (8, 12)    |
| Out-Buffer            | Nombre   | 2                   |
|                       | Temps de manutention (secondes)                  | uniforme (8, 12)    |
| OHB                   | Nombre   | 1000                |
| Stockeur de réticules | Nombre   | 3                   |
|                       | Temps de manutention (secondes)                  | Entre 10 et 100     |
| Side-Loader           | Temps de manutention (secondes)                  | uniforme (18, 22)   |

Table 6.3 – Paramètres de base de l'AMHS pour la simulation.

L'horizon de simulation est fixé à 28 jours de production et la durée d'une expérimentation est d'environ 10 minutes. Cette durée est suffisante pour atteindre le régime stationnaire (ou permanant). La Figure 6.9 représente l'évolution de deux indicateurs : (a) le taux d'utilisation d'un équipement de production (CUV15) et, (b) le temps de transport moyen d'un lot, pendant la durée de la simulation. On observe, pour les deux graphiques, un régime transitoire caractérisé par une fluctuation des indicateurs. Puis, on entame une phase de plus en plus stable jusqu'à atteindre le régime permanent pour les deux indicateurs.



(a) Taux d'utilisation moyen de l'équipement de production « CUV15 ».

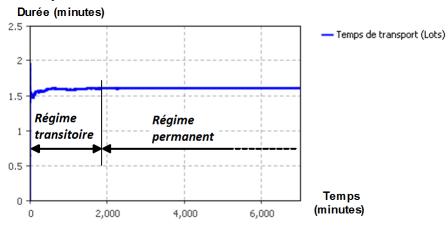


Figure 6.9 – Régime transitoire et régime permanent.

**(b)** *Temps de transport moyen d'un lot.* 

Pour chaque simulation, trois réplications indépendantes sont effectuées. Des simulations préliminaires ont permis de juger que ce nombre de réplications était suffisant pour absorber la variabilité issue du modèle. Ainsi, tout au long de l'étude, nous considérons la valeur moyenne des réplications pour les indicateurs et les *outputs* du modèle.

#### 6.3.5.2 Indicateurs de performance

Dans ce qui suit, on présente les indicateurs de performance sélectionnés et implémentés dans le modèle de simulation. Ces indicateurs permettent d'évaluer les différentes *designs* de l'AMHS testées à travers les expérimentations. Deux types d'indicateurs sont considérés : des indicateurs liés au processus de transport (lot ou réticule) et des indicateurs liés au processus de production dans l'atelier.

**6.3.5.2.1** Indicateurs liés au processus de transport : la Figure 6.10 présente un exemple d'une mission de livraison (lot ou réticule). Cette mission peut être décomposée en six étapes :

- 1. Temps assignation ou d'affectation : c'est le temps nécessaire pour trouver un véhicule libre afin d'exécuter une requête de livraison.
- 2. Temps de déplacement pour le ramassage : c'est le temps nécessaire pour que le véhicule affecté se déplace vers l'emplacement d'origine d'un lot ou un réticule (OHB, stockeur, *LoadPort...*).
- 3. Temps de ramassage (ou *Pick-up*) : c'est le temps nécessaire pour qu'un véhicule charge un lot ou un réticule.
- 4. Temps de déplacement pour la livraison : c'est le temps nécessaire pour qu'un véhicule transportant un lot ou un réticule se déplace vers l'emplacement de destination du lot ou réticule.
- 5. Temps de descente (*Hoist*): c'est le temps nécessaire pour que le mécanisme de levage du véhicule descende pour se mettre au niveau de l'emplacement de la destination (*In-Tool*, stockeur, OHB...).
- 6. Temps de dépose (*Unloading*) : c'est le temps nécessaire pour qu'un véhicule dépose un lot ou un réticule.

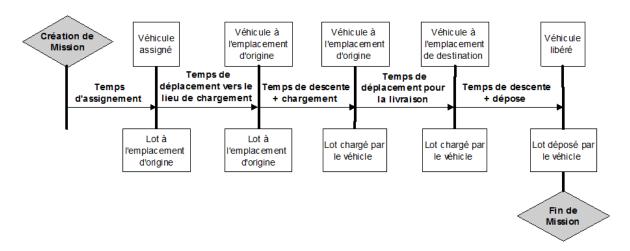


Figure 6.10 – Décomposition d'une mission de livraison d'un lot.

Les temps de ramassage, de descente et de dépose sont des paramètres fixes donnés par les caractéristiques et la technologie du système OHT (voir la Table 6.3). Ainsi, uniquement les temps d'affectation, de déplacement et de transport sont considérés comme des indicateurs clés dans cette étude. En plus, le taux d'utilisation moyen des véhicules a été aussi sélectionné comme indicateur afin de pouvoir évaluer la charge du travail de la flotte de véhicules.

Selon le produit à transporter, on distingue trois types de mission en fonction de l'emplacement d'origine et de la destination :

### Chapitre 6 : Méthodologie pour la conception d'un AMHS dans un atelier existant 122 et fonctionnel : Cas de la photolithographie

#### 1. Pour les réticules :

- D'un stockeur vers un équipement de production.
- D'un équipement de production vers un stockeur.
- D'un équipement de production vers un autre équipement de production

#### 2. Pour les lots :

- D'un système *In-Buffer* vers un OHB.
- D'un OHB vers un équipement de production.
- D'un équipement de production vers un système *Out-Buffer*.

**6.3.5.2.2 Indicateurs liés au processus de production :** les modules de production dans l'atelier de photolithographie sont extrêmement coûteux (de l'ordre de plusieurs M\$). Ainsi, les ingénieurs et les spécialistes de l'atelier considèrent que le taux d'utilisation moyen de chaque équipement de production doit être un indicateur clé de performance. Le débit total (ou *throughput*) de l'atelier a été aussi choisi comme indicateur afin d'évaluer l'efficacité globale du processus de production.

# 6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une méthodologie générique pour la conception d'un AMHS pour un atelier existant et fonctionnel. Les phases de la démarche ont été décrites. Ensuite, une description du problème de conception d'un AMHS dans l'atelier de photolithographie a été présentée. C'est un challenge puisque cet atelier n'a pas été conçu à l'origine pour avoir de la manutention automatisée (couloir restreint, pas d'accès direct à tous les équipements pas le haut...).

Dans la méthodologie proposée, une approche de simulation et d'expérimentation est proposée pour développer un *design* optimisé de l'AMHS (« Phase 3 ») et évaluer sa robustesse (« Phase 4 »). Ainsi, le choix de la méthode de modélisation du problème a été argumenté et la logique du modèle de simulation a été détaillée dans la dernière partie du chapitre. Dans la dernière phase de la démarche, la prise de décision sur le design final du système à installer dans l'atelier est réalisée.

Le projet d'intégration de l'AMHS dans l'atelier de photolithographie est défini en deux grandes phases pour des raisons internes à l'entreprise. Dans une première phase, uniquement les réticules sont concernés par la manutention automatisée. Ensuite, dans une deuxième phase, une extension est prévue pour la manutention des lots. Ainsi, dans ce travail de thèse, l'étude a été menée en deux étapes : la conception d'un AMHS pour les réticules (Chapitre 7), puis l'extension du même système automatisé pour transporter les lots (Chapitre 8).

# Chapitre 7

# Conception d'un AMHS : transport et stockage des réticules dans l'atelier de photolithographie

Dans ce chapitre, nous proposons une aide à la décision pour la conception (ou *design*) d'un *Automated Material Handling System (AMHS)* pour les réticules dans l'atelier photolithographie. Ainsi, nous appliquons la méthodologie proposée dans le chapitre précédent (Chapitre 6).

## 7.1 Phase 1 : Collecte et vérification de données

Dans cette phase, les données nécessaires pour cette étude sont définies. Deux types de données sont collectés tels que décrits dans ce qui suit.

# 7.1.1 Données liées au flux de production

À partir de l'historique d'activité dans l'atelier de photolithographie, nous avons développé un module d'extraction et de pré-traitement de données relatives au planning de production (ou instance de *Work-In-progress (WIP)*). Les informations extraites de la base de données doivent permettre de rejouer le flux de production des lots et des réticules dans l'atelier. La Table 7.1 est un exemple de fichier contenant les informations relatives aux lots.

À la suite à des discussions avec les spécialistes et les ingénieurs de l'atelier, les informations dans la Table 7.1 ont été jugées suffisantes pour avoir une cartographie des flux de production. En effet, pour un lot donné (*LotID*), la date de début de traitement sur l'équipement qualifié (*EquipementID*), le réticule nécessaire pour le traitement (*RticuleID*) ainsi que la durée totale de traitement sont connus. Le temps de traitement est décomposé en trois parties selon l'étape du processus de photolithographie (voir Chapitre 2) :

- Durée de l'étape 1 : temps de traitement du lot sans l'obligation d'avoir le réticule.
- Durée de l'étape 2 : temps de traitement du lot qui nécessite le réticule.
- Durée de l'étape 3 : temps de traitement du lot qui ne nécessite plus le réticule.

Table 7.1 – Exemple d'instance de WIP

| Temps de début de | Equipement | Lot ID      | Réticule ID  | Durée de traite- |
|-------------------|------------|-------------|--------------|------------------|
| traitement        | ID         |             |              | ment             |
| 01/05/2016 11 :23 | CUV14      | X61433Y     | FS04A38A0088 | 14,89159         |
| 01/05/2016 14 :21 | CUV13      | X61008Y     | F113B8156536 | 18,37499         |
| 01/05/2016 14 :29 | CUV11      | X60676Y     | M100886313AE | 14,79173         |
| 01/05/2016 22 :29 | CUV11      | X60957Y     | K2W4A90330F6 | 11,53749         |
| 02/05/2016 02 :02 | CUV13      | X61229Y     | P403A705A080 | 14,58335         |
| 02/05/2016 15 :26 | CUV11      | Z225975M78Y | OVASMNIKB002 | 18,59999         |
| 02/05/2016 18 :59 | CUV19      | X61172Y     | K314A01900BD | 15,30417         |
| 03/05/2016 02 :00 | CUV17      | Z225985M78Y | OVASMNIKB002 | 12,12915         |
| 03/05/2016 23 :01 | CUV19      | X61015Y     | K3C4A0235121 | 17,45832         |

Ensuite, il était nécessaire de vérifier la cohérence et l'intégrité des instances industrielles extraites. C'est pourquoi plusieurs réunions de vérification avec le partenaire industriel ont été organisées. Il faut noter que les données concernant le flux de stockage des lots et des réticules dans l'atelier ne sont pas collectées. Cela est dû à la complexité d'acquisition de ces informations en présence d'un système de manutention manuelle (les opérateurs).

## 7.1.2 Données liées à la structure physique de l'atelier

Les informations relatives à la structure physique de l'atelier (*layout*, hauteur du plafond...) ne sont pas stockées dans la base de données de l'entreprise. Cela s'explique par la nature de l'information recherchée dans cette section qui est totalement différente de celle décrite dans la section précédente. En effet, le plan de l'atelier, les dimensions de la structure (les couloirs, la superficie...) et l'emplacement des équipements de production sont des informations vitales pour mener à bien un tel projet de conception d'un AMHS dans un atelier existant et fonctionnel. Ainsi, les réunions avec l'équipe de l'infrastructure ont permis d'avoir le plan détaillé et les spécificités physiques de l'atelier.

# 7.2 Phase 2 : Conception initiale de l'AMHS

Cette phase consiste à proposer un *design* initial de l'AMHS qui satisfait les contraintes physiques et peut répondre à la demande de manutention (transport et stockage) dans l'atelier. Dans ce cas de STMicroelectronics à Rousset, un AMHS à base d'un système OHT (*Overhead Hoist Transport*) a été sélectionné pour le transport automatisé des réticules. De plus, une solution de stockage centralisé des réticules a été définie.

Dans ce qui suit, on se concentre sur la caractérisation des différents éléments du système OHT et du processus automatisé du stockage.

### 7.2.1 Conception initiale du système OHT

#### 7.2.1.1 Réseau de rails unidirectionnel

Un réseau unifié de rails est développé avec le support des ingénieurs de l'entreprise et le fournisseur du système OHT. Cette proposition initiale est basée principalement sur du bon sens et de l'expérience du fournisseur. Ainsi, il s'agit de satisfaire certaines conditions primordiales pendant la conception du réseau :

- Tous les équipements de production concernés doivent être couverts par le réseau.
- Le réseau doit être unifié : un véhicule peut parcourir le réseau de n'importe quel point vers n'importe quel autre point.
- Le réseau doit contenir des boucles et des raccourcis permettant de changer le sens de déplacement d'un véhicule.

Le réseau développé, présenté dans la Figure 7.1, possède globalement une configuration de type *spine* avec quelques segments de rails au niveau du périmètre (voir Chapitre 2). Cela est dû au fait que l'atelier n'a pas été conçu à l'origine pour avoir du transport automatisé. Ainsi, les baies (ou *bays*) ne sont pas parfaitement alignées.

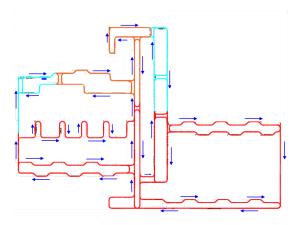


FIGURE 7.1 – Réseau initial de rails.

#### 7.2.1.2 Flotte de véhicules

L'optimisation de la taille de la flotte de véhicules est une étape très importante dans un projet de conception d'un AMHS. Le nombre de véhicules est un facteur qui possède une grande influence sur la performance du système de transport. En effet, d'une part, un nombre insuffisant de véhicules par rapport au besoin du transport peut entraîner des retards de livraison, et par suite, une perte de performance au niveau des équipements de production. D'autre part, un surdimensionnement de la flotte peut conduire à des problèmes de congestion et augmente les coûts d'achat.

Dans la littérature, il existe des approches de calcul analytique (non-simulation) pour estimer la taille de la flotte comme dans le travail de Maxwell et Muckstadt [70]. Sur la

## Chapitre 7 : Conception d'un AMHS : transport et stockage des réticules dans l'atelier de photolithographie

base d'une approche similaire, nous avons proposé la formule 7.1 pour estimer le nombre de véhicules pouvant satisfaire le besoin du manutention dans l'atelier :

$$NV_{min} = \frac{\sum_{ij} d_{ij} \ t_{ij}}{T} \tag{7.1}$$

Avec:

- T qui représente la période du temps.
- i, j avec  $(i \neq j)$  qui représentent les points d'origine (i) et destination (j) pour les véhicules.
- $d_{ij}$  qui correspond au nombre de requêtes de transport de i vers j, pendant la période T.
- $t_{ij}$  qui désigne le plus court temps de parcours entre le point i et j, calculé sur la base du réseau de rails.

Le calcul sur la base des instances représentatives du *WIP* confirme qu'au moins 3 véhicules sont nécessaires pour exécuter toutes les requêtes de livraison des réticules dans l'atelier photolithographie.

### 7.2.2 Conception initiale du stockage automatisé

Le stockage des réticules est une donnée incontournable pour deux principales raisons :

- 1. la capacité finie des équipements de production, et
- 2. les conditions spécifiques nécessaires pour la protection des réticules (sécurité, atmosphère).

L'intégration d'un système OHT dans l'atelier de photolithographie nécessite l'évolution des méthodes actuelles de stockage (des étagères de stockage réparties dans l'atelier, une manutention par les opérateurs) vers des méthodes automatisées. Dans ce contexte, cette section est consacrée à la conception d'une solution de stockage automatisé des réticules à base des stockeurs centralisés (voir Figure 7.2). Chaque stockeur peut contenir un grand nombre de réticules (plus de 1500 places) et possède deux ports de chargement/déchargement manuels et deux ports de chargement/déchargement automatiques (pour les véhicules).



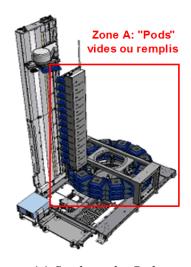
Figure 7.2 – Stockeur de réticules (source : Muratec).

Dans la section suivante, nous visons à définir et "quantifier" les solutions de stockage automatisé des réticules. Il s'agit, alors, de déterminer la capacité du stockage (nombre de stockeurs), de définir les meilleurs emplacements de stockeurs et de proposer une politique efficace pour la gestion de réticules à l'intérieur d'un stockeur.

#### 7.2.2.1 Manutention des réticules à l'intérieur d'un stockeur

Le stockeur proposé par le fournisseur sélectionné possède une grande capacité de stockage des réticules, mais avec un nombre très limité de places (autour de 60) pour stocker les containers unitaires, appelé *Pod*. La Figure 7.3 présente les deux zones ou espaces à l'intérieur d'un stockeur : (a) pour le stockage des *Pods* vides ou remplis (zone A), et (b) pour le stockage des réticules (sans *Pod*) (zone B). Le temps total d'accès (c'est le temps nécessaire pour sortir/entrer un réticule de/à l'intérieur d'un stockeur) varie en fonction de l'état du réticule (dans un *Pod* ou pas) et de la zone de stockage. Les temps d'accès théoriques sont les suivants :

- Autour de 10 secondes pour la zone A contenant les *Pods* vides ou rempli voir Figure 7.3a).
- Entre 60 et 100 secondes pour la zone B : le temps exact dépend de l'emplacement du réticule dans le carrousel rotatif (voir Figure 7.3b).



(a) Stockage des Pods.



**(b)** Stockage des réticules.

FIGURE 7.3 – Zones ou espaces de stockage de réticules à l'intérieur d'un stockeur (source : Muratec).

Le nombre limité de places consacrées aux *Pods* peut constituer un facteur limitant pour la manutention des réticules à l'intérieur d'un stockeur. En effet, la majorité de réticules sont stockés sur le carrousel rotatif, ce qui conduit à des temps d'accès élevés. De plus, le fait d'avoir deux ports de chargement/déchargement seulement automatiques pourrait aussi limiter le débit (ou *throughput*) d'un stockeur.

#### 7.2.2.2 Nombre de stockeurs

Étant donné le niveau d'activité dans l'atelier et le coût élevé d'un stockeur, on a initialement jugé que seulement deux stockeurs de réticules semblent suffisant pour absorber le rythme du processus de production dans l'atelier. En effet, la capacité fournie par les deux stockeurs permet de couvrir plus de 75% du nombre total des réticules. L'idée consiste à stocker les réticules les plus utilisés dans les stockeurs et de garder le reste (autour de 25% du nombre total) sur des étagères qui sont gérées manuellement par les opérateurs (chargement/déchargement manuel des réticules dans les stockeurs à travers les ports manuels).

#### 7.2.2.3 Emplacement des stockeurs

L'emplacement des stockeurs peut impacter la performance du processus de transport (le temps de livraison, le trafic des véhicules, utilisation des rails...). Au vu de la disposition actuelle des équipements de production dans l'atelier, cinq emplacements possibles ont été définis. Initialement, une configuration centralisée qui regroupe les deux stockeurs est privilégiée. La Figure 7.4 présente les emplacements choisis pour les deux stockeurs, ainsi que les trois autres emplacements possibles. En regroupant les deux stockeurs au niveau du couloir central, l'objectif est de réduire le temps de livraison et de faciliter les tâches de chargement/déchargement manuelles des réticules au niveau des stockeurs.

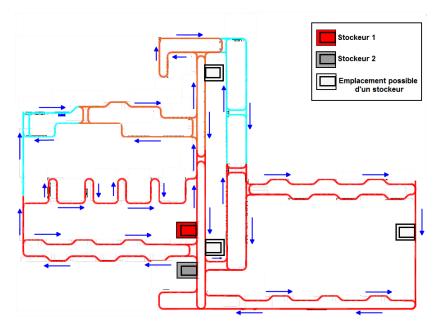


Figure 7.4 – Emplacement initial des stockeurs dans l'atelier.

#### 7.2.2.4 Politique de gestion des réticules à l'intérieur d'un stockeur

Selon la zone de stockage à l'intérieur d'un stockeur le temps d'accès total varie de 10 à 100 secondes. Dans cette phase de la démarche, une politique aléatoire de gestion des

réticules a été définie. Ainsi, un réticule est affecté aléatoirement à une zone, et aucune règle n'est considérée.

## 7.3 Phase 3 : Conception optimisé de l'AMHS

Dans la section précédente, un *design* initial de l'AMHS pour la manutention des réticules a été développé en se basant principalement sur du bon sens et en adoptant un niveau élevé d'abstraction. Cette section résume les résultats de l'application de la « Phase 3 » sur le cas de l'atelier de photolithographie. Nous visons alors **l'optimisation par expérimentation** des différents éléments de l'AMHS avec si nécessaire, des recommandations pratiques avant l'implémentation réelle du système. L'idée clé consiste à tester d'abord le *design* initial issu de la « Phase 2 », puis à proposer des modifications en se basant sur les résultats des simulations.

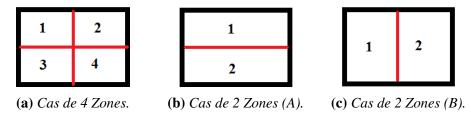
Il est important de souligner que dans le modèle de simulation, nous ne considérons que la manutention automatisée des réticules. En ce qui concerne les lots, en se basant sur l'historique de l'activité, ils sont transportés par les opérateurs. L'objectif est de se concentrer sur la problématique principale (manutention des réticules). De plus, on note que toutes les expérimentations menés ont été réalisées en considérant des instances représentatives du WIP.

### 7.3.1 Optimisation du système OHT

#### 7.3.1.1 Politique de gestion des véhicules

La politique de gestion de la flotte de véhicules dépend principalement de la configuration d'AMHS. Rappelons, d'abord, les deux configurations classique (voir Chapitre 2): transport *Inter-bay/Intra-bay* (Figure 2.6) et transport unifié (Figure 2.8). Dans notre cas, le choix est de mettre en place un réseau de rails unifié. Il reste alors à définir la façon dont les véhicules doivent réagir face à une mission de livraison: quels véhicules choisir? Dans notre cas, limité par la technologie du système OHT sélectionné par l'entreprise, nous avons comparé deux politiques de gestion des véhicules:

— Politique d'affectation: l'idée consiste à affecter des véhicules à chaque baie (bay) ou zone dans l'atelier de photolithographie. Par suite, seuls les véhicules affectés à une zone sont autorisés à transporter les réticules à partir de cette zone. Dans notre cas, l'atelier de photolithographie peut être devisé en 4 zones selon la technologie des équipements de production et leurs emplacements. Ainsi, trois cas possibles sont évalués tel que présenté dans la Figure 7.5.



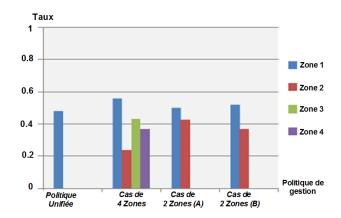
**FIGURE 7.5** – *Répartition de l'atelier de photolithographie en différentes zones.* 

Trois politiques d'affectation des véhicules sont définies : politique d'affectation à 4 zones (Figure 7.5a), politique d'affectation à 2 zones (A) (Figure 7.5b) et politique d'affectation à 2 zones (B) (Figure 7.5c)).

— Politique unifiée: le principe est d'autoriser les véhicules à se déplacer à travers l'ensemble du réseau de rails et à exécuter les missions de livraison de n'importe quel équipement ou stockeur vers n'importe quel autre équipement ou stockeur.

Dans ce qui suit, on évoque les résultats de simulation afin d'évaluer les avantages et les limites de chaque politique de gestion des véhicules. Pour avoir la même base de comparaison, on note que les expérimentations ont été menées en utilisant les mêmes paramètres de base, en particulier, avec le même nombre de véhicules.

Commençons par l'impact sur la flotte, le taux moyen d'utilisation des véhicules pour chaque politique de gestion est présenté dans la Figure 7.6. Les résultats montrent que, de façon globale, les véhicules sont utilisés moins de 60% du temps de simulation. De plus, on observe, un écart important entre les taux d'utilisation par zones dans le cas de la politique d'affectation, surtout dans le cas de 4 zones. Cela est dû au déséquilibrage de la charge de production entre les zones. Ainsi, le fait de repartir les requêtes de livraison entre les véhicules affectés à des zones conduit à un déséquilibrage dans l'utilisation de la flotte. Cependant, la politique unifiée semble avoir plus d'intérêt.



**FIGURE 7.6** – Taux d'utilisation moyen des véhicules pour différentes politiques de gestion de flotte de véhicules.

Le choix de la politique de gestion impacte aussi le temps nécessaire pour transporter un réticule. La Figure 7.7 résume les temps moyens de livraison pour chaque politique et pour les différents types de mission :

- (D1) : d'un stockeur vers un équipement.
- (D2): d'un équipement vers un stockeur.
- (D3) : d'un équipement vers un autre équipement.

Dans la même direction, on présente dans la Table 7.2 la valeur moyenne ainsi que l'écart type du temps d'affectation d'un véhicule à une mission de livraison. Les résultats confirment l'avantage de la politique unifiée en temps de livraison comparée à la politique d'affectation avec jusqu'à 21% de gain dans certain cas (cas de 4 zones). Cela s'explique par le faible temps d'affectation (moins d'une seconde) dans le cas de la politique unifiée. Cependant, l'affectation d'un véhicule à une requête de livraison peut prendre plus de 10 secondes dans le cas de la politique d'affectation à 4 zones.

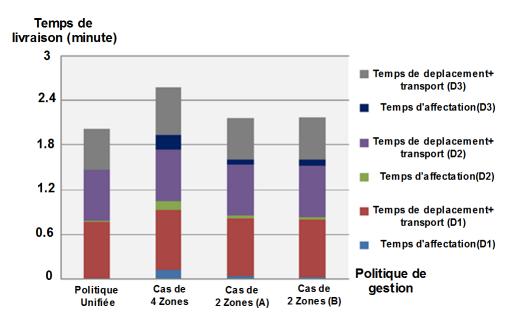


FIGURE 7.7 – Temps moyen de livraison pour différentes politiques de gestion des véhicules

Une autre observation importante est, qu'en plus de la politique unifiée, les politiques d'affectation à 2 zones (A) et (B) donnent aussi des résultats intéressants. En effet, elles présentent un gain autour de 16% en temps de livraison comparé au cas de la politique d'affectation à 4 zones. De plus, d'après la Figure 7.7, le temps moyen de transport et de déplacement est approximativement le même pour toutes les politiques de gestion des véhicules. Cela parce qu'en moyenne les véhicules parcourent les mêmes segments de rails dans l'atelier d'un point d'origine vers un point de destination.

D'après la Table 7.2, les résultats concernant l'écart type démontrent que la politique unifiée réduit significativement la variabilité du temps d'affectation d'un véhicule comparé

## Chapitre 7 : Conception d'un AMHS : transport et stockage des réticules dans l'atelier de photolithographie

à la politique d'affectation, surtout dans le cas de 4 zones. En effet, dans le cas de la politique unifiée, quand une requête de livraison est générée, le système doit choisir un véhicule de l'ensemble de véhicules libres de la flotte. Ainsi, il a forcément plus de chance de trouver un véhicule libre en moins de temps à affecter à cette requête comparée à la politique d'affectation où le système ne peut choisir qu'un véhicule libre de la flotte affectée à une zone.

**TABLE 7.2** – Valeur moyenne et écart-type du temps d'affectation pour différentes politiques de gestion de flotte de véhicules.

|                             |                    | Temps<br>d'affectation (D1) |        | Temps<br>d'affectation (D2) |        | Temps<br>d'affectation (D3) |        |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| Politique de gestion        |                    | Moy.                        | Ecart- | Moy.                        | Ecart- | Moy.                        | Ecart- |
|                             |                    |                             | type   |                             | type   |                             | type   |
| Politique unifiée           |                    | 0,003                       | 0,028  | 0,004                       | 0,037  | 0,001                       | 0,07   |
|                             | Cas de 4 zones     | 0,116                       | 0,365  | 0,123                       | 0,36   | 0,207                       | 0,497  |
| Polititque<br>d'affectation | Cas de 2 zones (A) | 0,029                       | 0,121  | 0,037                       | 0,143  | 0,063                       | 0,281  |
| d'anectation                | Cas de 2 zones (B) | 0,024                       | 0,153  | 0,03                        | 0,174  | 0,094                       | 0,262  |

On constate, d'après l'évaluation précédente, que la politique unifiée donne le meilleur temps de livraison. De plus, elle permet d'éviter le déséquilibrage dans l'utilisation de véhicules. Dans certains cas, le contrôleur de gestion des véhicules d'un système OHT ne permet pas la configuration de cette politique. Ainsi, une politique d'affectation des véhicules à 2 zones (A) et (B), qui a montré des résultats compétitifs, peut remplacer la politique unifiée.

Concernant l'effet sur la production dans l'atelier, pour toutes les politiques de gestion, les indicateurs de performance considérés (débit de l'atelier, taux moyen d'utilisation des équipements de production) n'ont pas été dégradés comparativement à la performance actuelle (avec les opérateurs).

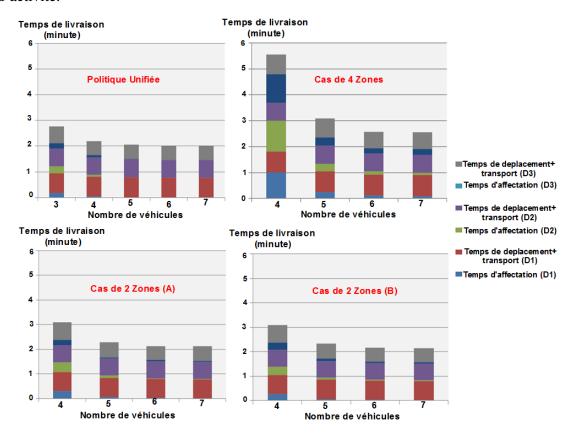
#### 7.3.1.2 Taille de la flotte de véhicules

Initialement, le calcul réalisé dans la « Phase 2 » a montré la nécessité d'avoir au moins 3 véhicules pour assurer le besoin de manutention des réticules dans l'atelier. Cependant, ce calcul était basé sur un niveau élevé d'abstraction. Dans cette phase (« Phase 3 »), nous nous intéressons à l'**optimisation, par simulation et expérimentation**, du nombre de véhicules (facteur A) et à son impact sur les politiques de gestion (facteur B) décrites dans la section précédente. Ainsi, un plan multifactoriel contenant toutes les combinaisons possibles des facteurs a été considéré dans les expérimentations.

La Figure 7.8 illustre le temps moyen de livraison pour différents nombres de véhicules dans le cas de chaque politique de gestion de flotte. De plus, la Table 7.3 fournit les détails concernant le temps d'affectation (valeur moyenne, écart type). Globalement, on note

que l'augmentation du nombre de véhicules réduit la variabilité du temps d'affectation pour toutes les politiques (voir Table 7.3). Ceci parce qu'avoir plus de véhicule dans une zone permet de stabiliser le temps de recherche d'un véhicule libre à affecter à une requête de livraison. Dans la même direction, d'après la Figure 7.8, la valeur moyenne du temps d'affectation est réduite en augmentant le nombre de véhicules.

De plus, on observe une réduction significative du temps moyen de livraison en passant de 3 à 4 véhicules pour la politique unifiée, et de 4 à 5 véhicules pour la politique d'affectation. Puis, la baisse est beaucoup moins importante. À partir de 6 ou 7 véhicules, la variation du temps de livraison est non significative. Ainsi, pour toutes les politiques de gestion, on confirme qu'une flotte de 6 à 7 véhicules peut assurer un processus de transport efficace et qui répond au besoin de transport dans l'atelier de photolithographie même en cas de pic d'activité.



**FIGURE 7.8** – Temps moyen de livraison en fonction du nombre de véhicules pour les différentes politiques de gestion de flotte de véhicules.

D'après les résultats des simulations (Figure 7.8 et Table 7.3), la comparaison des politiques de gestion montre clairement l'avantage de la politique unifiée et de la politique d'affectation à 2 zones (A) et (B) par rapport à la politique d'affectation à 4 zones. Cette dernière engendre un temps de livraison plus long en moyenne et moins stable (plus de variabilité). Malgré ces résultats, on note que cette politique ne conduit pas à une dégradation des performances de la production (débit, utilisation moyenne des équipements) de l'atelier, sauf pour un nombre

de véhicules inférieur à 4.

Table 7.3 – Valeur moyenne et écart-type du temps d'affectation pour différents nombres de véhicules.

|           |       | emps<br>ation (D1) | Temps<br>d'affectation (D2) |        | Temps<br>d'affectation (D3) |        |
|-----------|-------|--------------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| Nombre de | Moy.  | Ecart-             | Moy.                        | Ecart- | Moy.                        | Ecart- |
| véhicules |       | type               |                             | type   |                             | type   |
| 3         | 0,179 | 0,354              | 0,268                       | 0,419  | 0,218                       | 0,369  |
| 4         | 0,044 | 0,151              | 0,067                       | 0,19   | 0,081                       | 0,13   |
| 5         | 0,012 | 0,072              | 0,017                       | 0,088  | 0,018                       | 0,121  |
| 6         | 0,003 | 0,028              | 0,004                       | 0,037  | 0,002                       | 0,07   |
| 7         | 0,003 | 0,026              | 0,003                       | 0,036  | 0,004                       | 0,07   |

Dans ce qui suit, on ne s'intéresse qu'aux deux politiques de gestion des véhicules : politique unifiée et celle d'affectation à 2 zones (A) avec 7 véhicules.

#### 7.3.1.3 Amélioration du réseau de rails

À partir du *design* initial développé dans la « Phase 2 », nous proposons des modifications sur le réseau de rails afin de :

- Réduire le temps de parcours (déplacement et transport) des véhicules.
- Anticiper les problèmes de congestion sur les rails.
- Réduire les effets d'une panne d'un véhicule ou d'une maintenance sur un segment de rails sur le processus de production.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs modifications du réseau ont été implémentées dans le modèle de simulation :

- Ajouter ou déplacer des raccourcis (ou *shortcuts*) permettant le changement du sens de parcours des véhicules : 24 raccourcis ajoutées et 4 raccourcis déplacées.
- Ajouter des segments de rails au niveau de chaque stockeur permettant d'éviter la congestion due à des véhicules en phase de chargement/déchargement d'un réticule.
- Modifier, ajouter ou supprimer des boucles de rails permettant de réduire l'impact sur les équipements en cas de panne d'un véhicule ou/et d'un segment de rails.
- Ajouter des segments de rails permettant d'avoir au moins deux entrées et deux sorties pour chaque *bay* afin d'éviter les situations de blocages (des voies sans issus)

La Figure 7.9 présente le nouveau réseau de rails. Des expérimentations ont été menées et les résultats de la comparaison entre les réseaux initial et "optimisé" sont présentés dans les Figures 7.10 et 7.11.

Globalement, on observe un gain en temps moyen de livraison dans le cas du réseau "optimisé". En effet, les résultats dans la Figure 7.10 prouvent que, dans le cas de deux

politiques de gestion (unifiée et affectation à 2 zones (A)), l'optimisation du réseau de rails conduit à une réduction de l'ordre de 20% du temps de parcours (déplacement et transport) et de 50% du temps d'affectation qui reste négligeable. De plus, la Figure 7.11 indique une baisse de l'ordre de 10% du taux d'utilisation moyen des véhicules dans le cas du réseau "optimisé" comparé au réseau initial.

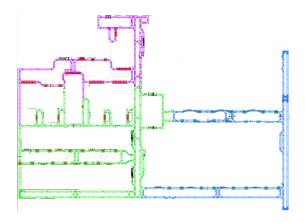
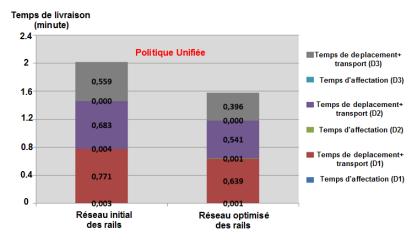
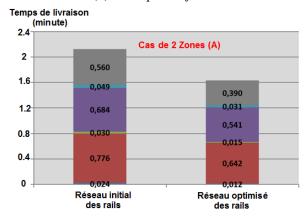


Figure 7.9 – Réseau des rails amélioré ou "optimisé".

Enfin, grâce à l'étude de simulation et d'expérimentation, nous avons pu améliorer la performance du processus de transport des réticules en modifiant le réseau de rails tout en gardant à peu près la même longueur total de rails ( $\approx 1\%$  de mètres de rails de plus dans le cas du réseau "optimisé").

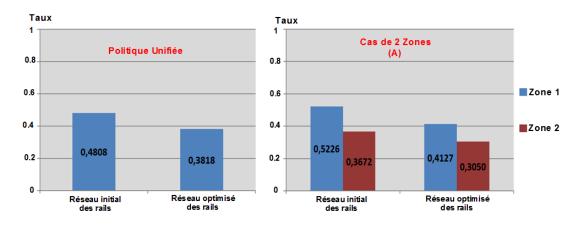


(a) Politique unifiée.



**(b)** *Politique d'affectation : cas de 2 zones (A).* 

Figure 7.10 – Temps moyen de livraison pour le réseau initial vs le réseau "optimisé" de rails.



**FIGURE 7.11** – Taux d'utilisation moyen des véhicules pour le réseau initial vs le réseau optimisé des rails.

L'optimisation de la gestion des véhicules est un facteur déterminant de la performance

d'un OHT. Le travail de simulation réalisé dans cette section a confirmé l'influence du choix de la politique de gestion des véhicules sur la performance du processus de transport dans l'atelier de photolithographie. Étant donné le contexte de l'étude (le *design* d'un AMHS), on s'est limité à l'étude de deux politiques globales de gestion de la flotte : politique unifiée et politique d'affectation. L'idée est de fournir une vision stratégique à long terme en utilisant une approche de simulation-expérimentation. Dans ce qui suit, nous étudions l'optimisation de planification des missions de transport dans une vision à court terme. En considérant l'une des politiques de gestion des véhicules, il s'agit à ce niveau de prendre des décisions opérationnelles en optimisant l'affectation des missions de livraison aux différents véhicules afin d'éviter toute dégradation de la performance de la production due à un retard de livraison.

# 7.3.2 Optimisation de l'affectation des véhicules sous contraintes de production

Dans cette section, on se concentre sur le processus d'affectation des véhicules aux missions de livraison générées. Pour un planning de production donné, la liste et l'ordre de passage des lots à traiter sur chaque équipement de production sont connus. De plus, la planification des réticules nécessaires pour le traitement des lots sur les équipements est aussi connue. Ainsi, le problème consiste à déterminer quand et quel véhicule transporte chaque réticule afin d'éviter les retards de livraison. Cette étude vise à proposer une planification optimisée de la flotte de véhicules en présence des contraintes (un planning fixe) de production.

La Figure 7.12 présente un exemple d'un planning donné de production et une proposition de planification de transport avec un et deux véhicules. Pour le cas d'un véhicule, le retard sur la livraison du réticule  $R_2$  a conduit à un retard dans la réalisation de la tâche  $T_{11}$  sur l'équipement  $Eqpt_1$ . Ce retard s'est propagé à la tâche  $T_{22}$  qui nécessite le même réticule  $R_2$ . Cela est dû au fait que le véhicule réalise plusieurs déplacements à vide entre les équipements de production pour récupérer les réticules. Cependant, dans le cas de 2 véhicules, la planification de la production est respectée (pas de retards). En effet, chaque véhicule transporte un réticule ( $V_1$  transporte  $R_1$ ,  $V_2$  transporte  $R_2$ ) ce qui permet de réduire les mouvements à vide et d'éviter les retards.

Chapitre 7 : Conception d'un AMHS : transport et stockage des réticules dans l'atelier de photolithographie

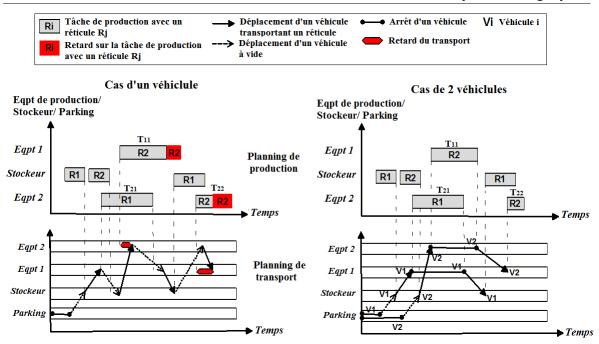


FIGURE 7.12 – Exemple d'un planning de production et de transport dans le cas d'un et 2 véhicules.

Dans ce qui suit, nous présentons une première formulation mathématique du problème ainsi que les premiers résultats numériques des expérimentations réalisées.

#### 7.3.2.1 Formulation mathématique

Dans cette section, une formulation mathématique du problème de transport des réticules sous des contraintes d'un planning de production est proposée. Les hypothèses considérées dans cette formulation sont les suivantes :

- Initialement, les réticules sont placés dans les stockeurs,
- Initialement, les véhicules sont placés au parking,
- Après avoir réalisé une mission de livraison d'un réticule (d'un point origine vers destination), le véhicule, s'il n'a pas d'autre mission à accomplir, se déplace vers une position de parking la plus proche,
- Les pannes des véhicules et des stockeurs ne sont pas pris en compte. Cela peut se justifier par la fiabilité de ces éléments [39],
- Le planning de production est une donnée du problème.

## **7.3.2.1.1 Notations :** les notations utilisées dans la formulation du modèle mathématique sont les suivantes :

#### 1. Paramètres:

—  $p_i$ : durée de la tâche i à réaliser sur un équipement de production,

- $d_i$ : date de fin souhaitée de la tâche de production i,
- $Z_{ij}$ : temps de déplacement d'un véhicule d'un point origine, pour récupérer ou déposer un réticule nécessaire à la réalisation de la tâche i, vers un point destination pour déposer ou récupérer un autre réticule nécessaire à la réalisation de la tâche j.

#### 2. Ensembles:

- $P = \{0, ..., m\}$ : ensemble des tâches réalisées sur les équipements de production,
- $S = \{(i, j); i, j \in P; i \leq j\}$ : ensemble des tâches successives sur un équipement de production,
- $D = \{(i, j); i, j \in P\}$ : ensemble des déplacements à réaliser pour les réticules : à récupérer d'un point origine en fin de traitement à la tâche i, vers un point destination pour réaliser la tâche j,
- $K = \{1, ..., n\}$ : ensemble de véhicules (avec une capacité égale à un réticule par véhicule).

#### 3. Variables de décision :

- $x_{ij}^k = 1$  s'il y a un véhicule k qui récupère un réticule utilisé pour réaliser la tâche i et le transporter pour réaliser la tâche j,  $(i, j) \in D$ , 0 sinon.
- $y_{ij}^k = 1$  s'il existe un véhicule k qui se déplace à vide après avoir déposé un réticule nécessaire à la réalisation de la tâche i, puis récupérer un autre réticule qui a été utilisé pour réaliser la tâche j, avec  $(i, j) \in D$ , 0 sinon.
- $t_i^k$ : date de début de la tâche de production  $i, i \in P$ , qui utilise un réticule transporté par un véhicule k.
- $T_i$ : retard dans la réalisation de la tâche de production  $i, i \in P$ ,

#### 7.3.2.2 Modèle mathématique

Pour modéliser le problème étudié, un modèle mathématique en programmation linéaire en nombre entiers est proposé :

$$Min \sum_{i \in P} T_i \tag{7.2}$$

Sous-contraintes:

$$T_i \ge 0, \forall i \in P \tag{7.3}$$

$$T_i \ge t_i^k + p_i - d_i - M(1 - \sum_{j \in P} x_{ij}^k), \forall (i, j) \in D, \forall k \in K$$
 (7.4)

$$t_j^k \ge t_i^l + p_i, \forall (i, j) \in S, \forall k, l \in K$$

$$(7.5)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^{k} = 1, \forall (i, j) \in D$$
 (7.6)

$$\sum_{i \in P} y_{oi}^k \le 1, \forall k \in K \tag{7.7}$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k + y_{ij}^k \le 1, \forall (i, j) \in D$$
 (7.8)

$$\sum_{i \in P} (x_{ij}^k + y_{ij}^k) = \sum_{i \in P} (x_{ji}^k + y_{ji}^k), \forall k \in K, \forall j \in P$$
 (7.9)

$$t_{i}^{k} \ge t_{i}^{k} + p_{i} + Z_{ij}x_{ij}^{k} - M(1 - x_{ij}^{k}), \forall (i, j) \in D, \forall k \in K$$
(7.10)

$$t_i^k + p_j \ge t_i^k + Z_{ij} y_{ij}^k - M(1 - y_{ij}^k), \forall (i, j) \in D, \forall k \in K$$
(7.11)

$$t_i^k \ge t_0^k + Z_{0i} y_{0i}^k - M(1 - y_{0i}^k), i \in P, \forall k \in K$$
(7.12)

$$t_j^k + M(1 - y_{ij}^k) \ge t_j^l + p_j - M(1 - \sum_{n \in P} x_{nl}^k, (i, j) \in D, (n, j) \in D, k \in K, l \in K$$
 (7.13)

$$x_{ij}^k, y_{ij}^k \in \{0, 1\} \tag{7.14}$$

$$t_i^k \ge 0 \tag{7.15}$$

La fonction objectif proposée (7.2) est la minimisation de la somme des retards dans le planning de production. D'une part, les contraintes (7.3), (7.4) et (7.5) assurent globalement le respect du planning de production. Les contraintes (7.3) indiquent que le retard d'une tâche de production est positif ou nul. Les contraintes (7.4) calculent le retard en fonction de la date de début, la durée et la date de fin souhaitée sur un équipement de production. Les contraintes (7.5) assurent la succession des tâches de production sur un équipement.

D'autre part, les contraintes de (7.6) à (7.13) garantissent globalement le service de transport des réticules par les véhicules. Les contraintes (7.6) assurent que chaque opération de transport d'un réticule est réalisée par un et un seul véhicule. Les contraintes (7.7) expriment le fait que tous les véhicules commencent à se déplacer à vide d'une position de parking. Les contraintes (7.8) font en sorte que les véhicules se déplacent en transportant un réticule ou à vide. Les contraintes (7.9) assurent que chaque véhicule arrivant (à vide ou transportant un réticule) à un équipement de production (ou un stockeur) part vers un autre équipement (ou un stockeur). Les contraintes (7.10) garantissent le temps nécessaire pour transporter un réticule par un véhicule. Les contraintes (7.11), (7.12) et (7.13) indiquent les conditions pour les déplacements à vide réalisés par les véhicules. Enfin, les contraintes (7.14) et (7.15) définissent les variables de décision.

#### 7.3.2.3 Instances générées

Des instances sont générées aléatoirement tout en gardant les caractéristiques principales des données industrielles et sans perte de généralité. La Table 7.4 résume les principales caractéristiques ces instances.

Les quatre instances présentées dans la Table 7.5 varient en termes de taille afin d'analyser la performance du modèle mathématique dans différentes configurations de planning de production. Le nombre d'équipements de production varie de 2 à 4. Un ou deux stockeurs de réticules sont considérés pour chaque instance. Les tâches de production varient entre 5 et 10 avec une durée qui suit une loi uniforme (10,13). Des déplacements de réticules sont

à réaliser par les véhicules selon un temps de déplacement qui suit une loi uniforme (1,4). Tous les détails concernant les instances sont présentés dans l'Annexe C.

|                             | Instances générées |                  |                  |                  |  |
|-----------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|--|
| Caractéristiques            | Instance 1         | Instance 2       | Instance 3       | Instance 4       |  |
| Nombre d'équipements de     | 2                  | 3                | 3                | 4                |  |
| production                  |                    |                  |                  |                  |  |
| Nombre de stockeurs         | 1                  | 2                | 1                | 1                |  |
| Nombre de tâches de pro-    | 5                  | 8                | 9                | 10               |  |
| duction                     |                    |                  |                  |                  |  |
| Nombre de réticules         | 2                  | 3                | 3                | 4                |  |
| Nombre de missions de       | 5                  | 8                | 9                | 10               |  |
| transport                   |                    |                  |                  |                  |  |
| Durée de la tâche de pro-   | Uniforme (10,13]   | Uniforme (10,13) | Uniforme (10,13) | Uniforme (10,13) |  |
| duction (unité de temps)    |                    |                  |                  |                  |  |
| Temps de déplacement        | Uniforme (1, 4)    | Uniforme (1, 4)  | Uniforme (1, 4)  | Uniforme (1, 4)  |  |
| entre les équipements de    |                    |                  |                  |                  |  |
| production et les stockeurs |                    |                  |                  |                  |  |
| (unité de temps)            |                    |                  |                  |                  |  |

**Table 7.4 –** Caractéristiques des instances générées.

De façon globale, la taille des instances générées reste faible comparé aux instances industrielles. Dans cette étude, on se limite à l'analyse du comportement général du modèle mathématique en considérant ces instances.

#### 7.3.2.4 Résultats numériques

Le modèle a été implémenté sur le solveur IBM ILOG-CPLEX (12.6). Des premiers tests numériques ont été réalisés afin d'étudier différents aspects liés au problème étudié. Les expérimentations ont été menées en utilisant un processeur *Intel Xeon CPU E5-2630 V3*, 2.40*GHz*, avec 80*GB* de *RAM*.

De façon générale, les résultats numériques confirment la validité du modèle. La Figure 7.13 présente la solution optimale obtenue dans le cas de l'instance 2 avec 3 véhicules. La solution optimale donnée par le modèle mathématique indique la succession des déplacements de chaque véhicule transportant un réticule ou à vide. Prenons le cas du véhicule n°2 initialement placé dans une position de parking P, il se déplace vers le stockeur S 1 pour récupérer le réticule R2, puis le transporte vers l'équipement de production Eqpt2 pour réaliser la tâche T21. Étant donné la date de fin souhaitée, un retard de 3 unités de temps dans la réalisation de T21 s'est produit à cause d'une livraison tardive du réticule R2. Ensuite, le même véhicule transporte le réticule R2 vers l'équipement Eqpt1 pour réaliser la tâche T12. De même, on constate un retard de 6 unités de temps dû au processus de transport. Enfin, le réticule R2 est transporté de nouveau à l'équipement Eqpt2 pour réaliser la tâche T23 par le véhicule avant

que ce dernier se déplace à vide vers la position de parking. Cependant, aucun retard n'a été constaté dans la réalisation de *T*23.

La solution présentée dans la Figure 7.13 fournie l'enchaînement détaillé des déplacements des autres véhicules n°1 et n°3.

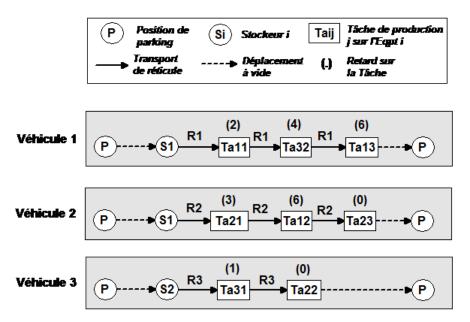


Figure 7.13 – Planning de transport optimal dans le cas de l'instance 2 avec 3 véhicules.

Dans ce qui suit, des analyses de sensibilité sont réalisées afin d'étudier deux principaux aspects : l'effet du nombre de véhicules et l'effet du mix des lots sur la planification optimale du transport proposée par le modèle mathématique.

**7.3.2.4.1** Effet du nombre de véhicules : rappelons que, dans la fabrication de semiconducteurs, les équipements de productions dans l'atelier de photolithographie sont les plus coûteux. Ainsi, on ne peut pas se permettre d'avoir une dégradation de l'utilisation d'un équipement par un manque de ressources de transport. Dans ce contexte, nous menons une analyse de sensibilité afin de déterminer l'impact du nombre de véhicules sur la structure de la solution optimale. Pour chaque instance, quatre expérimentations ont été menées en variant le nombre de véhicules de 2 à 5. Nous présentons dans la Table 7.5 les résultats des expérimentations en termes de somme des retards et de temps de calcul.

D'après la Table 7.5, globalement, on remarque que l'augmentation du nombre de véhicules réduit la somme des retards jusqu'à un certain niveau. Puis, l'ajout d'un véhicule supplémentaire n'a plus d'impact sur la solution optimale donnée par le modèle. Ce nombre "optimal" de véhicules est diffèrent d'une instance à une autre et il dépend des caractéristiques de cette instance (nombre de mission de transport, nombre de tâches...) : 2 véhicules pour l'instance 1, 3 véhicules pour l'instant 2, 3 véhicules pour l'instant 3 et 4 véhicules pour l'instance 4. De plus, il est important de souligner que le fait d'avoir le nombre "optimal" de véhicules ne permet pas forcement d'éviter les retards dus au processus de transport (cas des

instances 1, 2 et 4). Cependant, seulement dans le cas de l'instance 3, le retard est passé à 0 quand le nombre de véhicules est "optimal" (expérimentation n° 13).

| N° exp. | Instances   | Nbr. de véhi- | Somme des retards | Temps de calcul |
|---------|-------------|---------------|-------------------|-----------------|
|         |             | cules         | (unité de temps)  | (secondes)      |
| 1       |             | 5             | 5                 | 1,5             |
| 2       | Instance 1  | 4             | 5                 | 1,19            |
| 3       | instance i  | 3             | 5                 | 1,05            |
| 4       |             | 2             | 5                 | 0,75            |
| 6       |             | 5             | 22                | 5,07            |
| 7       | Instance 2  | 4             | 22                | 4,73            |
| 8       | mstance 2   | 3             | 22                | 2,87            |
| 9       |             | 2             | 41                | 9,35            |
| 11      |             | 5             | 0                 | 3,44            |
| 12      | Instance 3  | 4             | 0                 | 4,14            |
| 13      | ilistance 5 | 3             | 0                 | 1,73            |
| 14      |             | 2             | 16                | 5,74            |
| 16      |             | 5             | 28                | 604,11          |
| 17      | Instance 4  | 4             | 28                | 61,15           |
| 18      |             | 3             | 29                | 129,4           |
| 19      |             | 2             | 39                | 1782,96         |

**TABLE 7.5** – Résultats des expérimentations.

Ainsi, de façon générale, l'optimisation du planning de transport peut ne pas conduire à un processus de production avec 0 retard. En effet, quand le planning de production imposé ne tient pas suffisamment compte des contraintes du système de transport automatisé (nombre de véhicules, distance à parcourir...), il est presque impossible d'éviter les retards dans la réalisation de ce planning. Cela se traduit par une date de fin souhaitée ou de début de tâche très optimiste dans le planning de production.

**7.3.2.4.2** Effet du mix de lots de production : dans le cas de l'atelier de photolithographie, l'enchainement des séries des lots à traiter en utilisant le même réticule sur un équipement de production est lié au mix des produits et à la quantité du *WIP* dans une période donnée. Une quantité plus importante de *WIP* favorise la formation des séries des lots à traiter. Cela conduit à un meilleur planning de production en améliorant le temps de cycle et en réduisant les déplacements des réticules. La Figure 7.14 présente un exemple de deux cas de mix des lots : « Mix A » (cas de base) et « Mix B ».

L'exemple du planning de production présenté dans la Figure 7.14 montre l'impact du mix des lots sur la planification de la production, et par suite sur les missions de transport à réaliser. En effet, dans le cas du « Mix A », l'ordonnancement proposé conduit à 12 missions de transport et sans avoir la possibilité d'enchainer des lots avec le même réticule sur les 4 équipements de production. Dans le cas du « Mix B », le WIP dans l'atelier permet de former

## Chapitre 7 : Conception d'un AMHS : transport et stockage des réticules dans l'atelier de photolithographie

des séries de lots utilisant le même réticule sur un équipement de production. Cela conduit à seulement 8 déplacements de réticules à réaliser par les véhicules.

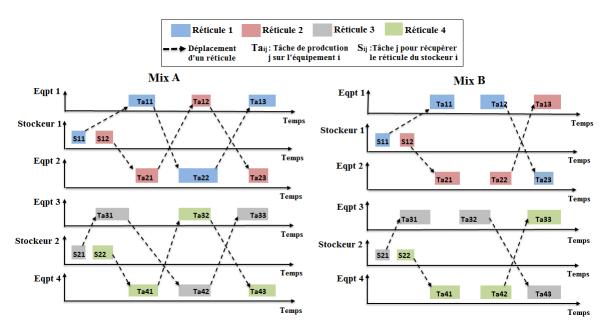


FIGURE 7.14 – Exemple de deux plannings de production pour deux cas de mix des lots.

Par la suite, nous menons une analyse de sensibilité afin d'évaluer l'impact du mix des lots sur le planning de transport fourni par le modèle d'optimisation. En plus du cas de base (« Mix A »), l'idée consiste à modifier les instances générées en favorisant la formation des séries de lots à traiter en utilisant le même réticule (« Mix B »). Les instances modifiées sont présentées dans l'Annexe C. Afin d'avoir une base de comparaison, pour une tâche de production ( $Ta_{ij}$ ) (avec i est l'équipement, et j est l'ordre de la tâche), nous avons conservé la même durée de traitement ( $p_j$ ) et la même date de fin souhaitée ( $d_j$ ) pour le « Mix A » et le « Mix B ».

La Table 7.6 présente les valeurs de la somme des retards pour les deux cas de mix en considérant le même nombre de véhicules pour chaque instance.

| Instances  | Nombre de véhicules | Mix de lots         | Somme des retards<br>(unité de temps) | Gain en retards<br>(Mix B/Mix A) |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Instance 1 | 2                   | Mix A (cas de base) | 5                                     | 5                                |
| mstance i  | 2                   | Mix B               | 0                                     | 3                                |
| Instance 2 | 3                   | Mix A (cas de base) | 22                                    | 10                               |
| mstance 2  |                     | Mix B               | 12                                    | 10                               |
| Instance 2 | 3                   | Mix A (cas de base) | 0                                     | 0                                |
| Instance 3 | 3                   | Mix B               | 0                                     | U                                |
| Instance 4 | 4                   | Mix A (cas de base) | 28                                    | 6                                |
|            |                     | Mix B               | 22                                    | 6                                |

**Table 7.6 –** Résultats de comparaison entre « Mix A » et « Mix B ».

Nous constatons que, pour toutes les instances testées, le « Mix B » peut réduire les retards comparé au « Mix A ». En particulier, pour le cas de l'instance 1, la somme des retards devient 0 en passant du « Mix A » vers le « Mix B ». De plus, les résultats pour l'instance 3 restent les mêmes indépendamment du mix des lots. Ainsi, de façon globale, l'amélioration du planning de production en favorisant la formation des séries de lots (cas du « Mix B ») réduit la charge de travail pour le système de transport automatisé. Par suite, une optimisation du planning de transport à un niveau opérationnel peut réduire voir même éviter les retards de la production et par conséquence la dégradation de la performance du processus de fabrication.

Dans ce qui suit, quelques expérimentations supplémentaires ont été menées afin d'étudier l'impact du mix des lots sur le nombre "optimal" de véhicules. La Table 7.7 résume les résultats des expérimentations.

| Instances  | Mix de production   | Nbr. "optimal" de véhicules |
|------------|---------------------|-----------------------------|
| Instance 1 | Mix A (cas de base) | 2                           |
| Instance 1 | Mix B               | 2                           |
| 7 / 2      | Mix A (cas de base) | 3                           |
| Instance 2 | Mix B               | 3                           |
| Instance 2 | Mix A (cas de base) | 3                           |
| Instance 3 | Mix B               | 2                           |
| Instance 4 | Mix A (cas de base) | 4                           |
|            | Mix B               | 4                           |

**Table 7.7 –** *Nombre "optimal" de véhicules.* 

On remarque que le changement du mix des lots n'a pas d'impact sur le nombre "optimal" de véhicules pour le cas de l'instance 1, 2 et 4. Cependant, on note une baisse du nombre "optimal" de véhicules dans le cas de l'instance 3 en passant du « Mix A » au « Mix

## Chapitre 7 : Conception d'un AMHS : transport et stockage des réticules dans l'atelier de photolithographie

B ». Cela peut être expliqué par la baisse du nombre de missions de transport dans le cas du « Mix B ». Ainsi, il est important de souligner qu'une amélioration de la planification des tâches de production en favorisant les séries de lots sur les équipements peut réduire la taille de la flotte nécessaire pour répondre aux besoins de transport.

À ce niveau, on peut confirmer que le *design* optimisé de l'AMHS pour transporter les réticules dans l'atelier de photolithographie ne peut pas dégrader la performance de la production. Cependant, le processus de stockage des réticules et ses impacts sur la production n'ont pas été encore suffisamment abordés.

### 7.3.3 Optimisation du processus de stockage automatisé

On se focalise dans ce qui suit sur l'"optimisation" du processus de stockage des réticules en partant du *design* initial développé dans la « Phase 2 ».

#### 7.3.3.1 "Optimisation" du nombre de stockeurs

Pour des raisons de simplification, dans un premier temps, nous avons défini dans le modèle de simulation un temps moyen d'accès à un stockeur (35 secondes) pour entrer ou sortir un réticule en se basant sur les données du fournisseur. Cette hypothèse ne peut pas fournir une évaluation judicieuse et approfondie de la performance du processus de stockage à concevoir. Néanmoins, elle nous a permis d'identifier déjà une problématique. En effet, en considérant le *design* initial, une analyse de sensibilité menée sur le temps moyen d'accès à un stockeur a montré que le processus de stockage peux devenir un goulot d'étranglement (ou *bottleneck*) pour le processus de production.

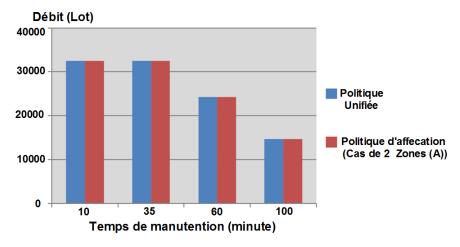


Figure 7.15 – Débit total de l'atelier en fonction du temps moyen d'accès à un stockeur pour une période de temps donnée.

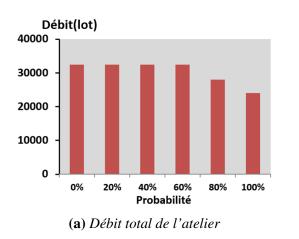
Telle que présenter sur la Figure 7.15, une dégradation du débit total de l'atelier est constatée quand le temps moyen d'accès passe de 35 à 60 secondes. D'autres expérimentations ont été

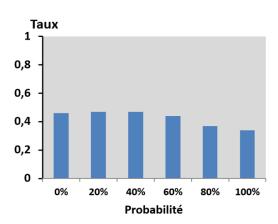
menées et les résultats montrent que la valeur limite du temps moyen d'accès est d'environ 42 secondes. Ainsi, il semble qu'une mauvaise gestion du processus de stockage peut entrainer une perte de performance des équipements de production, ce qui est contraire aux objectifs du projet d'automatisation de la manutention.

Dans l'objectif d'approfondir l'étude et de confirmer la constatation précédente, le temps moyen d'accès déterministe dans le modèle de simulation a été remplacé par une valeur probabiliste qui représente mieux le fonctionnement réel à l'intérieur d'un stockeur. L'idée consiste à définir une probabilité d'affectation d'un réticule à une zone de stockage (zone A ou zone B) (voir Figure 7.3). Cela est traduit par une décision à prendre au moment de l'entrée d'un réticule dans un stockeur :

- **Garder le réticule dans le** *Pod***:** ce qui ne prend que 10 secondes pour le stocker dans la zone A, s'il y a de la place. Ce choix réduit le nombre de *Pods* vides dans la zone A, ce qui par la suite peut augmenter le temps d'accès pour faire sortir un autre réticule du même stockeur.
- **Sortir le réticule de son** *Pod***:** ce qui prend entre 60 et 100 secondes. Mais, il permet d'avoir un *Pod* vide de plus, ce qui peut réduire le temps d'accès pour sortir un autre réticule du même stockeur.

La Figure 7.16 présente le débit total de l'atelier et le taux moyen d'utilisation des véhicules en fonction des différentes valeurs de probabilité de sortir un réticule du *Pod*.





**(b)** Taux d'utilisation moyen des véhicules.

FIGURE 7.16 – Débit de l'atelier et taux d'utilisation moyen des véhicules dans le cas de 2 stockeurs.

Effectivement, les résultats confirment que pour une probabilité supérieure à 60% (valeur limite), le processus de stockage ne peut plus répondre au besoin du système de production. Ainsi, une dégradation de la performance de la production est observée (voir la Figure 7.16a). En d'autres termes, si dans plus de 60% de cas, le réticule a été sorti du *Pod* et qu'il est stocké dans la zone B, le stockeur n'est plus capable de suivre le rythme des demandes du système OHT. Cela se traduit par la baisse du taux moyen d'utilisation des véhicules (voir Figure 7.16b).

## Chapitre 7 : Conception d'un AMHS : transport et stockage des réticules dans l'atelier de photolithographie

Face à ce problème de *bottleneck*, nous avons proposé d'ajouter un troisième stockeur de réticules afin de réduire la charge de travail au niveau de chaque entité de stockage. Ce scénario a été implémenté dans le modèle de simulation et les résultats dans le cas de trois stockeurs sont présentés dans la Figure 7.17.

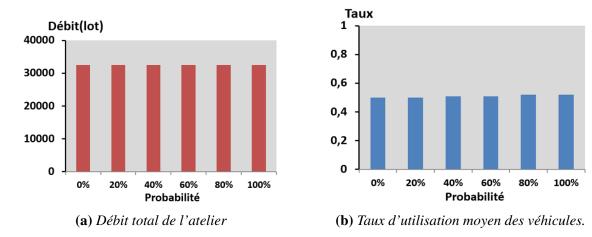


FIGURE 7.17 – Débit de l'atelier et taux d'utilisation moyen des véhicules dans le cas de 3 stockeurs.

Il est clair d'après la Figure 7.17 que le fait d'ajouter un troisième stockeur de réticules permet d'éviter la dégradation des indicateurs de production même si dans 100% des cas les réticules sont stockés dans la zone B.

#### 7.3.3.2 "Optimisation" des emplacements des stockeurs

Dans cette section, on se concentre sur le choix des meilleurs emplacements pour les stockeurs dans l'atelier de photolithographie. Tous les emplacements possibles (voir Figure 7.4) doivent être évalués sur la base des indicateurs liés au processus de transport. Cinq configurations possibles ont été définies pour localiser les trois stockeurs telles que présentées dans la Figure 7.18. On distingue trois différentes stratégies de localisation :

- Stratégie centralisée (Config. 1),
- Stratégie partiellement distribuée (Config. 2 et Config. 3),
- Stratégie distribuée (Config. 4 et Config. 5)

Pour toutes ces configurations, une répartition aléatoire des réticules entre les trois stockeurs est considérée. Les expérimentations ont été menées et la Figure 7.19 présente le temps moyen de livraison pour les différentes configurations. De plus, la Table 7.8 indique, pour chaque configuration, le taux maximum du trafic et le pourcentage du réseau de rails utilisé par les véhicules.

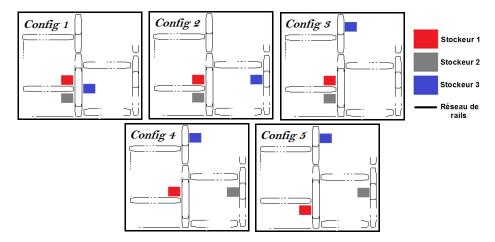


Figure 7.18 – Différentes configurations des emplacements possibles des stockeurs.

Globalement, on constate que les emplacements des stockeurs impacte le temps de livraison. En effet, la configuration centralisée (*Config. 1*) donne un gain en temps moyen de livraison par rapport aux autres configurations. Cependant, une telle configuration génère des problèmes de trafic sur le réseau, en particulier au niveau des boucles de rails centrales (voir la Table 7.8).

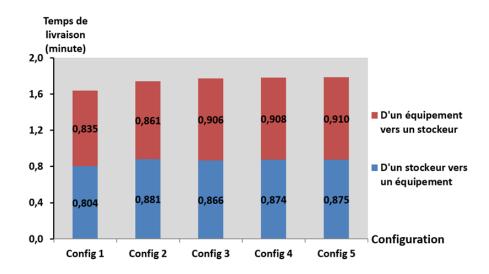


Figure 7.19 – Temps moyen de livraison pour les différentes configurations.

En considérant une stratégie partiellement distribuée (*Config. 2, Config. 3*), le taux de trafic est réduit, mais accompagné d'une augmentation du temps moyen de livraison (voir la Figure 7.19) par rapport à la configuration centralisée. Cela est dû au fait que les véhicules doivent parcourir une distance plus longue pour récupérer/déposer un réticule comparée à la configuration centralisée.

En ce qui concerne la stratégie distribuée (*Config. 4* et *Config. 5*), une meilleure répartition du trafic des véhicules sur le réseau est observée (voir Table 7.8). De plus, malgré la

faible dégradation du temps moyen de livraison, cette stratégie permet de mieux répartir le risque en cas d'indisponibilité d'un ou plusieurs segments de rails ou d'un véhicule immobilisé comparées aux autres stratégies.

**TABLE 7.8** – Résultats de simulation pour les différentes configurations d'emplacement des stockeurs.

| Configuration | % du réseau utilisé par des véhicules | Taux de trafic max (veh/min) |
|---------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Config. 1     | 78.23%                                | 1.842                        |
| Config. 2     | 80.91%                                | 1.135                        |
| Config. 3     | 80.00%                                | 1.197                        |
| Config. 4     | 82.73%                                | 0.892                        |
| Config. 5     | 81.82%                                | 0.934                        |

## 7.3.3.3 Optimisation de la politique d'affectation des réticules à l'intérieur d'un stockeur

L'impact du temps de manutention à l'intérieur d'un stockeur sur la performance du processus de stockage a été confirmé précédemment. En effet, une mauvaise gestion de cet aspect risque de dégrader la performance de la production dans l'atelier. Dans cette section, on aborde la façon dont les réticules devraient être affectés à chaque zone dans un stocker. L'idée consiste à proposer et à évaluer différentes politiques d'affectation d'un réticule à une zone. L'objectif est de maximiser le débit total (nombre d'entrée/sortie des réticules) par stockeur en tenant compte du nombre limité de ports de chargement / déchargement automatisés. Les politiques proposées sont les suivantes :

- Politique 1 : c'est la politique aléatoire proposée dans la conception initiale « Phase 2
   ».
- Politique 2 : c'est la politique aléatoire (« Politique 1 ») avec une synchronisation des missions du robot à l'intérieur d'un stockeur. Ainsi, les réticules sont aléatoirement affectés à chacune des zones. En plus, afin de dépasser les limites techniques dues au fonctionnement du robot interne du stocker, on a proposé avec les ingénieurs de l'entreprise un enchaînement spécifique de fonctionnement. L'objectif est de faire travailler le robot en temps masqué pour préparer ces missions (entrer, sortir et stocker un réticule, mise d'un réticule dans un Pod, sortir un réticule d'un Pod).
- **Politique 3 :** c'est une politique intelligente (ou *smart*). Les réticules sont affectés à chaque zone à l'intérieur d'un stockeur en fonction de leur utilisation future et des objectifs de performance fixés par l'entreprise. En effet, selon le mix des lots à traiter dans l'atelier, tous les réticules ne sont pas utilisés avec la même fréquence.
  - Pour pouvoir suivre le rythme de la production et améliorer le processus de transport, il faut réduire le temps de manutention et de transport pour tous les réticules, en particulier les plus utilisés. Ainsi, la politique consiste, globalement, à affecter les réticules les plus utilisés à la zone qui possède le temps d'accès le plus court.

— **Politique 4 :** c'est la « Politique 3 » combinée avec la possibilité de synchroniser des missions (« Politique 2 »). L'objectif est de fournir une répartition intelligente des réticules et, en même temps, de surmonter les limites techniques du stocker.

On note que les mêmes instances représentatives de *WIP* ont été utilisées afin de comparer les quatre politiques. Les expérimentations nécessaires ont été menées et les résultats en terme de débit par stockeur pour toutes les politiques sont présentés dans la Table 7.9.

| <b>Table 7.9</b> – Résultats des simulation | s pour les différente | es politiques | d'affectation. |
|---|-----------------------|---------------|----------------|
|---|-----------------------|---------------|----------------|

| Dolitiano   | Débit par stockeur (missions/heure) |                              |        |  |
|-------------|-------------------------------------|------------------------------|--------|--|
| Politique   | Moyenne                             | Ioyenne   Max   Gain moyen , |        |  |
| Politique 1 | 23.53                               | 27                           | -      |  |
| Politique 2 | 26.98                               | 31                           | 12.78% |  |
| Politique 3 | 31.4                                | 39                           | 25.06% |  |
| Politique 4 | 36.83                               | 46                           | 36.11% |  |

La principale conclusion est que la mise en place d'une politique de stockage basée sur l'utilisation des réticules (« Politique 3 ») améliore considérablement le débit d'un stockeur. On observe aussi que la synchronisation des missions permet d'avoir un gain en débit d'environ 12,78%. De plus, la combinaison d'une politique d'affectation intelligente avec la possibilité de synchroniser les missions (« Politique 4 ») conduit à un gain de plus de 36% comparé à la politique aléatoire.

La capture d'écran d'un graphe du modèle de simulation présenté dans la Figure 7.20 confirme les conclusions précédentes. En effet, d'après l'évolution instantanée du débit d'un stockeur, on observe une variabilité due principalement à la variabilité du processus de production (planning de production, cadence des équipements) et à la variabilité du mix des produits dans l'atelier. La Figure 7.20 confirme aussi que la « Politique 4 » fournit le meilleur débit, en moyenne, par stocker.

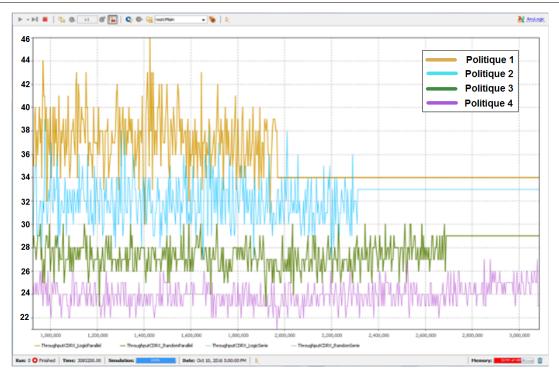


Figure 7.20 – Débit moyen d'un stockeur pour les différentes politiques de gestion.

## 7.4 Phase 4: Conception robuste de l'AMHS

Dans les sections précédentes, nous avons développé une conception initiale d'un AMHS pour le transport des réticules (« Phase 2 »), puis nous avons "optimisé" le *design* par le recours à la simulation et l'expérimentation. Ainsi, une caractérisation des éléments du système OHT et du processus de stockage des réticules a été proposée ayant comme objectif de ne pas dégrader la performance du processus de production comparée à la manutention manuelle (les opérateurs). Cet objectif découle du fait que le processus de production, dans les conditions actuelles (manutention manuelle, règles basiques de planification...), a atteint ces limites en termes de capacité de l'atelier. Cependant, une augmentation de la capacité de la production, avec l'intégration des nouveaux équipements ou l'optimisation du planning de production, est fortement possible.

Cette phase vise par conséquent à confirmer la robustesse du *design* de l'AMHS en adoptant un scénario spécifique. Dans notre cas, la capabilité de la conception "optimisée" à supporter une augmentation de la capacité de production dans l'atelier est considérée comme le meilleur scénario pour mesurer la robustesse du *design*. L'approche utilisée consiste à ajouter deux équipements de production fictifs (*EqptX*, *EqptY*) dans l'atelier. Puis, nous avons généré des données supplémentaires pour ces équipements de façon à éviter l'impact sur le taux d'utilisation des équipements réels. Le choix d'ajouter *EqptX* et *EqptY* a été validé par les ingénieurs et les spécialistes de l'atelier photolithographie. En effet, vue la configuration actuelle de l'atelier et les objectifs stratégiques de l'entreprise, cette approche semble

cohérente et suffisante.

Pour une instance représentative du *WIP*, la Table 7.10 résume les résultats des expérimentations menées dans le cadre d'une étude comparative de la performance du transport et de la production sans et avec les équipements virtuels additionnels.

|  |         | C         | Cas     |                    |  |  |
|--|---------|-----------|---------|--------------------|--|--|
| Indicateurs de performance                     |         | Basic     | Avec E  | vec EqptX et EqptY |  |  |
| _  | Unifiée | Cas de 2  | Unifiée | Cas de 2           |  |  |
|  |         | Zones (A) |         | Zones (A)          |  |  |
| Temps moyen de livraison (minute)              | 0.735   | 0.732     | 0.811   | 0.803              |  |  |
| Temps moyen d'affectation (min)                | 0.002   | 0.032     | 0.0059  | 0.038              |  |  |
| Taux moyen d'utilisation Bay 1                 | 38.68   | 44.05     | 42.41   | 46.64              |  |  |
| de véhicules (%) Bay 2                         | -       | 25.8      | -       | 31.52              |  |  |
| Taux moyen d'utilisation des                   | 89.91   | 89.95     | 94.43   | 95.6               |  |  |
| équipements (%) Débit total de l'atelier (lot) |         | 5976      |         | 6653               |  |  |

**Table 7.10** – Résultats des simulations sans et avec EqptX et EqptY.

Globalement, il est clair qu'une augmentation de la capacité de production impacte significativement les indicateurs de performance du processus de transport automatisé. En particulier, d'après la Table 7.10, pour les deux politiques de gestion (unifiée et affectation à 2 zone (A)), une augmentation autour de 10% en temps moyen de livraison est observée en ajoutant les équipements fictifs. En outre, le temps d'affectation a aussi augmenté. Cependant, cet impact reste acceptable car le temps moyen de livraison demeure, en moyenne, inférieur à une minute et le temps d'affectation reste inférieur à 3 secondes. Par ailleurs, on observe une augmentation entre 8% à 20% en taux d'utilisation moyen des véhicules. Malgré cette augmentation, la flotte de véhicules ne peut pas être considérée comme surchargée puisque le taux d'utilisation est autour de 40%. Pour finir avec la Table 7.10, les deux équipements fictifs ont permis d'avoir un gain de l'ordre de 5% en taux d'utilisation moyen des équipements qui s'est traduit par un gain de l'ordre de 10% en débit total de l'atelier pendant la période de temps considérée.

Enfin, une conclusion générale s'impose : malgré la faible dégradation des indicateurs de transport, on peut confirmer la capabilité du *design* "optimisé" de l'AMHS à supporter une augmentation raisonnable de la capacité de production dans l'atelier de photolithographie.

### 7.5 Phase 5 : Prise de décision

La phase de prise de décision doit découler principalement des résultats de la « Phase 3 » et la « Phase 4 ». Dans notre cas, l'étude de simulation et d'expérimentation a permis d'orienter le choix des responsables de l'unité de fabrication de STMicroelectronics à Rousset. Il est

important de noter qu'il n'y a pas qu'un seul meilleur *design*. Cependant, on a pu fournir un ensemble de *designs* efficaces pouvont satisfaire les contraintes de production et les objectifs de transport (fixés par l'entreprise). La Figure 7.21 résume la démarche proposée pour évaluer la pertinence de chaque *design* et satisfaire le compromis entre la non dégradation de la production et les objectifs en termes de transport .

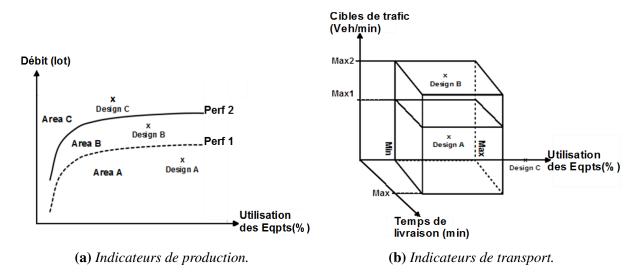


Figure 7.21 – Sélection des designs efficaces en fonction des indicateurs de production et de transport.

Ainsi, pour considérer qu'une conception de l'AMHS est pertinente, elle devrait satisfaire une contrainte forte : la performance du processus de production. Les indicateurs sélectionnés sont le débit total de l'atelier et le taux d'utilisation des équipements de production. Dans la Figure 7.21, un *design*, situé dans la zone (ou *area*) A, qui peut dégrader les performances du processus de production (*Perf 1*) ne peut pas être accepté (voir par exemple « design A »). Cependant, les « design B », « design C » et tout autres *designs* situés dans l'*area* B ou l'*area* C sont considérés comme efficaces étant donné qu'il n'y a pas de dégradation des performances de production. Dans le cas d'une augmentation de capacité dans l'atelier, les performances de production peuvent évoluer de (*Perf 1*) à (*Perf 2*). Ainsi, un *design* situé dans l'*area* B, qui était considéré précédemment comme pertinent, peut être rejeté dans ces nouvelles conditions de production.

De plus, les responsables de l'entreprise doivent définir les objectifs (ou *target*) du processus de transport : temps de livraison maximum, trafic maximal sur les rails et taux d'utilisation des véhicules (maximum, minimum). Ensuite, selon ces valeurs, nous pouvons juger de l'efficacité des *designs* qui ont déjà satisfait les contraintes de production. La Figure 7.21 indique que le « design A » peut être considéré comme pertinent. Par contre, le « design C » ne peut pas être adopté car il fournit un taux d'utilisation des véhicules supérieur à la cible (taux d'utilisation maximum). Notons que les performances du processus de transport ne sont pas des contraintes fortes puisqu'elles dépendent des objectifs stratégiques de l'entreprise. A titre d'exemple, le « design B » dans la Figure 7.21 peut devenir pertinent si le trafic maximal fixé par l'entreprise passe de (*Max1*) à (*Max2*).

7.6 Conclusion 155

Dans cette étude, en utilisant des résultats des simulations, chaque alternative de conception peut être localisée sur la Figure 7.21 afin d'évaluer sa pertinence. Le choix du *design* final dépend des décideurs et des objectifs stratégiques de l'entreprise. Dans le cas de STMicroelectronics à Rousset, les modifications proposées pour le réseau de rails ont été intégrées dans le réseau initial. Concernant les véhicules, le nombre nécessaire dans l'atelier dépend des objectifs stratégiques de performance visés par l'entreprise. Pour expliquer, les responsables de l'entreprise doivent fixer des objectifs (tels que le temps de livraison, le temps d'affectation...) pour définir la taille de la flotte et la meilleur politique de gestion à considérer. Dans le même contexte, les véhicules devraient être efficacement utilisés, tout en tenant compte des problèmes de déséquilibre. Suite à une discussion avec les ingénieurs et les spécialistes de l'atelier de photolithographie, les deux politiques : unifiée et affectation à 2 zones ((A) ou (B)) avec 7 véhicules semblent les configurations les plus intéressantes et les plus cohérentes par rapport aux objectifs stratégiques de l'entreprise.

De plus, les résultats de l'étude de simulation et d'expérimentation pour la conception du processus de stockage de réticules est un facteur décisif pour les décideurs à l'entreprise. Le challenge est de bien choisir l'emplacement des stockeurs de réticules dans un atelier chargé. Le nombre de stockeurs à mettre en place est aussi un élément déterminant dans cette étude. En effet, l'analyse de scénarii nous a permis d'anticiper un problème de *bottleneck* dû au temps de manutention à l'intérieur d'un stockeur de réticules. Par rapport à la proposition initiale (« Phase 2 »), tous les éléments caractérisant le stockage automatisé ont changé. Les décisions ont été prise pour :

- Prévoir un troisième stockeur.
- Avoir une configuration distribuée pour les emplacements au lieu d'une configuration centralisée.
- Mettre en place une politique de gestion des réticules qui se base sur leur fréquence d'utilisation.

### 7.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté une application de la méthodologie proposée dans le chapitre précédant afin de concevoir un AMHS pour la manutention des réticules dans l'atelier de photolithographie. Pour ce faire, nous avons abordé la phase de collecte et vérification des données, une phase préliminaire pour la suite de la démarche. Ensuite, dans la « Phase 2 », un design initial a été développé avec le support des ingénieurs et spécialistes de l'atelier. La phase d'optimisation (« Phase 3 ») a permis d'affiner le design initial et d'anticiper les problématiques pouvant impacter la performance de l'atelier. De plus, un premier travail d'optimisation de la planification du transport des réticules sur un niveau opérationnel a été réalisé dans cette phase. L'objectif est de fournir une décision rapide sur l'affection des missions de transport à une flotte de véhicules dans un court horizon. Une première formulation mathématique du problème de transport des réticules sous des contraintes d'un planning de production a été proposée. Le modèle a été implémenté sur le solveur IBM ILOG-CPLEX

## Chapitre 7 : Conception d'un AMHS : transport et stockage des réticules dans l'atelier de photolithographie

(12.6) et des résultats numériques ont été présentés et analysés. Il est important de souligner que l'étude expérimentale a été menée sur des instances de taille réduite. Ainsi, dans les perspectives de cette étude, nous envisageons le développement des méthodes dédiées (heuristique ou metha-heuristique) pour traiter des instances industrielles.

La robustesse du *design* face à une augmentation de la capacité de production dans l'atelier a été évaluée (« Phase 4 »). Au moment de la prise de décision (« Phase 5 »), les résultats de l'étude de simulation et d'expérimentation ont influencé la décision finale. De plus, cette étude a permis d'avancer les négociations avec le fournisseur présélectionné du système OHT et d'avoir un œil critique vis-à-vis de ses propositions. À titre d'exemple, le nombre de véhicules initialement proposé par le fournisseur était 33% plus élevé que le nombre final déterminé par cette étude.

Le chapitre suivant vise à étendre l'étude à la manutention des lots. Cette extension s'avère très pertinente. En effet, le même système OHT est prévu pour transporter les lots aussi bien que les réticules, ce qui peut engendrer une interaction entre les flottes hétérogènes de véhicules.

## Chapitre 8

## Extension de l'AMHS : transport et stockage des lots dans l'atelier de photolithographie

Dans le chapitre précédent, la méthodologie proposée pour la conception (ou *design*) d'un AMHS a été appliquée pour la manutention des réticules dans l'atelier de photolithographie de la *wafer fab* 200mm de STMicroelectronics Rousset. La prochaine étape du projet de modernisation de l'unité de fabrication consiste à étendre cet AMHS, utilisé pour la manutention des réticules, à la manutention des lots.

Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de proposer un *design* efficace de l'AMHS pour la manutention automatisée des lots dans l'atelier de photolithographie.

### 8.1 Phase 1 : Collecte et vérification des données

Les données concernant la planification de la production dans l'atelier ont été déjà collectées dans la « Phase 1 » du chapitre précédent. En effet, le module d'extraction et de prétraitement des données développé est capable de fournir l'historique de traitement des lots sur les différents équipements de production dans l'atelier de photolithographie. Il en est de même de la vérification de la cohérence et de l'intégralité des informations extraites.

Cependant, les données liées aux contraintes physiques dans l'atelier nécessitent une mise à jour. En effet, les positions exactes des ports de chargement/déchargement (ou *LoadPort*) des lots sont identifiées à travers des visites sur le terrain. Il est important de noter que ces *LoadPorts* ne sont pas tous accessibles directement par le plafond de l'atelier. Cette contrainte est imposée par la technologie des équipements de production. La Figure 8.1 présente un schéma d'un équipement ou module de production qui n'est pas accessible directement par le plafond.

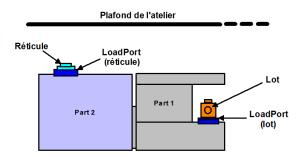


Figure 8.1 – Module de production dans l'atelier de photolithographie.

### 8.2 Phase 2 : Conception initiale de l'AMHS

Dans cette phase, nous procéderons à la conception initiale de l'AMHS pour la manutention des lots.

### 8.2.1 Conception initiale du système OHT

Dans cette section, on se focalise sur le développement d'un *design* initial du système OHT. Ce système est composé du réseau de rails initialement conçu et "optimisé" pour le transport des réticules, d'une flotte de véhicules chargée du transport des lots et des systèmes d'entrée (*In-Buffers*) et de sortie (*Out-Buffers*).

#### 8.2.1.1 Réseau de rails

On rappelle que le réseau de rails doit servir au transport des lots et des réticules. Ainsi, le réseau final issu du chapitre précédent est considéré dans cette phase. La Figure 8.2 présente le réseau du transport unifié.

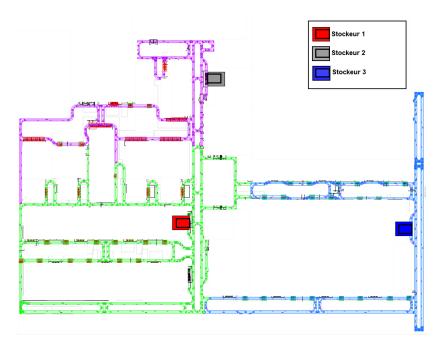


Figure 8.2 – Réseau initial de rails.

#### 8.2.1.2 Flotte de véhicules

Afin d'estimer le nombre de véhicules pouvant satisfaire les requêtes de livraison des lots, la formule suivante est utilisée :

$$NV_{min} = \frac{\sum_{ij} d_{ij} t_{ij}}{T} \tag{8.1}$$

Avec:

- T qui représente la période du temps,
- K qui correspond à l'ensemble de points origines et destinations (positions des machines),
- $i, j (i \neq j)$  qui représentent les points d'origine i et de destination j pour les véhicules,  $i, j \in K$ ,
- $d_{ij}$  désigne le nombre de requêtes de transport de i vers j, pendant la période T, i,  $j \in K$ ,
- $t_{ij}$  qui représente le plus court temps de parcours entre le point i et j, i,  $j \in K$ ,

Sur la base des instances représentatives du *WIP*, les résultats de calcul montrent qu'un nombre minimum de 10 véhicules est nécessaire pour le transport des lots dans l'atelier de photolithographie. Ce nombre n'est qu'une estimation et ne peut pas être considéré comme "optimal" vues les hypothèses simplificatrices (pas de congestion, pas de politique de gestion des véhicules) imposées par la formule 8.1.

#### 8.2.1.3 Systèmes d'entrées/sorties

La caractérisation des points d'entrée et de sortie des lots dans l'atelier est un facteur essentiel pour assurer une bonne performance de l'AMHS. En effet, le système d'entrée (*In-Buffer*) devrait gérer la réception des lots arrivant des autres ateliers et les rendre accessibles directement par le système OHT. Ainsi, une mauvaise gestion des *In-Buffers* peut conduire à une dégradation du temps de livraison des lots. En fin de traitement, un lot doit quitter la photolithographie vers les autres ateliers de production (métrologie, gravure, implantation...). C'est le *Out-Buffer* qui fait l'intermédiaire entre le système OHT et un opérateur chargé de transporter le lot vers un autre atelier. Ainsi, une gestion inefficace des *Out-Buffers* peut engendrer une dégradation de la performance du service de transport.

Dans cette section, nous nous intéressons à la détermination de deux critères pour les *In-Buffers* et *Out-Buffers* :

- Le nombre de *In-Buffer* et *Out-Buffer* nécessaires pour garantir la performance du processus de transport,
- L'emplacement des *In-Buffers* et *Out-Buffer* dans la configuration actuelle de l'atelier.

Un calcul simple, basé sur l'activité de production dans l'atelier (nombre de lots à entrer et à sortir) et sur le temps de manutention d'un lot par un *In-Buffer* ou *Out-Buffer*, est proposé pour déterminer le nombre nécessaire de points d'entrée et de sortie. La formule suivante est utilisée :

$$Nbr_{In/Out-Buffer} = \frac{\overline{Nbr_{Total.Lots}}}{\overline{T_{manu}}}$$
(8.2)

Avec:

- $Nbr_{In/Out-Buffer}$  qui représente le nombre de systèmes de In-Buffer ou Out-Buffer.
- $Nbr_{Total,Lots}$  qui représente le nombre de lots à entrer/à sortir de l'atelier (en lot/minute).
- $T_{manu}$  qui correspond au temps de manutention dans le In-Buffer/Out-Buffer (en lot/minute). Ce paramètre dépend du nombre de positions de stockage prévus dans la file d'attente (ou Buffer) du système.

Sur la base des instances représentatives du WIP, les résultats de calcul montrent qu'au moins 2 *In-Buffers* et 2 *Out-Buffer*, avec une capacité de 6 positions de stockage par système, sont à implémenter pour la manutention des lots à l'entrée et à la sortie de l'atelier de photolithographie. De plus, les échanges avec les ingénieurs et les spécialistes de l'atelier ont abouti à l'identification de 4 emplacements pour les *In-Buffers* et *Out-Buffers*. La Figure 8.3 présente le réseau de rails et les emplacements des points d'entrée/sortie.

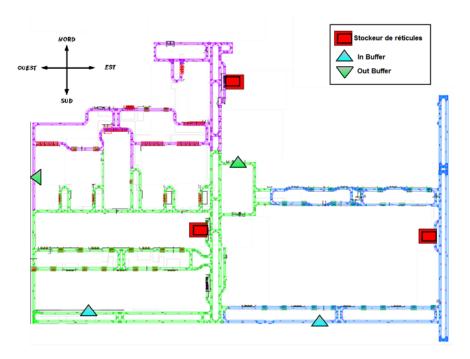


Figure 8.3 – Systèmes de In-Buffer et Out-Buffer.

On observe que, d'une part, les deux *In-Buffers* sont localisés sur le côté Sud de l'atelier. Ce choix s'explique par le fait que la majorité des lots arrivant à l'entrée de l'atelier de photolithographie viennent des autres ateliers localisés du côté Sud. D'autre part, les deux *Out-Buffers* sont positionnés dans l'atelier en tenant compte des prochaines destinations des lots. En effet, la majorité des lots ayant subi une opération de photolithographie est transportée vers l'atelier de métrologie pour effectuer une opération de mesure, d'où le choix de l'emplacement du premier *Out-Buffer*. Le reste des lots est envoyé vers les autres ateliers en passant par le couloir de convoyage du côté Ouest de la photolithographie. Cela explique le choix de l'emplacement du deuxième *Out-Buffer*.

#### 8.2.2 Conception initiale du stockage automatisé

Les unités de fabrication de semi-conducteurs modernes sont souvent équipées de stockeurs unitaires de lot (ou *Overhead Hoist Buffer (OHB)*). Généralement, cette solution de stockage est utilisée pour rapprocher les lots de leur destination finale (préacheminement). Les stockeurs centralisés sont aussi utilisés en plus des OHBs pour absorber la grande quantité de *WIP* dans l'unité de fabrication.

Les OHBs sont situés au niveau des rails au plafond ce qui en facilite l'accès par les véhicules. Plus le réseau de rail est grand, plus le nombre possible d'OHBs est élevé. Cependant, une contrainte de poids maximal au niveau du plafond est imposée, ce qui peut limiter le nombre d'OHBs par segment de rail. Dans notre cas, on se focalise sur le stockage des lots dans l'atelier de photolithographie. Ainsi, uniquement les OHBs sont prévus pour stocker tout le WIP. Il s'agit de préacheminer un lot de In-Buffer vers un OHB en attendant sa date

planifiée de traitement sur un équipement de production.

Dans cette phase, l'objectif est d'estimer le nombre et la politique de gestion des stockeurs unitaires.

#### 8.2.2.1 Nombre de stockeurs unitaires

Dans cette première réflexion concernant la conception du stockage des lots, le *WIP* total dans l'atelier doit être stocké dans les OHBs, au niveau des rails. Ainsi, le nombre d'OHBs nécessaires doit être supérieur ou égal à la quantité du *WIP* maximal (en pic d'activité). Ainsi, nous avons considéré autour de 1000 OHBs, ce qui doit couvrir largement le *WIP* en tenant compte des pics d'activité d'après l'historique de la production dans l'atelier.

#### 8.2.2.2 Politique de gestion des stockeurs unitaires

La manière dont les lots sont affectés aux OHBs est un facteur décisif dans la gestion d'un AMHS. Les règles d'affectation d'un lot à un OHB peuvent avoir un impact sur le délai de livraison et, par conséquent, sur le processus de production dans l'atelier. Dans cette phase, une politique d'affectation aléatoire est considérée. Il s'agit d'attribuer un lot aléatoirement à un OHB.

### 8.3 Phase 3 : Conception optimisée de l'AMHS

Dans la phase précédente, nous avons proposé une conception basique de l'AMHS pour le transport et le stockage des lots. L'objectif dans cette phase est d'évaluer d'abord le *design* initialement proposé en utilisant une approche de simulation et d'expérimentation. Cela permet d'identifier les avantages et les points faibles d'une conception et d'évaluer l'impact possible sur le processus de production dans l'atelier de photolithographie. Ensuite, un ensemble de *designs* est généré afin d'améliorer la performance du processus de transport et d'éviter de dégrader l'activité de production à cause de l'AMHS. Pour cela, les mêmes indicateurs de performance, déjà définis pour évaluer la manutention automatisée des réticules, sont considérés :

- Pour le processus de production, il s'agit du taux d'utilisation des équipements de production et du débit total de l'atelier.
- Pour le processus de transport, ce sont le temps de livraison, le taux d'utilisation des véhicules et le taux de trafic sur les rails.

La démarche de simulation et d'expérimentation présentée dans le chapitre 6 est utilisée dans cette phase de la méthodologie. Le modèle de simulation a été modifié afin d'intégrer les éléments de la manutention automatisée des lots. La Table 8.1 rappelle les différents paramètres de la simulation de base.

| Eléments de | Paramètres                                       | Valeurs             |
|-------------|--|---------------------|
| l'AMHS      |  |                     |
|             | Nombre de véhicules (lots, réticules)            | (14, 8)             |
|             | Vitesse maximale (mètre/seconde)                 | 3.33                |
| Véhicule    | Temps de ramassage ( <i>Pick-up</i> ) (secondes) | uniforme (4.5, 5.5) |
|             | Temps de dépôt ( <i>Unloading</i> ) (secondes)   | uniforme (4.5, 5.5) |
|             | Temps de descente ( <i>Hoist</i> ) (secondes)    | uniforme (8, 9)     |
| In Duffer   | Nombre   | 2                   |
| In-Buffer   | Temps de manutention (secondes)                  | uniforme (8, 12)    |
| Out-Buffer  | Nombre   | 2                   |
| Ош-Бијјег   | Temps de manutention (secondes)                  | uniforme (8, 12)    |
| "ОНВ"       | Nombre   | 1000                |
| ОПБ         | Politique d'affectation d'un lot à un OHB        | Aléatoire           |
| Ctookoun do | Nombre   | 3                   |
| Stockeur de | Temps de manutention (secondes)                  | Entre 10 to 100     |
| réticules   | Politique d'affectation d'un lot à l'intérieur   | Aléatoire           |
| Side-Loader | Temps de manutention (secondes)                  | uniforme (18, 22)   |

**Table 8.1 –** Paramètres de base des éléments de l'AMHS.

#### 8.3.1 Optimisation du système OHT

Dans cette section, on se concentre sur l'optimisation, par simulation et expérimentation, du *design* du système OHT : le réseau de rails, la flotte de véhicules et les systèmes *In-Buffer* et *Out-Buffer*.

#### 8.3.1.1 Politique de gestion des véhicules

Rappelons d'abord les trois types de requête de livraison d'un lot :

- (D1): d'un *In-Buffer* vers un OHB,
- (D2): d'un l'OHB vers un équipement de production,
- (D3): d'un équipement de production vers un *Out-Buffer*.

Chaque requête de livraison peut être divisée en trois étapes :

- Le temps d'affectation d'un véhicule (ou Assignment Time (AT)),
- Le temps de mouvement d'un véhicule pour récupérer le lot (ou *Movement Time (MT)*),
- Le temps de transport d'un lot par un véhicule (ou *Transport Time (TT)*).

Dans notre cas, le fournisseur présélectionné du système OHT propose une seule politique de gestion des véhicules, c'est la politique d'affectation (voir Chapitre 7). Cette politique consiste principalement à affecter un certain nombre de véhicules à chaque baie (ou zone) dans l'atelier.

# Chapitre 8 : Extension de l'AMHS : transport et stockage des lots dans l'atelier de photolithographie

La décomposition de l'atelier de photolithographie en différentes zones a été imposée par la technologie du système OHT sélectionné. En effet, ce système considère une décomposition de l'ensemble de rails en des zones plus au moins indépendantes en fonction des contraintes techniques. Ainsi, deux scénarios sont étudiés : le cas de 2 zones et le cas de 3 zones. La Figure 8.4 présente les deux décompositions possibles.

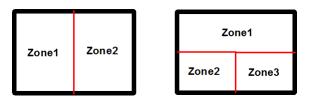


Figure 8.4 – Décomposition de l'atelier de photolithographie.

Pour les paramètres de base du système (Table 8.1), les principaux résultats de la simulation sont présentés dans la Table 8.2. On remarque que l'affectation des véhicules à 3 zones permet de réduire le temps de livraison une utilisation plus appropriée des véhicules comparé au cas de 2 zones. En effet, le fait de considérer 3 zones au lieu de 2 permet une répartition plus équitable de la charge de travail pour les véhicules, ce qui réduit le temps de recherche d'un véhicule libre dans une zone (temps d'affectation).

**TABLE 8.2** – Temps moyen de livraison (D1+D2+D3) et taux d'utilisation des véhicules pour le cas de 2 et 3 zones.

| Nombre de zones | Utilisation moy. des véhicules | Temps total de livraison (minute) |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 2               | 47.32%                         | 3.47                              |
| 3               | 44.74%                         | 3.12                              |

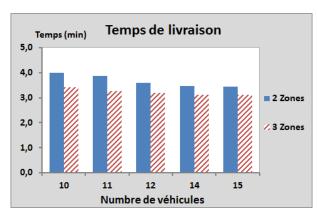
Les résultats de la simulation montrent aussi que, pour les deux politiques d'affectation (cas de 2 et 3 zones), aucun impact sur la performance du processus de production n'a été constaté. Cependant, ces conclusions ne sont valables que pour une taille donnée de flotte de véhicules (14 véhicules). Ainsi, dans ce qui suit, nous évaluons l'effet du nombre de véhicules sur les performances de l'AMHS et de la production.

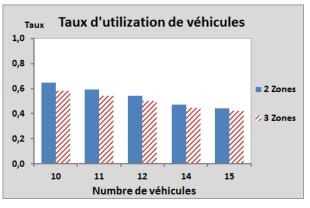
#### 8.3.1.2 Taille de la flotte de véhicules

Dans la phase de conception initiale, nous avons pu avoir une estimation du nombre de véhicules nécessaires pour livrer les lots dans l'atelier. Ce nombre (10 véhicules) est une borne inférieure pour l'étude d'optimisation. De plus, la formule mathématique (8.1) proposée dans la « Phase 2 » n'intègre pas les règles de gestion des véhicules. Ainsi, on se concentre dans la conception optimisée, sur la détermination de la taille optimale de la flotte tout en considérant les aspects de gestion des véhicules.

**8.3.1.2.1 Impact sur le temps de livraison :** des simulations ont été menées afin d'évaluer l'impact du nombre de véhicules sur la performance du processus de transport et de production dans le cas des deux politiques de gestion de flotte. Les résultats de simulation ont confirmé la validité du nombre de véhicules donné par le calcul. En effet, pour une flotte contenant moins de 10 véhicules, une dégradation du débit total de l'atelier et des taux d'utilisation des équipements de production a été constatée. Cette perte de productivité est due à une dégradation du processus de transport : augmentation du temps de livraison.

À partir de 10 véhicules, la Figure 8.5 montre le temps total de livraison (D1 + D2 + D3) (8.5a) et le taux d'utilisation des véhicules (8.5b) pour les deux politiques de gestion de flotte. On observe globalement que l'affectation des véhicules à 3 zones conduit à un gain significatif en temps de livraison comparé à celle de 2 zones. Ce gain est réduit en augmentant le nombre de véhicules. En effet, le fait d'avoir plus de véhicules dans le cas de 2 zones permet de dépasser le problème de charge de travail de la flotte et de réduire le temps de livraison. De plus, l'augmentation du nombre de véhicules peut améliorer le processus de transport en réduisant le temps de livraison (voir Figure 8.5a) et le taux d'utilisation des véhicules (voir Figure 8.5b). Cependant, cette dernière incidence est négligeable pour un nombre de véhicules supérieur à 14.





(a) Temps de livraison total.

**(b)** *Taux d'utilisation des véhicules.* 

**FIGURE 8.5** – Temps de livraison total et taux d'utilisation de la flotte en fonction de nombre de véhicules pour le cas de 2 et 3 zones.

Afin d'avoir une analyse plus approfondie, les temps de livraison pour chaque type de mission de transport dans le cas de 2 zones sont résumés dans la Figure 8.6. D'après la décomposition du temps de livraison en différents paramètres (AT, MT, TT), on remarque que le temps d'affectation représente le facteur clé pour l'amélioration du temps de livraison. En effet, malgré sa faible valeur par rapport aux autres paramètres (MT, TT), le temps d'affectation (AT) est un indicateur principal de la performance d'une flotte de véhicules car il reflète le temps d'attente d'un lot pour être transporté. Dans notre cas, la Figure 8.6 confirme que l'augmentation du nombre de véhicules réduit le temps d'affectation et qu'à partir de 14 véhicules ce paramètre devient négligeable.

Globalement, d'après la Figure 8.6, le temps de livraison moyen, dans notre cas, est approximativement le même pour les trois types de mission (cas de 2 zones).

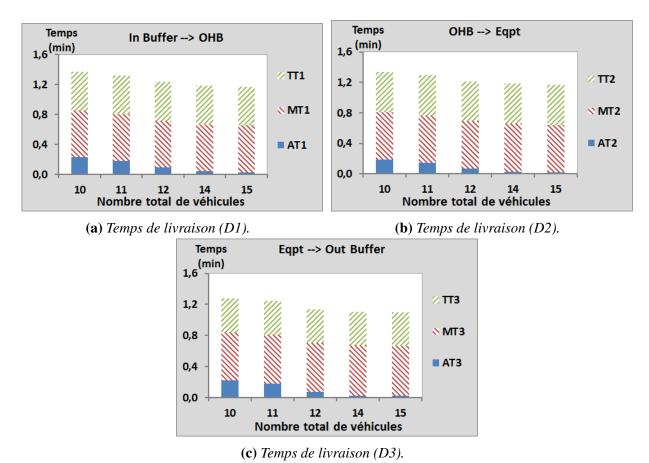


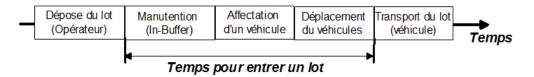
FIGURE 8.6 – Temps de livraison pour chaque type de missions en fonction du nombre de véhicules.

Pour finir avec le temps d'affectation, nous présentons la moyenne et l'écart type en fonction du nombre de véhicules dans la Table 8.3. Il est important de noter que l'augmentation de la taille de la flotte de véhicules réduit la variabilité du temps d'affectation et, par conséquence, permet d'avoir un processus de transport plus stable.

|                     | AT(1)(minute) |        | AT(2)(minute) |        | AT(3)(minute) |        |
|---------------------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| Nombre de véhicules | Moyen.        | Ectyp. | Moyen.        | Ectyp. | Moyen.        | Ectyp. |
| 10                  | 0.232         | 0.429  | 0.187         | 0.427  | 0.218         | 0.456  |
| 11                  | 0.183         | 0.409  | 0.147         | 0.397  | 0.104         | 0.439  |
| 12                  | 0.095         | 0.247  | 0.068         | 0.218  | 0.075         | 0.237  |
| 13                  | 0.051         | 0.186  | 0.36          | 0.142  | 0.034         | 0.233  |
| 14                  | 0.039         | 0.147  | 0.027         | 0.126  | 0.028         | 0.23   |
| 15                  | 0.038         | 0.126  | 0.026         | 0.109  | 0.028         | 0.2    |

**TABLE 8.3 –** Moyenne et écart type du temps d'affectation pour les différents types de mission.

**8.3.1.2.2** Impact sur les *In-Buffers* et *Out-Buffers*: pour analyser cet impact, nous avons défini un paramètre clé: le temps nécessaire pour entrer un lot dans l'atelier de photolithographie. Il s'agit de la différence entre l'instant de dépose du lot par un opérateur sur le *In-Buffer* et l'instant de ramassage (ou *Pickup*) du lot par un véhicule au niveau du système OHT. Tel que présenté dans la Figure 8.7, ce paramètre est composé du temps de manutention du lot par le *In-Buffer*, du temps d'attente pour l'affectation d'un véhicule libre (AT1) et du temps de déplacement du véhicule pour ramasser le lot (MT1). De même, on définit dans la Figure 8.8 le temps nécessaire pour sortir un lot de l'atelier à travers un *Out-Buffer*.



**FIGURE 8.7** – Décomposition du temps pour entrer un lot.

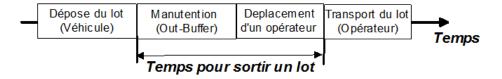


Figure 8.8 – Décomposition du temps pour sortir un lot.

La Table 8.4 présente les résultats des expérimentations. On remarque que l'augmentation du nombre de véhicules réduit le temps nécessaire pour entrer un lot (la moyenne et la variabilité). Cela est dû à la baisse du temps d'affectation (*AT*). Cependant, à partir de 14 véhicules, l'impact d'une augmentation de la taille de la flotte sur la performance des *In-Buffers* est moins significatif.

**TABLE 8.4** – Temps moyen pour entrer un lot.

|                     | _            | rer des lots (minute)<br>r 1; In-Buffer 2) |
|---------------------|--------------|--|
| Nombre de véhicules | Moyenne      | Ecart Type                                 |
| 10                  | (1.56; 2.1)  | (1.35; 1.55)                               |
| 11                  | (1.47; 2.03) | (1.3; 1.49)                                |
| 12                  | (1.38; 1.91) | (1.12; 1.35)                               |
| 13                  | (1.34; 1.89) | (1.09; 1.32)                               |
| 14                  | (1.3; 1.86)  | (1.03; 1.27)                               |
| 15                  | (1.29; 1.86) | (1.02; 1.26)                               |

Enfin, il est important de noter que les expérimentations menées ont confirmé que l'augmentation du nombre de véhicules n'a pas d'impact significatif sur les systèmes de *Out-Buffer*.

#### 8.3.1.3 Amélioration du réseau de rails

À partir du réseau initial (« Phase 2 »), plusieurs modifications sont proposées afin d'améliorer (ou "optimiser") le réseau et les performances du processus de transport. Les expérimentations nécessaires sont menées en considérant le réseau "optimisé". Cependant, d'après les résultats, les modifications proposées sur le réseau de rails ne conduisent pas à un gain significatif de la performance du processus de transport comparé au réseau initial.

#### 8.3.1.4 Systèmes d'entrée/sortie

Dans la phase de conception initiale, un calcul simple sur la base de l'activité de production a permis d'estimer le nombre de *In-Buffers* et *Out-Buffer* à implémenter dans l'atelier de photolithographie. Le faible degré de détails retenu dans la formule 8.2 nous oblige à mener une étude plus approfondie sur le dimensionnement du système d'entrées/sorties. Dans cette phase, l'idée est de considérer la configuration initiale (2 *In-Buffers*, 2 *Out-Buffers*) dans le modèle de simulation. Puis, nous analysons l'impact de la modification du nombre de *In-Buffer* et *Out-Buffer*, et de leur temps de manutention.

La Figure 8.9 présente les résultats des simulations. On constate, d'une part, que le fait d'ajouter un troisième *In-Buffer* n'a pas d'effet significatif sur le temps nécessaire pour entrer un lot. D'autre part, une augmentation du temps de manutention de 10 secondes en moyenne conduit à une augmentation d'environ 25 secondes en temps moyen pour entrer un lot.

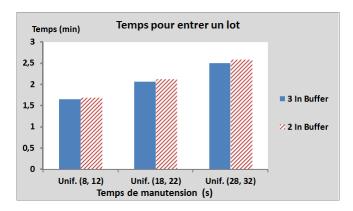


Figure 8.9 – Temps pour entrer un lot en fonction du temps de manutention.

De plus, l'impact du nombre de *In-Buffers* sur le temps d'affectation d'un véhicule est présenté sur la Figure 8.10. On remarque que le temps d'affectation est doublé en ajoutant un troisième *In-Buffers*. En effet, dans ce cas, les véhicules sont plus sollicités pour récupérer les lots au niveau des entrées de l'atelier comparé au cas de deux *In-Buffers*.

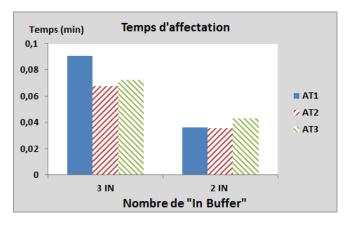


Figure 8.10 – Temps d'affectation pour différents types de mission avec 2 et 3 In-Buffers.

Le rôle d'un *Out-Buffer* consiste à récupérer les lots déposés par un véhicule et à les stocker temporairement dans une file d'attente (ou *buffer*). Puis, un opérateur récupère le lot du *buffer* et le transporte vers sa prochaine destination. Ainsi, la durée d'attente d'un lot dans le *buffer* avant l'arrivée de l'opérateur peut impacter le processus de sortie des lots. Ce temps reflète la fréquence de passage de l'opérateur (chaque Uniforme (55s, 65s), Uniforme (115s, 125s) ou Uniforme (235s, 245s)). Pour traiter ce sujet, la Figure 8.11 résume une analyse de sensibilité menée afin de d'évaluer l'effet de la fréquence de passage d'un opérateur sur le temps total nécessaire pour sortir un lot de l'atelier. On constate que, d'un côté, une augmentation de la fréquence de passage d'un opérateur permet de réduire le temps moyen pour sortir un lot. D'un autre côté, l'ajout d'un troisième *Out-Buffer* à la configuration initiale (2 *Out-Buffers*) ne permet pas d'avoir un gain significatif sur le temps nécessaire pour sortir un lot. De plus, aucun impact significatif sur le temps d'affectation d'un véhicule n'a été observé.

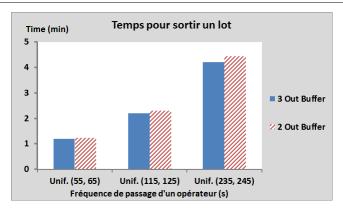


Figure 8.11 – Temps pour sortir un lot en fonction de la fréquence de passage de l'opérateur.

Enfin, il est important de noter que les résultats des expérimentations confirment qu'aucune dégradation du processus de production n'a été constatée. Cela signifie que, pour tous les cas testés, les systèmes d'entrée et de sortie ne pourraient pas être des goulots d'étranglement (ou *bottleneck*) pour le processus de transport et de production dans l'atelier de photolithographie.

#### 8.3.2 Optimisation du processus de stockage automatisé

Il s'agit de déterminer le nombre nécessaire d'OHBs et de proposer et d'évaluer des politiques d'affectation des lots aux espaces de stockage.

#### 8.3.2.1 Nombre de stockeurs unitaires OHBs

Initialement, dans le modèle de simulation, un ensemble de 1000 OHBs est considéré avec une politique d'affectation aléatoire d'un lot à un OHB. Cette configuration a été proposée dans la phase de conception initiale afin de stocker tous le *WIP*. Le processus de stockage des lots est décomposé en deux étapes : le stockage sur des étagères à l'entrée de l'atelier, puis le pré-acheminement des lots vers les OHBs.

Dans la Figure 8.12, on présente, pour une instance représentative du *WIP*, l'évolution du nombre d'OHBs occupés par des lots durant le temps de la simulation. On constate que le nombre prévu d'OHBs pourrait absorber la variabilité du *WIP* dans l'atelier durant la période de temps considérée. La Figure 8.12 indique aussi que autour de 760 OHBs sont occupés par des lots en pic d'activité. Cet ordre de grandeur a été confirmé pour trois instances représentatives du *WIP* en pics d'activité dans l'atelier.

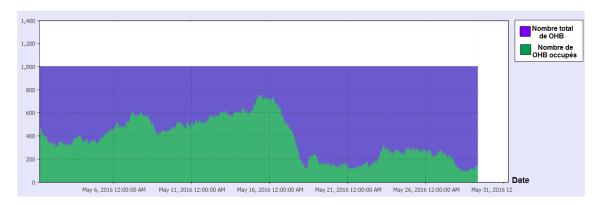


FIGURE 8.12 – Évolution du nombre d'OHBs occupés en fonction du temps : cas de 1000 OHBs.

Il s'agit maintenant de limiter le nombre d'OHBs à prévoir dans l'atelier afin de réduire le coût du projet. La Table 8.5 résume les résultats des simulations pour différents nombres d'OHBs considérés dans le modèle de simulation.

On observe, d'aprés la Table 8.5, une dégradation du débit total de l'atelier quand le nombre d'OHBs est inférieur à 450. Cela indique que le processus de stockage des lots pourrait devenir un *bottleneck* pour le processus de production. En effet, dans ces conditions (moins de 450 OHBs) le nombre de lots préacheminés vers les stockeurs unitaires au plafond n'est plus suffisant pour absorber la variabilité de la production dans l'atelier.

| Caga | Nambra d'OIIDa | 0/ do dábit total do Potolion |
|------|----------------|-------------------------------|
| Case | Nombre d'OHBs  | % de débit total de l'atelier |
| Base | 1000           | 100%                          |
| 1    | 700            | 100%                          |
| 2    | 600            | 100%                          |
| 3    | 500            | 100%                          |
| 4    | 450            | 100%                          |
| 5    | 400            | 82%                           |

70%

350

6

**TABLE 8.5** – Effet du nombre d'OHBs sur le débit total de l'atelier.

La Figure 8.13 montre le nombre moyen de lots stockés en attente sur les étagères pour être préacheminés ensuite vers les OHBs. Il est clair que le fait de limiter le nombre d'OHBs augmente de façon exponentielle le nombre de lots en attente à l'entrée de l'atelier. De plus, pour un nombre d'OHBs inférieur à 450, une capacité de plus de 1500 places est à prévoir sur les étagères. En effet, le *WIP* s'accumule compte tenu de la perte de productivité des équipements de production.

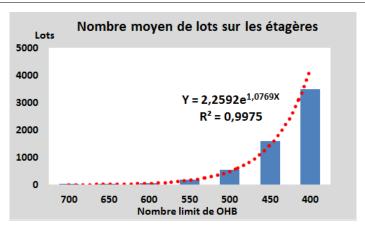


FIGURE 8.13 – Evolution du nombre moyen des lots sur les étagères en fonction du nombre d'OHBs.

#### 8.3.2.2 Politique de gestion des stockeurs unitaires OHBs

Dans cette section, deux politiques (ou heuristiques) d'affectation des lots aux OHBs sont proposées. Dans un premier temps, nous évaluons l'heuristique d'affectation aléatoire décrite dans la phase de conception initiale. Ensuite, une heuristique d'affectation intelligente (ou *Smart*) est proposée :

**8.3.2.2.1 Heuristique d'affectation aléatoire :** elle a été considérée précédemment dans la détermination du nombre d'OHBs. L'analyse des résultats a montré l'efficacité de cette politique simple quand un nombre suffisant d'OHBs est prévu. Cependant, un risque de dégradation de la performance du processus de production a été observé pour un nombre d'OHBs inférieur à 450.

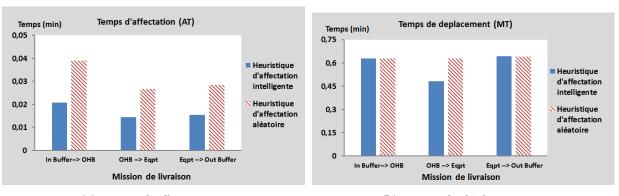
**8.3.2.2.2 Heuristique d'affectation intelligente :** nous proposons une façon plus intelligente pour affecter chaque lot à un OHB. L'idée consiste à associer initialement un groupe d'OHBs à un groupe d'équipements de production. Puis, la règle est d'affecter les lots planifiés sur un groupe d'équipements au groupe correspondant d'OHBs. Soit, par exemple, un groupe d'équipements (E1) contenant les équipements (EqptX), (EqptY) et (EqptZ), et son groupe d'OHBs associé ( $E1_{OHB}$ ). Quand il s'agit d'un lot planifié sur l'équipement (EqptY), il est automatiquement affecté à un OHB disponible du groupe ( $E1_{OHB}$ ). Sinon, le lot est affecté à groupe alternatif d'OHBs ( $E1_{OHB-Alter}$ ) dans le cas où tous les OHBs du groupe ( $E1_{OHB}$ ) sont occupés.

Les règles d'affectation des groupes d'OHBs aux groupes d'équipements sont basées principalement sur trois critères :

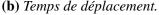
- la distance entre un groupe d'équipements et un groupe d'OHBs,
- le mix de produits dans l'atelier,
- le débit de chaque équipement de production.

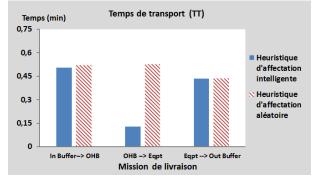
Généralement, un groupe d'OHBs est localisé le plus proche possible du groupe d'équipements associés. Le nombre d'OHBs par groupe est calculé en fonction du débit total des équipements de production du groupe associé. Ce problème peut être considérée comme un problème d'optimisation. Cependant, dans notre cas, nous avons affecté un groupe d'OHBs à chaque équipement de production en se basant sur des règles logiques. Le nombre d'OHBs par groupe varie entre 10 et 12 en fonction du débit et de la technologie de l'équipement de production. Deux groupes alternatifs d'OHBs sont définis par équipement.

Dans la Figure 8.14, nous comparons les temps d'affectation, de déplacement et de transport pour les différents types de mission de livraison dans le cas des deux l'heuristiques d'affectations. Notons qu'un nombre total de 500 OHBs est considéré dans le modèle.



(a) Temps d'affectation.





(c) Temps de transport.

**FIGURE 8.14** – Paramètres du temps de livraison en fonction des différents types de mission pour les deux heuristiques d'affectation.

Globalement, on observe un gain d'environ 50% en temps d'affectation fourni par l'heuristique d'affectation intelligente pour les différents types de mission de livraison. Les résultats montrent aussi que cette heuristique permet de réduire le temps de déplacement et de transport pour les missions de livraison des lots à partir des OHBs vers les équipements de production. En effet, les véhicules passent moins de temps pour transporter un lot d'un OHB vers un équipement de production dans le cas de l'heuristique d'affectation intelligente comparé à celle d'affectation aléatoire. Cela est dû aux emplacements des groups d'OHBs

qui sont assez proches des équipements de production associés.

**8.3.2.2.3** Heuristique d'affectation intelligente et planification du WIP: l'heuristique d'affectation intelligente proposée précédemment permet d'améliorer le processus de transport pour un nombre suffisamment élevé d'OHBs. L'idéal est d'avoir un espace de stockage contenant plus de 450 OHBs avec une affectation intelligente des lots en fonction du planning de production. Cependant, dans notre cas, vues les contraintes budgétaires, la décision est prise pour l'implémentation de 321 OHBs seulement dans l'atelier de photolithographie. L'analyse des résultats de simulation a précédemment confirmé que cette décision peut dégrader la performance de production dans l'atelier. Face à ce risque, nous avons défini, avec les ingénieurs de l'entreprise, un processus spécifique de stockage afin de planifier dans un premier temps les lots à l'entrée de l'atelier, puis une deuxième fois quand ils sont stockés dans les OHBs en fonction de leur priorité. La Figure 8.15 indique les détails de ce processus.

Initialement, tout le *WIP* est stocké sur des étagères à l'entrée de l'atelier. Ensuite, une première itération avec le planificateur (ou *Scheduler*) permet de sélectionner les lots prioritaires à faire entrer dans l'atelier. Dans cette itération, une planification de deux heures de production est considérée, ce qui conduit à un nombre entre 8 et 12 lots par équipement de production. Ces lots sont alors transportés par les opérateurs vers les *In-Buffers*, puis ils sont stockés dans les OHBs par les véhicules. Une deuxième itération du *Scheduler* est prévue afin de mettre à jour la liste des lots planifiés pour le traitement sur les équipements de production.

Ce processus de planification du *WIP* assure une meilleure gestion du stockage en considérant la priorité des lots. Les OHBs ne contiennent alors que les lots planifiés pour le traitement sur un horizon de deux heures de traitement (paramétrable).

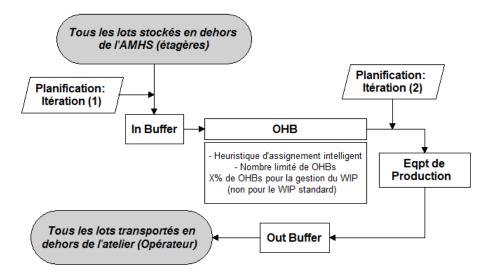


Figure 8.15 – Processus de planification du WIP dans l'atelier de photolithographie.

Pour résumer, la Figure 8.16 présente l'impact de la politique de gestion des OHBs sur le débit (ou *throughput*) de l'atelier de photolithographie. On constate que l'adoption de l'heu-

ristique d'affectation intelligente et le nouveau processus de planification du *WIP* dans le modèle de simulation évite la dégradation du *throughput* même avec 321 OHBs seulement.

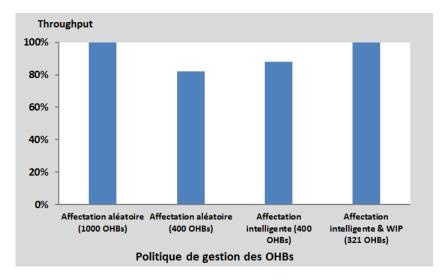


Figure 8.16 – Impact de l'heursitique d'affectation des OHBs sur le throughput de l'atelier.

#### 8.4 Phase 4 : Conception robuste de l'AMHS

L'idée consiste à évaluer l'AMHS face à des conditions de production plus sévères en tenant compte des évolutions stratégiques dans l'atelier. Dans notre cas, un AMHS à base d'un système OHT est défini pour le transport des lots et aussi des réticules. Ainsi, nous ne pouvons pas juger la robustesse d'un *design* sans étudier et analyser l'interaction entre le transport des lots et celui des réticules.

#### 8.4.1 Interaction entre le transport des lots et des réticules

Notons que les deux flottes hétérogènes de véhicules (une le transport de réticule et l'autre pour le transport des lots) partagent le même réseau de rails. Il est donc important de prévoir les problèmes de congestion capables d'engendrer un retard dans la livraison et, par la suite, un risque de dégrader la productivité de l'atelier de photolithographie.

La Table 8.6 résume les résultats des simulation en termes des taux du trafic générés par les deux flottes de véhicules. Compte tenu des objectifs fixés en termes de trafic en consultant les préconisations du fournisseur du système OHT (taux tolérable), nous confirmons d'aprés la Table 8.6 l'efficacité de la conception d'AMHS proposée.

**Table 8.6** – Paramètres du trafic des véhicules.

| Trafic des lo | ots (véhicule/r | ail/minute) | Trafic des r | éticules (véhic | cule/rail/minute) |                      |
|---------------|-----------------|-------------|--------------|-----------------|-------------------|----------------------|
| Taux Max      | Taux Moy.       | Taux        | Taux Max     | Taux Moy.       | Taux              | % du network utilisé |
|               |                 |             |              |                 |                   |                      |
| trafic        | trafic          | tolérable   | trafic       | trafic          | tolérable         | par les véhicules    |

Dans le même contexte, nous présentons dans la Figure 8.17 les diagrammes du temps de livraison des lots et des réticules issus des simulations réalisées. On constate qu'environ 80% des missions de livraison sont effectuées en seulement 120 secondes pour les lots et les réticules. En outre, le temps de livraison maximal est de 300 secondes et 360 secondes pour les lots et les réticules, respectivement.

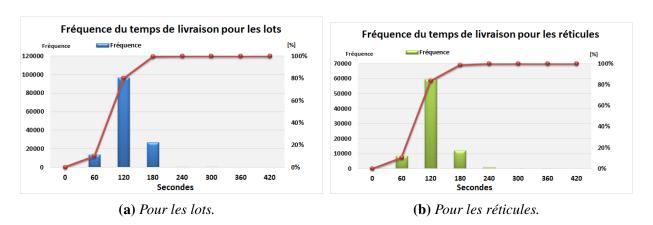


Figure 8.17 – Histogrammes du temps de livraison pour les lots et les réticules.

Dans l'atelier de photolithographie, une fenêtre de temps est imposée entre deux séries de lots à traiter sur un équipement de production au vu de la nature de l'opération et de la technologie des machines. Deux opérations de manutention sont à prévoir durant cette fenêtre de temps :

- Décharger (ou *pickup*) un lot en fin de traitement d'un *LoadPort* de l'équipement de production et le transporter vers sa prochaine destination,
- Transporter un nouveau lot vers l'équipement de production et le charger sur un Load-Port.

De même, pour les réticules, la nature de l'opération de photolithographie implique des fenêtres temporelles pour charger un réticule.

Sur la base des histogrammes des temps de livraison des réticules et de lots, nous confirmons que le temps de livraison reste acceptable pour l'échange d'un réticule ou d'un lot sur un équipement de production sans impacter les performances de l'atelier.

# 8.4.2 Impact d'une augmentation de la capacité de production sur l'AMHS

Dans cette section, on évalue la capabilité du *design* d'AMHS face à une augmentation de la capacité dans l'atelier de photolithographie. L'idée consiste à augmenter le *WIP* et le nombre d'équipements dans l'atelier afin de :

- déterminer le niveau d'activité maximal qui peut être supporté par ce design de l'AMHS,
- identifier les éléments critiques de l'AMHS pouvant limiter la performance du processus de transport,
- quantifier l'impact d'une augmentation de capacité sur les éléments de l'AMHS.

Pour y parvenir, des équipements de production fictifs sont ajoutés dans le modèle de simulation. Puis, une étude de simulation et d'expérimentation en deux étapes, schématisée dans la Figure 8.18, est réalisée.

Pour chaque élément de l'AMHS (stockeur de réticules par exemple), un indicateur de performance est défini (le débit d'un stockeur de réticules par exemple). Dans une première étape, la capacité de production et le WIP sont augmentés et la configuration de base du design optimisé est considérée dans le modèle de simulation. Ainsi, l'évaluation des indicateurs permet d'identifier les éléments critiques de l'AMHS. Ensuite, dans une deuxième étape, on propose une nouvelle configuration du design modifiant un seul élément d'AMHS à la fois (nombre de stockeurs de réticules par exemple). Avec ce nouveau paramétrage, les résultats des expérimentation donnent les nouvelles valeurs des indicateurs, ainsi que le gain en débit total de l'atelier.

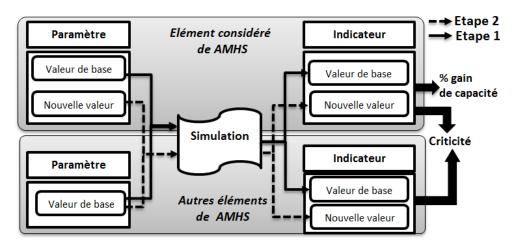


Figure 8.18 – Méthode de simulation et d'expérimentation.

La Table 8.7 présente les éléments de l'AMHS, leurs valeurs de base et leurs indicateurs de performance. Pour chaque élément de l'AMHS, deux expérimentations sont menées en considérant :

— La valeur de base du paramètre (par exemple : 3 stockeurs de réticules) et les valeurs de bases des paramètres des autres éléments de l'AMHS,

# Chapitre 8 : Extension de l'AMHS : transport et stockage des lots dans l'atelier de photolithographie

— La nouvelle valeur du paramètre (par exemple : 4 stockeurs de réticules) et toujours les valeurs de bases des paramètres des autres éléments de l'AMHS.

|                            |                | Paramètre         |                 |  |
|----------------------------|----------------|-------------------|-----------------|--|
| Elément de l'AMHS          | Critère        | Valeur de base    | Nouvelle valeur | Indicateur de performance                          |
| Stockeur de réticules      | Nombre         | 3                 | 4               | Débit (Lots/h)                                     |
| Véhicules (ré-<br>ticules) | Nombre         | 7                 | 9               | Utilisation moyenne                                |
| Véhicules<br>(lot)         | Nombre         | 14                | 16              | Utilisation moyenne                                |
| In-Buffer                  | Nombre         | 2                 | 3               | Temps pour Entrer un Lot (TEL)                     |
| Out-Buffer                 | Nombre         | 2                 | 3               | Temps pour Sortir un Lot (TSL)                     |
| OHB                        | Nombre /Eqpt   | 12                | 17              | Nombre moyen d'OHBs utilisés                       |
|                            | Processus de p | roduction dans l' | atelier         | Taux d'utilisation moyen<br>Débit total (Lots / h) |

La Table 8.8 résume les résultats des différentes simulations pour une instance représentative du *WIP*. Dans ce tableau, chaque paire de lignes présente la valeur de base et la nouvelle valeur pour un élément de l'AMHS (stockeur de réticules, nombre de véhicules...). Les colonnes contiennent les indicateurs de performance. À partir des résultats des expérimentations présentés dans la Table 8.8, nous analysons l'impact de chaque élément de l'AMHS sur les indicateurs de performance :

- **Stockeur de réticules :** le fait d'ajouter un quatrième stockeur conduit, d'une part, à un gain de 19% en terme de *throughput* et 15.9% en terme d'utilisation des équipements de production. Cela signifie qu'en considérant seulement 3 stockeurs, le processus de stockage des réticules peut devenir un élément limitant pour le processus de production dans l'atelier en cas d'augmentation futur de l'activité. En effet, dans le cas de 4 stockeurs, le débit total des stockeurs (égal au nombre de stockeur x le débit par stockeur) a augmenté. On remarque aussi qu'une augmentation très importante du TEL en ajoutant un quatrième stockeur. Par conséquence, le nombre moyen d'OHBs occupés a baissé de 279 à 25 OHBs. En effet, pour suivre l'accroissement du rythme de la production, les lots passent moins de temps dans les OHBs.
- Nombre de véhicules (transport des réticules): on observe un gain de 3% en débit total de l'atelier et un gain de 2% en utilisation des machines quand le nombre de véhicules augmente de 8 à 10. Cela signifie qu'en cas d'augmentation de capacité de production les véhicules qui assurent le transport des réticules peuvent limiter la performance du processus de transport.
- **Nombre de véhicules (transport des lots) :** à l'exception du taux d'utilisation de la flotte (pour le transport des lots), l'augmentation du nombre de véhicules n'a pas

Table 8.8 – Résultats des simulations.

|                      |        |           |             |           | Indicateurs de performance    | ormance |        |                         |             |
|----------------------|--------|-----------|-------------|-----------|-------------------------------|---------|--------|-------------------------|-------------|
| Element de l'AMHS    | ИНS    | ОНВ       | Stockeur de | Utilisati | Utilisation des véhicules (%) | In-     | Out-   | Processus de production | roduction   |
|                      |        |           | réticules   |           |                               | Buffer  | Buffer |                         |             |
| Paramètre            | Valeur | OHBs      | Débit (Lots | Lots      | Réticules                     | TEL     | TSL    | throughput(%)           | Utilisation |
|                      |        | occupés   | par h)      |           |                               | ·imi    | (mj    |                         | moyenne     |
|                      |        | (moyenne) |             |           |                               | nutes)  | nutes) |                         | des Eqpts   |
|                      |        |           |             |           |                               |         |        |                         | (%)         |
| Stockeur de          | 3      | 279       | 25          | 25%       | 92%                           | 2.56    | 3.24   | 100%                    | 64.1%       |
| réticules            | 4      | 25        | 23          | %4%       | 75%                           | 7.27    | 3.25   | 119%                    | %08         |
| Nombre de            | 8      | 279       | 25          | 55%       | 65%                           | 2.56    | 3.24   | 100%                    | 64.1%       |
| véhicules (réticule) | 10     | 279       | 26          | %95       | 55%                           | 2.76    | 3.24   | 103%                    | 66.11%      |
| Nombre de            | 15     | 279       | 25          | 25%       | 65%                           | 2.56    | 3.24   | 100%                    | 64.1%       |
| véhicules (lot)      | 17     | 279       | 25          | 49%       | %59                           | 2.57    | 3.24   | 100.3%                  | 64.27%      |
| Nombre de            | 2      | 279       | 25          | 25%       | 95%                           | 2.56    | 3.24   | 100%                    | 64.1%       |
| In-Buffers           | 33     | 279       | 25          | %95       | %59                           | 0.99    | 3.24   | 100.4%                  | 64.34%      |
| Nombre de            | 2      | 279       | 25          | 25%       | %59                           | 2.56    | 3.24   | 100%                    | 64.1%       |
| Out-Buffers          | 33     | 279       | 25          | %95       | %59                           | 2.56    | 3.23   | 100.5%                  | 64.42%      |
| Nombre               | 12     | 279       | 25          | 25%       | %59                           | 2.56    | 3.24   | 100%                    | 64.1%       |
| d'OHB/Eqpt           | 17     | 391       | 25          | 25%       | %59                           | 2.62    | 3.24   | 100.55%                 | 64.46%      |

- d'impact significatif sur les indicateurs de performance.
- **Nombre de** *In-Buffers* : l'ajout d'un troisième *In-Buffer* permet seulement de réduire le TEL.
- **Nombre de** *Out-Buffers*: nous constatons que le fait d'ajouter un troisième *Out-Buffer* n'a pas d'impact significatif sur les indicateurs de performance.
- Nombre d'OHBs par équipement de production : les résultats démontrent que l'affectation de plus d'OHBs par équipement n'a pas d'effet significatif sur la performance de l'atelier et sur les éléments d'AMHS. En fait, cela ne conduit qu'à une augmentation du nombre moyen d'OHBs occupés.

# 8.4.3 Impact d'une augmentation de la capacité de production sur le processus de stockage des réticules

L'analyse de robustesse a mis en avant l'élément le plus critique de l'AMHS qui peut limiter la performance du processus de transport en cas d'augmentation de capacité de production dans l'atelier. Il s'agit du processus de stockage des réticules qui devient *bottleneck*. Dans cette section, une étude par simulation et expérimentation est menée afin d'analyser cet aspect. L'objectif est de déterminer les autres éléments de l'AMHS qui peuvent limiter les performances de l'atelier dans le cas de 4 stockeurs de réticules. La Figure 8.19 schématise les expérimentations menées en présence de 4 stockeurs.

D'après la Figure 8.19, il est important de souligner que l'ajout d'un quatrième stockeur a un impact sur certains éléments de l'AMHS (OHB, flotte de véhicules (réticules), *In-Buffer*). Cela a déjà été confirmé précédemment (voir Table 8.8). Les expérimentations supplémentaires réalisées ont montré qu'une augmentation du nombre de véhicules pour le transport des réticules (de 8 à 10) et le nombre d'*In-Buffers* (de 2 à 3) conduisent à un gain total de 25,6% en débit de l'atelier par rapport au cas de 3 stockeurs. De plus, le nouveau *design* de l'AMHS (4 stockeurs, 10 véhicules, 3 *In-Buffers*...) entraîne une réduction du temps moyen pour faire entrer un lot (TLE) de 7,27 à seulement 1,85 minutes. Cela a permis de rétablir le processus normal de stockage des lots avec un nombre moyen d'OHBs occupés égal à 279.

Pour résumer, l'ajout d'un quatrième stockeur permet de supporter jusqu'à 19% de capacité supplémentaire. Cependant, une telle décision entraîne une dégradation du processus d'entrée des lots. L'ajout d'un troisième *In-Buffer* est alors nécessaire. De plus, l'ajout de deux véhicules pour le transport des réticules permet de supporter jusqu'à 25.6% de hausse de capacité de production.

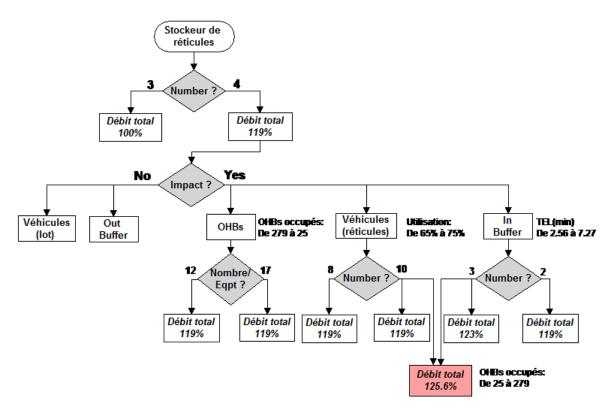


Figure 8.19 – Effet de l'ajout d'un quatrième stockeur de réticules.

#### 8.5 Phase 5 : Prise de décision

Dans cette dernière phase de la méthodologie, on s'intéresse à la prise de décision sur le *design* final de l'AMHS à implémenter dans l'atelier de photolithographie. La même démarche proposée dans le chapitre précédent est adoptée afin de juger la pertinence de chaque *design*. Il s'agit alors de satisfaire une contrainte forte : la non dégradation du processus de production. Puis, les objectifs en termes de transport (utilisation des véhicules, temps de livraison total) permettent de faire la différence entre les alternatives de *design*.

Dans le cas de STMicroelectronics à Rousset, les résultats de la méthodologie ont permis d'orienter le choix des responsables pour le *design* d'un AMHS pour la manutention des réticules et des lots. Enfin, les principales caractéristiques de la solution sont :

- La flotte de véhicules : 15 véhicules,
- La politique de gestion des véhicules : affectation à 3 zones,
- Le réseau de rails : réseau initialement prévu pour le transport des réticules,
- Le nombre de *In-Buffers* : 2,
- Le nombre de Out-Buffers : 2,
- Le nombre d'OHBs : 321 OHBs,

# Chapitre 8 : Extension de l'AMHS : transport et stockage des lots dans l'atelier de photolithographie

 La politique de gestion d'OHBs : heuristique d'affectation intelligente et planification du WIP.

#### 8.6 Conclusion

Ce chapitre est une autre application industrielle de la méthodologie proposée pour la conception d'un AMHS dans une unité de fabrication de semi-conducteurs existante et fonctionnelle (voir Chapitre 6). L'objectif est d'automatiser la manutention des lots dans l'atelier de photolithographie. Cette application représente un aspect très particulier. En effet, l'idée consiste à utiliser un AMHS à base d'un système OHT qui a été initialement conçu pour le transport des réticules (voir Chapitre 7). Ainsi, il est important de tenir compte des interactions entre le processus de transport de réticules et celui des lots.

La première phase de la méthodologie a permis de collecter les données nécessaires et de mettre à jour les contraintes physiques qui peuvent avoir un impact sur le *design* de l'AMHS. Ensuite, nous avons fourni un *design* initial issu principalement de l'AMHS proposée pour la manutention des réticules. La troisième phase a été dédiée à l'"optimisation", par simulation et expérimentation, du *design* initial. Puis, dans la quatrième phase de la méthodologie, une analyse de robustesse du *design* "optimisé" a été menée en relevant deux aspects : (1) l'interaction entre le transport des lots et des réticules et, (2) l'impact d'une augmentation de la capacité de production sur l'AMHS. La prise de décision au niveau de l'entreprise dans la dernière phase est réalisée sur la base des résultats de cette étude.

### Chapitre 9

### **Conclusions et perspectives**

Le processus de fabrication de semi-conducteurs est l'un des plus complexes au monde. La compétitivité accrue du marché en font une industrie qui est sans cesse en train de chercher à s'améliorer (en termes de processus de production, de savoir-faire, d'infrastructures, de coûts ...) pour d'abord continuer à exister et être compétitives. En particulier, dans le cas des unités de fabrication de l'ancienne génération (*legacy*), une modernisation est souvent nécessaire afin de réduire les coûts de production et améliorer la productivité. Plusieurs pistes sont ainsi explorées comme par exemple l'optimisation de l'ordonnancement [9], du processus physique, l'automatisation des moyens de fabrication, etc [13].

Dans ce contexte, les travaux de cette thèse réalisés dans le cadre d'une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la REcherche) dans une industrie de semiconducteurs ont visé à proposer une aide à la décision pour la modernisation d'une ancienne unité de fabrication de semi-conducteurs (wafer fab). Nous nous sommes intéressés en particulier à l'automatisation des opérations de manutention des produits dans l'unité de fabrication. Ce projet représente un enjeu financier majeur pour l'avenir de l'entreprise étant donné un environnement de production caractérisé par un faible volume de production et une grande variété de produits [35]. L'intégration d'un système de manutention automatisé pourrait donner plus de flexibilité et souplesse au processus de production très instable. Néanmoins, le risque d'erreur et d'échec est élevé vu le challenge technique dans l'intégration d'un AMHS dans une ancienne wafer fab qui n'a pas été conçue à l'origine pour recevoir un tel système automatisé. Ainsi, cette thèse a pour ambition d'offrir un support méthodologique pour ce projet afin d'éviter les erreurs qui peuvent avoir un grand impact à moyen-long et même à court termes. Nous avons essayé dans ce travail de donner les lignes stratégiques pour guider le projet.

Ce rapport de thèse commence par une mise en contexte de la spécificité du processus de fabrication de semi-conducteurs ainsi que par une description détaillée des problématiques à traiter. Ensuite, sur la base d'une revue de la littérature, nous avons constaté le nombre limité des travaux de recherche qui ont abordé des problématiques similaires dans les unités de fabrication de semi-conducteurs. Cela nous a permis de positionner nos travaux et de montrer nos contributions scientifiques.

Sur un niveau stratégique, une méthodologie a été développée pour supporter l'intégra-

tion de l'AMHS dans la globalité de la *wafer fab*. L'objectif est de : (1) fournir une démarche permettant de sélectionner le meilleur type d'AMHS à installer dans chaque atelier de production et, (2) définir les stratégies de transport et de stockage automatisés. La méthodologie a été appliquée dans le cas de la *wafer fab* 200mm de STMicroelectronics Rousset. Toujours au niveau stratégique, nous avons également défini une stratégie de déploiement d'un AMHS dans une unité de fabrication. Il était question de savoir (1) par où ou par quoi commencer l'installation, (2) quelle est le meilleur planning de déploiement et (3) de quoi dépend la décision d'intégrer un AMHS dans un atelier avant un autre. Il est important de souligner que grâce à notre partenaire industriel nous avons pu formuler ce problème comme étant un problème de décision multicritères. Nous avons ensuite proposé une aide à la décision basée sur la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) pour fournir un meilleur planning de déploiement aux décideurs. L'application de l'approche de résolution sur un cas industriel a permis de valider son efficacité ainsi que la robustesse de la solution proposée.

Enfin, sur un aspect tactique opérationnel, le travail a été orienté vers l'automatisation de la manutention sur un niveau local en considérant un seul atelier de production. Une méthodologie pour développer un design optimisé et robuste d'un AMHS dans un atelier prévu pour une manutention manuelle a été proposée. En partant d'un design initial, les différentes étapes de la méthodologie permettent de garantir la fiabilité du processus de transport et de stockage automatisé en tenant compte des objectifs stratégiques de l'entreprise. Ensuite, la méthodologie a été appliquée au *design* d'un AMHS dans l'atelier de photolithographie. Dans un premier temps, un AMHS à base d'un système OHT a été conçu et optimisé pour la manutention des réticules. Puis, nous avons étudié l'extension de l'AMHS pour la manutention des lots. L'idée consiste à utiliser le même réseau de rails pour le transport à la fois des lots et des réticules.

Dans la section suivante, nous présentons les principaux livrables industriels.

#### 9.1 Livrables industriels

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont abouti à des réalisations industrielles :

- La cartographie des flux de production : la migration d'un système de manutention manuelle vers un AMHS a nécessité un travail de préparation. Une cartographie des flux de production dans la wafer fab a été fournie afin de caractériser les besoins de transport à prévoir avec un AMHS. Cet outil a permit de facilité l'analyse et la vérification des flux ainsi que le suivi des indicateurs de performances de la production sur un niveau global (toute l'unité de fabrication) et local (chaque machine, chaque famille d'équipements, chaque atelier).
- Le planning de déploiement de l'AMHS : la stratégie de déploiement d'un AMHS est un élément déterminant pour la réussite du projet d'automatisation de la manutention dans la wafer fab [32]. Dans ce cadre, nous avons proposé un outil d'aide à la décision

9.2 Perspectives 185

qui fournit un ordre de déploiement de l'AMHS en se basant sur le jugement des décideurs. Cet outil a permis de choisir l'atelier pilote (la photolithographie) et de garantir la robustesse de tout le planning de déploiement.

L'optimisation de l'AMHS dans l'atelier de photolithographie : le travail réalisé dans le cadre du design d'un AMHS pour le transport des lots et des réticules dans l'atelier de photolithographie a contribué à l'avancement des négociations avec le fournisseur du système de manutention. Concrètement, grâce au travail de modélisation et de simulation, nous avons pu réduire par exemple la taille des flottes de véhicules pour le transport des lots et des réticules. Sur un niveau interne à l'entreprise, les recommandations fournies dans la phase de design ont sensibilisé l'équipe du projet sur certains aspects techniques liés au processus de stockage et de transport automatisé (réseau de rails, stockeurs de réticules, stockeurs unitaires des lots...).

### 9.2 Perspectives

Rappelons que, dans le cas d'une anciennes *wafer fab* 200mm, une solution hétérogène d'AMHS (différents types d'AMHS) est souvent nécessaire tout en gardant la possibilité d'une présence humaine dans l'unité de fabrication. Comme perspectives, nous proposons deux principaux axes de recherche dans la gestion du système de manutention automatisé.

Sur un niveau local, le premier thème qui mérite à notre point de vue d'être abordé est l'optimisation de la gestion de la manutention automatisée dans un atelier (en local). Nous pensons que sur un niveau local plusieurs axes de recherche sont possibles dont l'objectif principal est d'améliorer les performances de l'AMHS dans chaque atelier de production. Nous avons commencé par le design du système en amont de l'installation. Il est intéressant maintenant d'approfondir les études post-installation en abordant des problématiques avec en particulier :

- La gestion des véhicules à vides,
- L'optimisation du paramétrage d'AMHS liée à la gestion de la flotte. En effet, le fournisseur choisi finalement par l'entreprise ne permet d'optimiser directement le *routing* des véhicules, déterminer explicitement le choix d'un véhicule pour satisfaire une requête de livraison mais il permet seulement l'optimisation de paramètre de contrôle de la flotte.

Sur un niveau global, la gestion du système de pilotage pour toute l'unité de fabrication est une thématique à aborder. En effet, l'optimisation locale de chaque type de transport dans les différents ateliers ne garantit pas une meilleure performance de l'AMHS dans la globalité de l'unité de fabrication. Il est important alors de penser par exemple à une structure centralisée de pilotage qui permet de :

 Définir les objectifs globaux en cohérence avec des objectifs locaux en termes de manutention,

- Évaluer les performances de l'AMHS en se basant sur des indicateurs clés,
- Assurer la cohabitation entre les différents types d'AMHS.

### Annexe A

# Analyse comparative des systèmes OHT et AGV

### A.1 Capabilité de transport

Pour évaluer la capabilité de transport, quatre sous-critères sont sélectionnés tel qu'on le résume dans la Table A.1.

### A.2 Gestion de transport

Dans cette partie, on s'intéresse à la gestion de flotte et à la gestion de trafic généré par un AMHS. La Table A.2 présente les résultats de la comparaison.

### A.3 Compatibilité avec la salle blanche

La nature du processus de fabrication de semi-conducteurs impose un environnement de travail très particulier. Ainsi, nous évaluons dans cette partie la compatibilité des systèmes OHT et AGV avec la salle blanche. Les résultats sont résumés dans la Table A.3.

#### A.4 Sécurité

La sécurité est un facteur clé dans le choix d'une solution d'AMHS par rapport à une autre. Dans la Table A.4, on se focalise non seulement sur la sécurité des opérateurs, mais aussi celle des items transportés.

#### A.5 Coût

Nous comparons le coût total des deux solutions AGV et OHT y compris : le coût du matériel (*hardware* et *software*) pour le transport et le stockage, le coût d'installation et le

coût de modification d'une installation. La Table A.5 présente les résultats de la comparaison.

### A.6 Maintenance et support

Dans cette partie, une mesure de la fiabilité de chaque solution d'AMHS est fournie. De plus, l'impact d'une maintenance sur la performance du processus de transport et de production est évalué. Les résultats sont résumés dans la Table A.6.

### A.7 Exigences physiques

En fonction du type d'AMHS à installer, des exigences physiques et techniques sont imposées. La Table A.7 résume ces principaux critères identifiés pour l'intégration d'un OHT et des AGVs dans un atelier de production.

### A.8 Points techniques

Nous présentons quelques points techniques qui peuvent faire la différence entre un AMHS à base d'un système d'OHT ou AGV. La Table A.8 présente les différents points techniques sélectionnés dans cette étude.

**Table A.1 – Résultats de la comparaison.** 

Sous critère OHT

| Sous critère                        | OHT   |                      | AGV   |                     |       |
|-------------------------------------|-------|----------------------|-------|---------------------|-------|
| Définition                          | Poids | Commentaire          | Score | Commentaire         | Score |
| Mission de livraison (mission/véhi- | 5     | Jusqu'à 20 mission/- | 2     | 9 missions/h (23m x | 1     |
| cule/heure)                         |       | véhicule             |       | 2.3 m)              |       |
| Capacité de transport (lot)         | 5     | Max 1 mission        | 1     | Max 2 lot (avec     | 2     |
|                                     |       |                      |       | swap)               |       |
| Vitesse (m/s)                       | 4     | Max 3.33 m/s         | 2     | Max 1 m/s           | 1     |
| Temps de manutention                | 2     | Max 15s              | 2     | Max 12s             | 1     |
| Score total                         |       | 27                   |       | 21                  |       |
| Score moyen                         |       | 6.75                 |       | 5.25                |       |

 Table A.2 – Résultats de la comparaison.

|                                   | Sous critère   |       | OHT             |       | AGV              |       |
|-----------------------------------|--|-------|-----------------|-------|------------------|-------|
|                                   | Définition   | Poids | Commentaire     | Score | Commentaire      | Score |
|                                   | Disponibilité du contrôleur de flotte de véhicules                                       | 5     | Oui             | 2     | Oui              | 1     |
| icules                            | Degré de développement de contrô-<br>leur de flotte de véhicules                         | 5     | avancé          | 2     | de base          | 1     |
| e véhi                            | Possibilité de développement d'un contrôleur de flotte de véhicules                      | 3     | Non             | 1     | Oui              | 2     |
| otte d                            | Niveau d'accès au contrôleur de flotte   | 5     | Très limité     | 1     | Accès possible   | 2     |
| Gestion de la flotte de véhicules | Possibilité de modification du contrôleur de flotte                                      | 4     | Non             | 1     | Oui              | 2     |
| tion c                            | Possibilité d'intervention humaine sur la flotte de véhicules                            | 5     | Non             | 1     | Oui              | 2     |
| Čes                               | Possibilité d'interfaçage entre le contrôleur de flotte et un autre système de gestion.  | 3     | Non             | 1     | Oui              | 2     |
|                                   | Affectation d'une mission à un véhicule.   | 5     | Imposé          |       | Pas imposé       | 2     |
|                                   | Possibilité de changement de prio-<br>rité ou destination d'une mission de<br>livraison. | 4     | Non             | 1     | Oui              | 2     |
| trafic                            | Mouvement de véhicules : unidirectionnel ou bidirectionnel.                              | 3     | unidirectionnel | 1     | Navigation libre | 2     |
| Gestion du trafic                 | Un véhicule peut dépasser un autre en cas de blocage ou arrêt.                           | 5     | Non             | 1     | Oui              | 2     |
| Gestic                            | Possibilité de mouvement vers l'arrière par un véhicule.                                 | 3     | Non             | 1     | Oui              | 2     |
|                                   | Impact sur la flotte en cas d'un arrêt de véhicule.                                      | 5     | Oui             | 1     | Non              | 2     |
|                                   | Score total  |       | 65              |       | 100              |       |
|                                   | Score moyen  |       | 5               |       | 7.69             |       |

 Table A.3 – Résultats de la comparaison.

| Sous critère                               |       | OHT         |       | AGV         |       |
|--|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| Définition                                 | Poids | Commentaire | Score | Commentaire | Score |
| Compatibilité avec sale blanche : ISO 2    | 5     | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| Conformité SEMI F21-1102 (Niveau de        | 5     | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| contamination moléculaire)                 |       |             |       |             |       |
| Dissipation Electrostatique des véhicules? | 5     | Non         | 2     | Non         | 2     |
| Dissipation Electrostatique des items      | 5     | Non         | 2     | Non         | 2     |
| transportés?                               |       |             |       |             |       |
| Conformité des capteurs laser avec IEC     | 5     | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| 60825/A2?                                  |       |             |       |             |       |
| Marquage CE : véhicule et pièces           | 5     | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| Conformité avec "Factory Mutual FMRC       | 5     | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| 4910" protocol de test                     |       |             |       |             |       |
| Score total                                |       | 70          |       | 70          |       |
| Score moyen                                |       | 10          |       | 10          |       |

 Table A.4 – Résultats de la comparaison.

|                         | Sous critère  |              | OHT                                    |       | AGV                                     |       |
|-------------------------|---|--------------|--|-------|---|-------|
|                         | Définition  | <b>Poids</b> | Commentaire                            | Score | Commentaire                             | Score |
| Sécurité des opérateurs | Contact possible avec les opérateurs.                   | 3            | Durant le chargement/-<br>déchargement | 2     | Durant le charge-<br>ment/déchargement/ | 1     |
| péra                    |   |              |  |       | stockage/transport                      |       |
| les ol                  | Sécurité des opérateurs en cas de maintenance.          | 5            |  | I     |   | 2     |
| ırité o                 | Niveau de bruit généré dans la fab.                     | 3            | Non                                    | 2     | Non                                     | 1     |
| Sécu                    | Capacité de détection : distance de sécurité.           | 3            |  | 2     |   | 1     |
|                         | Système de sécurité des véhicules.                      | 5            | Oui                                    | 2     | Oui                                     | 1     |
|                         | Accélération des véhicules.                             | 2            |  | 1     |   | 2     |
| items                   | Performance de système d'absorption de chokes.          | 5            | Oui                                    | 2     | Oui                                     | 1     |
| Sécurité des items      | Possibilité d'endommage-<br>ment des items transportés. | 5            |  | 1     |   | 2     |
| ij                      | Arrêt d'urgence.  | 5            | Oui                                    | 2     | Oui                                     | 1     |
| Sécu                    | Vibration générée par les véhicules.                    | 5            | Non                                    | 2     | Non                                     | 1     |
| -                       | Score total   |              | 70                                     |       | 53                                      |       |
|                         | Score moyen   |              | 8.75                                   |       | 6.625                                   |       |

 Table A.5 – Résultats de la comparaison.

| Sous critère                               |              | OHT         |       | AGV         |       |
|--|--------------|-------------|-------|-------------|-------|
| Définition                                 | <b>Poids</b> | Commentaire | Score | Commentaire | Score |
| Compatibilité avec sale blanche : ISO 2    | 5            | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| Conformité SEMI F21-1102 (Niveau de        | 5            | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| contamination moléculaire)                 |              |             |       |             |       |
| Dissipation Electrostatique des véhicules? | 5            | Non         | 2     | Non         | 2     |
| Dissipation Electrostatique des items      | 5            | Non         | 2     | Non         | 2     |
| transportés?                               |              |             |       |             |       |
| Conformité des capteurs laser avec IEC     | 5            | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| 60825/A2?                                  |              |             |       |             |       |
| Marquage CE : véhicule et pièces           | 5            | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| Conformité avec "Factory Mutual FMRC       | 5            | Oui         | 2     | Oui         | 2     |
| 4910" protocol de test                     |              |             |       |             |       |
| Score total                                |              | 26          |       | 52          |       |
| Score moyen                                |              | 4.33        |       | 8.67        |       |

Table A.6 – Résultats de la comparaison.

| Sous critère                         |              | OHT                      |       | AGV                   |       |
|--------------------------------------|--------------|--------------------------|-------|-----------------------|-------|
| Définition                           | <b>Poids</b> | Commentaire              | Score | Commentaire           | Score |
| MTBF, MTTR                           | 5            |                          | 2     |                       | 1     |
| Impact d'une maintenance sur les     | 5            | Bloquer les autres éqpts | 1     | Aucun impact          | 2     |
| eqpts du bay.                        |              |                          |       |                       |       |
| % de la disponibilité de véhicule/-  | 5            | 100% disponible          | 2     | Temps pour chargement | 1     |
| jour.                                |              |                          |       | de batterie           |       |
| En cas de panne : l'impact sur les   | 5            |                          | 1     |                       | 2     |
| autres pièces du AMHS.               |              |                          |       |                       |       |
| En cas de panne : l'impact sur le    | 5            |                          | 1     |                       | 2     |
| processus de production.             |              |                          |       |                       |       |
| En cas de blocage, impact sur autres | 4            | Bloquer les autres véhi- | 1     |                       | 2     |
| véhicules.                           |              | cules utilisant le même  |       |                       |       |
|                                      |              | rail.                    |       |                       |       |
| En cas de panne, possibilité de      | 5            | Non                      | 1     | Oui                   | 1     |
| contrôler manuellement la flotte.    |              |                          |       |                       |       |
| Support technique des autres sites   | 5            | Crolles 300              | 2     | Crolles 200           | 1     |
| de l'entreprise.                     |              |                          |       |                       |       |
| Score total                          |              | 54                       |       | 58                    |       |
| Score moyen                          |              | 6.75                     |       | 7.25                  |       |

 Table A.7 – Résultats de la comparaison.

| Sous critère                       |       | OHT                       |       | AGV         |       |
|------------------------------------|-------|---------------------------|-------|-------------|-------|
| Définition                         | Poids | Commentaire               | Score | Commentaire | Score |
| Hauteur du plafond.                | 5     | Min 3.4m                  | 1     | Non imposée | 2     |
| Disponibilité du plafond et évolu- | 5     | Effet sur la maintenance, | 1     |             | 2     |
| tion de Layout des eqpts.          |       | nouveau eqpt              |       |             |       |
| Dimension de couloirs              | 4     | Non imposer               | 2     | Min 1,5m    | 1     |
| Besoin en layout d'eqpts (aligne-  | 3     | Un alignement des eqpts   | 1     |             | 2     |
| ment)                              |       |                           |       |             |       |
| Accès au LoadPort des eqpts        | 4     | À partir de plafond       | 1     |             | 2     |
|                                    |       | seulement                 |       |             |       |
| Score total                        |       | 25                        |       | 38          |       |
| Score moyen                        |       | 5                         |       | 7.6         |       |

Table A.8 – Résultats de la comparaison.

|                        | Sous critère                  |              | ОНТ                    |       | AGV                     |       |
|------------------------|-------------------------------|--------------|------------------------|-------|-------------------------|-------|
|                        | Définition                    | <b>Poids</b> | Commentaire            | Score | Commentaire             | Score |
| on                     | Alimentation du système       | 5            | direct                 | 2     | batterie                | 1     |
| tati                   | (batterie,)                   |              |                        |       |                         |       |
| en                     | Autonome des véhicules        | 5            | 100%                   | 2     | Charge de batterie      | 1     |
| Alimentation           | Alimentation des autres       | 4            | alimentation des rails | 1     |                         | 2     |
| A                      | pièces de AMHS                |              |                        |       |                         |       |
| nt                     | Angles pour tourner           | 4            | Utilisation des rails  | 1     | Navigation libre        | 2     |
| me                     | Désactivation du système de   | 3            |                        | 1     |                         | 2     |
| ge                     | détection dans un endroit     |              |                        |       |                         |       |
| FE I                   | spécifique.                   |              |                        |       |                         |       |
| Circulation chargement | Précision de la navigation et | 4            | Position fixe          | 1     | Apprentissage des véhi- | 2     |
| tio]                   | de positionnement des véhi-   |              |                        |       | cules                   |       |
| ula                    | cules                         |              |                        |       |                         |       |
| i.c                    | Accès direct au LoadPort      | 5            |                        | 1     |                         | 2     |
| $\Box$                 | Possibilité d'imposer un tra- | 3            | Utilisation des rails  | 1     | Possible                | 2     |
|                        | jectoire pour un véhicule     |              |                        |       |                         |       |
| 4)                     | Navigation libre ou rail?     | 5            | rail                   | 1     | Navigation libre        | 2     |
| Véhicule               | Résistance aux chokes         | 3            |                        | 2     |                         | 1     |
| hic                    | Poids des véhicules           | 4            | Poids des véhicules et | 2     | Jusqu'à 600kg           | 1     |
| Vé                     |                               |              | des rails              |       |                         |       |
|                        | Charge utile                  | 2            |                        | 1     |                         | 2     |
|                        | Score total                   |              | 70                     |       | 78                      |       |
|                        | Score moyen                   |              | 5.83                   |       | 6.5                     |       |

### Annexe B

### Calcul matricielle dans la méthode AHP

### B.1 Questionnaire pour comparer les facteurs de déploiement

Merci de prendre quelques minutes de lire les questions suivantes et cocher votre réponse dans les tableaux de comparaison. Si un facteur sur la gauche est plus important que celui correspondant sur la droite, placez votre marque à gauche de l'importance «Égale en gris » sous le niveau d'importance que vous préférez. Si un facteur de gauche est moins important que celui correspondant sur la droite, placez votre marque à droite de l'importance «Égale en gris» sous le niveau d'importance que vous préférez. La Table B.1 présente les résultats du questionnaire.

| 15  | 14  | 13  | 12           | 11           | 10           | 9   | ∞   | 7   | 6     | 5   | 4  | 3   | 2     | _   | $^{\circ}$ | global | l'objectif | pecta      | En                        |  |
|-----|-----|-----|--------------|--------------|--------------|-----|-----|-----|-------|-----|----|-----|-------|-----|------------|--------|------------|------------|---------------------------|--|
| ΙA  | COP | COP | <b>DAMHS</b> | <b>DAMHS</b> | <b>DAMHS</b> | TMS | TMS | TMS | TMS   | HE  | HE | HE  | HE    | HE  | Facteur    | al     | ectif      | pectant de | res-                      |  |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | 9          |        |            |            | Absolument plus important |  |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | ∞          |        |            |            |                           |  |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     | ×     |     |    |     |       |     | 7          |        |            |            | beaucoup plus important   |  |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | 6          |        |            |            |                           |  |
|     |     |     |              |              |              |     |     | ×   |       |     |    |     | ×     |     | 5          |        |            |            | plus important            |  |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | 4          |        |            |            |                           | CICCII   |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     |       |     |    | ×   |       |     | သ          |        |            |            | un peu plus important     | 700  |
|     |     |     |              |              |              |     | ×   |     |       |     |    |     |       |     | 2          |        |            |            |                           | TO TO TO   |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | _          |        |            |            | Importance égale          | 100)   |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     |       |     | ×  |     |       |     | 2          |        |            |            |                           | and original original original original original original and solutions. |
|     |     |     |              |              | ×            | ×   |     |     |       |     |    |     |       | ×   | သ          |        |            |            | un peu plus important     | J. 6. 10.  |
| ×   |     | ×   |              |              |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | 4          |        |            |            |                           | J. T. T.   |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     |       | ×   |    |     |       |     | 5          |        |            |            | plus important            | OT 0. 01   |
|     |     |     |              | ×            |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | 6          |        |            |            |                           |  |
|     | ×   |     |              |              |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | 7          |        |            |            | beaucoup plus important   |  |
|     |     |     |              |              |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | ∞          |        |            |            |                           |  |
|     |     |     | ×            |              |              |     |     |     |       |     |    |     |       |     | 9          |        |            |            | Absolument plus important |  |
| EMV | EMV | IA  | EMV          | IA           | COP          | EMV | IA  | COP | DAMHS | EMV | IA | COP | DAMHS | TMS | Aspect     |        |            |            |                           |  |

Table B.1 – Tableau d'importance entre les critères.

### **B.2** Matrices de comparaison

### B.2.1 Détermination de l'atelier pilote

Les matrices de comparaison : Matrice 2 (EMV)(Table B.2), Matrice 3 (TMS) (Table B.3), Matrice 4 (HE) (Table B.4), Matrice 5 (DAMHS) (Table B.5) et Matrice 6 (COP) (Table B.6) sont les suivantes :

Table B.2 – Matrice 2

| EMV       | a1  | a2  | a3  | a4 | a5  | a6  | a7  | a8  | a9  | a10 |
|-----------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| a1        | 1   | 1/7 | 1/5 | 2  | 1/4 | 1/2 | 1/2 | 1/8 | 1/3 | 1/7 |
| <b>a2</b> | 7   | 1   | 3   | 8  | 4   | 6   | 6   | 1/2 | 5   | 1   |
| a3        | 5   | 1/3 | 1   | 6  | 2   | 4   | 4   | 1/4 | 3   | 1/3 |
| a4        | 1/2 | 1/8 | 1/6 | 1  | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/9 | 1/4 | 1/8 |
| a5        | 4   | 1/4 | 1/2 | 5  | 1   | 3   | 3   | 1/5 | 2   | 1/4 |
| <b>a6</b> | 2   | 1/6 | 1/4 | 3  | 1/3 | 1   | 1   | 1/7 | 1/2 | 1/6 |
| a7        | 2   | 1/6 | 1/4 | 3  | 1/3 | 1   | 1   | 1/7 | 1/2 | 1/6 |
| a8        | 8   | 2   | 4   | 9  | 5   | 7   | 7   | 1   | 6   | 2   |
| a9        | 3   | 1/5 | 1/3 | 4  | 1/2 | 2   | 2   | 1/6 | 1   | 1/5 |
| a10       | 7   | 1   | 3   | 8  | 4   | 6   | 6   | 1/2 | 5   | 1   |

Table B.3 – Matrice 3

| TMS        | a1  | a2  | a3  | a4  | a5 | a6  | a7  | a8  | a9  | a10 |
|------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| a1         | 1   | 2   | 3   | 3   | 7  | 4   | 4   | 5   | 1/2 | 6   |
| <b>a2</b>  | 1/2 | 1   | 2   | 4   | 6  | 3   | 3   | 4   | 1/3 | 5   |
| <b>a3</b>  | 1/3 | 1/2 | 1   | 1/5 | 5  | 2   | 2   | 3   | 1/4 | 4   |
| <b>a4</b>  | 1/3 | 1/4 | 5   | 1   | 9  | 6   | 6   | 7   | 2   | 8   |
| a5         | 1/7 | 1/6 | 1/5 | 1/9 | 1  | 1/4 | 1/4 | 1/3 | 1/8 | 1/2 |
| <b>a6</b>  | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1/6 | 4  | 1   | 1   | 2   | 1/5 | 3   |
| <b>a</b> 7 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1/6 | 4  | 1   | 1   | 2   | 1/5 | 3   |
| a8         | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1/7 | 3  | 1/2 | 1/2 | 1   | 1/6 | 3   |
| a9         | 2   | 3   | 4   | 1/2 | 8  | 5   | 5   | 6   | 1   | 7   |
| a10        | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/8 | 2  | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/7 | 1   |

Table B.4 – Matrice 4

| HE        | a1 | a2  | a3  | a4  | a5  | a6  | a7  | a8  | a9  | a10 |
|-----------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| a1        | 1  | 1/9 | 1/6 | 1/8 | 1/8 | 1/3 | 1/3 | 1/6 | 1/9 | 1/5 |
| <b>a2</b> | 9  | 1   | 4   | 2   | 2   | 7   | 7   | 4   | 1   | 5   |
| <b>a3</b> | 6  | 1/4 | 1   | 1/3 | 1/3 | 4   | 4   | 1   | 1/4 | 2   |
| a4        | 8  | 1/2 | 3   | 1   | 1   | 6   | 6   | 3   | 1/2 | 4   |
| a5        | 8  | 1/2 | 3   | 1   | 1   | 6   | 6   | 3   | 1/2 | 4   |
| <b>a6</b> | 3  | 1/7 | 1/4 | 1/6 | 1/6 | 1   | 1   | 1/4 | 1/7 | 1/3 |
| a7        | 3  | 1/7 | 1/4 | 1/6 | 1/6 | 1   | 1   | 1/4 | 1/7 | 1/3 |
| <b>a8</b> | 6  | 1/4 | 1   | 1/3 | 1/3 | 4   | 4   | 1   | 1/4 | 2   |
| a9        | 9  | 1   | 4   | 2   | 2   | 7   | 7   | 4   | 1   | 5   |
| a10       | 5  | 1/5 | 1/2 | 1/4 | 1/4 | 3   | 3   | 1/2 | 1/5 | 1   |

Table B.5 – Matrice 5

| <b>DAMHS</b> | a1  | a2  | a3  | a4  | a5 | <b>a6</b> | a7  | a8  | a9 | a10 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|----|-----------|-----|-----|----|-----|
| a1           | 1   | 4   | 1   | 4   | 7  | 1         | 1   | 1   | 7  | 7   |
| <b>a2</b>    | 1/4 | 1   | 1/4 | 1   | 4  | 1/4       | 1/4 | 1/4 | 4  | 4   |
| a3           | 1   | 4   | 1   | 4   | 7  | 1         | 1   | 1   | 7  | 7   |
| <b>a4</b>    | 1/4 | 1   | 1/4 | 1   | 4  | 1/4       | 1/4 | 1/4 | 4  | 4   |
| a5           | 1/7 | 1/4 | 1/7 | 1/4 | 1  | 1/7       | 1/7 | 1/7 | 1  | 1   |
| <b>a6</b>    | 1   | 4   | 1   | 4   | 7  | 1         | 1   | 1   | 7  | 7   |
| a7           | 1   | 4   | 1   | 4   | 7  | 1         | 1   | 1   | 7  | 7   |
| a8           | 1   | 4   | 1   | 4   | 7  | 1         | 1   | 1   | 7  | 7   |
| a9           | 1/7 | 1/4 | 1/7 | 1/4 | 1  | 1/7       | 1/7 | 1/7 | 1  | 1   |
| a10          | 1/7 | 1/4 | 1/7 | 1/4 | 1  | 1/7       | 1/7 | 1/7 | 1  | 1   |

Table B.6 – Matrice 6

| COP       | a1 | <b>a2</b> | a3 | a4  | a5  | <b>a6</b> | a7 | a8  | a9 | a10 |
|-----------|----|-----------|----|-----|-----|-----------|----|-----|----|-----|
| a1        | 1  | 1/4       | 1  | 1/2 | 1/8 | 1         | 1  | 1/2 | 1  | 1   |
| <b>a2</b> | 4  | 1         | 4  | 3   | 1/4 | 4         | 4  | 3   | 4  | 4   |
| a3        | 1  | 1/4       | 1  | 1/2 | 1/8 | 1         | 1  | 1/2 | 1  | 1   |
| a4        | 2  | 1/3       | 2  | 1   | 1/7 | 2         | 2  | 1   | 2  | 2   |
| a5        | 8  | 4         | 8  | 7   | 1   | 8         | 8  | 7   | 8  | 8   |
| <b>a6</b> | 1  | 1/4       | 1  | 1/2 | 1/8 | 1         | 1  | 1/2 | 1  | 1   |
| a7        | 1  | 1/4       | 1  | 1/2 | 1/8 | 1         | 1  | 1/2 | 1  | 1   |
| a8        | 2  | 1/3       | 2  | 1   | 1/7 | 2         | 2  | 1   | 2  | 2   |
| a9        | 1  | 1/4       | 1  | 1/2 | 1/8 | 1         | 1  | 1/2 | 1  | 1   |
| a10       | 1  | 1/4       | 1  | 1/2 | 1/8 | 1         | 1  | 1/2 | 1  | 1   |

## B.2.2 Détermination du deuxième atelier de production

La Table B.7 présente la matrice de comparaison pour le critère IA utilisé pour déterminer le prochain atelier (2éme atelier) dans l'ordre de déploiement.

**Table B.7** – *Matrice* 7

| IA        | a1  | a3  | a4  | a5  | <b>a6</b> | a7 | a8 | a9  | a10 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----------|----|----|-----|-----|
| a1        | 1   | 1/5 | 1/5 | 3   | 5         | 5  | 5  | 1   | 5   |
| <b>a3</b> | 5   | 1   | 1   | 7   | 9         | 9  | 9  | 5   | 9   |
| <b>a4</b> | 5   | 1   | 1   | 7   | 9         | 9  | 9  | 5   | 9   |
| a5        | 1/3 | 1/7 | 1/7 | 1   | 3         | 3  | 3  | 1/3 | 3   |
| <b>a6</b> | 1/5 | 1/9 | 1/9 | 1/3 | 1         | 1  | 1  | 1/5 | 1   |
| a7        | 1/5 | 1/9 | 1/9 | 1/3 | 1         | 1  | 1  | 1/5 | 1   |
| <b>a8</b> | 1/5 | 1/9 | 1/9 | 1/3 | 1         | 1  | 1  | 1/5 | 1   |
| a9        | 1   | 1/5 | 1/5 | 3   | 5         | 5  | 5  | 1   | 5   |
| a10       | 1/5 | 1/9 | 1/9 | 1/3 | 1         | 1  | 1  | 1/5 | 1   |

# Annexe C

# Instances générées

### C.1 Instances: cas de base

Les instances générées pour le cas de base sont présentées dans les tables suivants :

**Instance 1:** Table C.1

**Instance 2:** Table C.2

**Instance 3:** Table C.3

**Instance 4:** Table C.4

Table C.1 – Instance 1

|                           | Équi | pemer | ıt de p | roduct | tion (E | (apt)et S | tockeur (Stck) |
|---------------------------|------|-------|---------|--------|---------|-----------|----------------|
| Caractéristique           | Eq   | pt 1  |         | Eqpt 2 | 2       |           | Stck 1         |
| Tâche de production (T)   | T11  | T12   | T21     | T22    | T23     | S11       | S12            |
| Temps de traitement (p)   | 10   | 11    | 10      | 12     | 13      | 1         | 1              |
| Date de fin souhaitée (d) | 17   | 29    | 18      | 32     | 44      | 1000      | 1000           |
| Réticule utilisé (R)      | R1   | R2    | R2      | R1     | R2      | R1        | R2             |

Table C.2 – Instance 2

|                           |     | É      | quipen | nent d | e prod | uction | (Eqpt | et Sto | ckeur    | (Stck) |        |
|---------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|----------|--------|--------|
| Caractéristique           |     | Eqpt 1 | ,      |        | Eqpt 2 |        | Eq    | pt 3   | Stc      | k 1    | Stck 2 |
| Tâche de production (T)   | T11 | T12    | T13    | T21    | T22    | T23    | T31   | T32    | S11      | S12    | S21    |
| Temps de traitement (p)   | 10  | 11     | 10     | 13     | 11     | 12     | 12    | 10     | <u> </u> | _      | _      |
| Date de fin souhaitée (d) | 14  | 26     | 36     | 17     | 33     | 46     | 16    | 26     | 1000     | 1000   | 1000   |
| Réticule utilisé          | R1  | R2     | R1     | R2     | R3     | R2     | R3    | R1     | R1       | R2     | R3     |

Table C.3 – Instance 3

|                           |     |        | Equip | ement | de pr  | oducti | on (Ec | <b>Equipement de production (Eqpt)et Stockeur (St</b> | Stocke |      | Š      |      |
|---------------------------|-----|--------|-------|-------|--------|--------|--------|---|--------|------|--------|------|
| Caractéristique           |     | Eqpt 1 | ,     |       | Eqpt 2 |        |        | Eqpt 3  |        |      | Stck 1 |      |
| Tâche de production (T)   | T11 | T12    | T13   | T21   | T22    | T23    | T31    | T32   | T33    | S11  | S12    | S13  |
| Temps de traitement (p)   | 11  | 11     | 10    | 12    | 13     | 12     | 11     | 12  | 13     | 1    | _      | _    |
| Date de fin souhaitée (d) | 16  | 29     | 45    | 17    | 35     | 47     | 19     | 32  | 50     | 1000 | 1000   | 1000 |
| Réticule utilisé          | R1  | R2     | R1    | R2    | R3     | R2     | R3     | R1  | R3     | R1   | R2 R3  | R3   |

Table C.4 – Instance 3

|                           |     |        |       | Équip | emen   | t de pr | oducti | ion (E  | <b>Équipement de production (Eqpt)et Stock</b> | Stocke | eur (Stck | <b>k</b> ) |        |      |
|---------------------------|-----|--------|-------|-------|--------|---------|--------|---------|--|--------|-----------|------------|--------|------|
| Caractéristique           |     | Eqpt 1 |       |       | Eqpt 2 |         | Eq     | pt3     | Iba  | ot 4   | Stck      | k 1        | Stck : | k 2  |
| Tâche de production (T)   | T11 | T12    | 2 T13 | T21   | T22    | T23     | T31    | T31 T32 | T41 T42  | T42    | S11       | S12        | S21    | S22  |
| Temps de traitement (p)   | 10  | 10     | 11    | 12    | 11     | 13      | 10     | 1       | 12   | 11     |           | _          | 1      | _    |
| Date de fin souhaitée (d) | 14  | 26     | 36    | 17    | 33     | 46      | 16     | 26      | 18   | 33     | 1000      | 1000       |        | 1000 |
| Réticule utilisé          | R1  | R2     | R1    | R2    | R1     | R2      | R3     | R4      | R4   | R3     | R1        | R2         | R3     | R4   |
|                           |     |        |       |       |        |         |        |         |  |        |           |            |        |      |

## C.2 Instance: cas du "Mix B"

Les instances générées pour le cas du "Mix B" sont présentées dans les tables suivants :

**Instance 1:** Table C.5

**Instance 2:** Table C.6

**Instance 3:** Table C.7

**Instance 4:** Table C.8

Table C.5 – Instance 1

|                           | Équi | pemer | t de p | roduct | tion (E | apt)et S | tockeur (Stck) |
|---------------------------|------|-------|--------|--------|---------|----------|----------------|
| Caractéristique           | Eq   | pt 1  |        | Eqpt 2 | 2       |          | Stck 1         |
| Tâche de production (T)   | T11  | T12   | T21    | T22    | T23     | S11      | S12            |
| Temps de traitement (p)   | 10   | 11    | 10     | 12     | 13      | 1        | 1              |
| Date de fin souhaitée (d) | 17   | 29    | 18     | 32     | 44      | 1000     | 1000           |
| Réticule utilisé (R)      | R1   | R1    | R2     | R2     | R1      | R1       | R2             |

Table C.6 – Instance 2

|                           |     | Éc     | uipen | nent d | e prod | uction | (Eqpt | et Sto | ckeur | (Stck) |        |
|---------------------------|-----|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
| Caractéristique           |     | Eqpt 1 |       |        | Eqpt 2 | 2      | Eq    | pt 3   | Stc   | k 1    | Stck 2 |
| Tâche de production (T)   | T11 | T12    | T13   | T21    | T22    | T23    | T31   | T32    | S11   | S12    | S21    |
| Temps de traitement (p)   | 10  | 11     | 10    | 13     | 11     | 12     | 12    | 10     | 1     | _      | 1      |
| Date de fin souhaitée (d) | 14  | 26     | 36    | 17     | 33     | 46     | 16    | 26     | 1000  | 1000   | 1000   |
| Réticule utilisé          | R1  | R1     | R2    | R2     | R2     | R3     | R3    | R3     | R1    | R2     | R3     |

Table C.7 – Instance 3

|                           |     |        | Équip | ement   | de pro | oducti | on (Ec | lpt)et § | Stocke | quipement de production (Eqpt)et Stockeur (Stck) | <b>k</b> ) |        |
|---------------------------|-----|--------|-------|---------|--------|--------|--------|----------|--------|--|------------|--------|
| Caractéristique           |     | Eqpt 1 |       |         | Eqpt 2 |        |        | Eqpt 3   |        |  | Stck 1     | Stck 1 |
| Tâche de production (T)   | T11 | T12    | T13   | T21 T22 |        | T23    | T31    | T31 T32  | T33    | S11  | S12        | S13    |
| Temps de traitement (p)   | 11  | 11     | 10    | 12      | 13     | 12     | 11     | 12       | 13     | 1  | _          | _      |
| Date de fin souhaitée (d) | 16  | 29     | 45    | 17      | 35     | 47     | 19     | 32       | 50     | 1000   | 1000       | 1000   |
| Réticule utilisé          | R1  | R1     | R2    | R2      | R2     | R3     | R3     | R3       | R1     | R1   | R2         | R3     |
|                           |     |        |       |         |        |        |        |          |        |  |            |        |

Table C.8 – Instance  $\beta$ 

|                           |     |        |     | Équip   | emen   | t de pr | oducti  | ion (E | Équipement de production (Eqpt)et Stock | Stocke | keur (Stch | <b>K</b> ) |         |      |
|---------------------------|-----|--------|-----|---------|--------|---------|---------|--------|---|--------|------------|------------|---------|------|
| Caractéristique           |     | Eqpt 1 |     |         | Eqpt 2 |         | Eqpt3   | pt3    | Eq                                      | pt 4   | Stck       | k 1        | Stc     | k 2  |
| Tâche de production (T)   | T11 | T12    | T13 | T21 T22 |        | T23     | T31 T32 |        | T41                                     | T42    | S11 S12    | S12        | S21 S22 | S22  |
| Temps de traitement (p)   | 10  | 10     | 11  | 12      | 11     | 13      | 10      | 11     | 12                                      | 11     | 1          | _          | 1       | _    |
| Date de fin souhaitée (d) | 14  | 26     | 36  | 17      | 33     | 46      | 16      | 26     | 18                                      | 33     | 1000       | 1000       | 1000    | 1000 |
| Réticule utilisé          | R1  | R1     | R2  | R2      | R2     | R1      | R3      | R3     | R4                                      | R4     | R1         | R2         | R3      | R4   |
|                           |     |        |     |         |        |         |         |        |   |        |            |            |         |      |

# **Bibliographie**

- [1] Lazim Abdullah and Norsyahida Zulkifli. Integration of fuzzy ahp and interval type-2 fuzzy dematel: An application to human resource management. *Expert Systems with Applications*, 42(9):4397–4409, 2015.
- [2] Gaurav K Agrawal and Sunderesh S Heragu. A survey of automated material handling systems in 300-mm semiconductorfabs. *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, 19(1):112–120, 2006.
- [3] Elif Akcalt, Kazunori Nemoto, and Reha Uzsoy. Cycle-time improvements for photolithography process in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semi-conductor Manufacturing*, 14(1):48–56, 2001.
- [4] Kamal M Al-Subhi Al-Harbi. Application of the ahp in project management. *International journal of project management*, 19(1):19–27, 2001.
- [5] Homa Amirian and Rashed Sahraeian. Augmented  $\varepsilon$ -constraint method in multiobjective flowshop problem with past sequence set-up times and a modified learning effect. *International Journal of Production Research*, 53(19):5962–5976, 2015.
- [6] Zoran Babic and Neli Plazibat. Ranking of enterprises based on multicriterial analysis. *International journal of production economics*, 56:29–35, 1998.
- [7] N. Bahri, J. Reiss, and B. Doherty. A comparison of unified vs. segregated automated material handling systems for 300 mm fabs. In 2001 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing. ISSM 2001. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37203), pages 3–6, 2001.
- [8] Benita M Beamon and Victoria CP Chen. Performability-based fleet sizing in a material handling system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(6):441–449, 1998.
- [9] Abdoul Bitar, Stéphane Dauzère-Pérès, Claude Yugma, and Renaud Roussel. A memetic algorithm to solve an unrelated parallel machine scheduling problem with auxiliary resources in semiconductor manufacturing. *Journal of Scheduling*, 19(4):367–376, 2016.
- [10] Andrei Borshchev. The big book of simulation modeling: multimethod modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America, 2013.

[11] Dae-Ho Byun. The ahp approach for selecting an automobile purchase model. *Information & Management*, 38(5):289–297, 2001.

- [12] E. Cardarelli and P. M. Pelagagge. Simulation tool for design and management optimization of automated interbay material handling and storage systems for large wafer fab. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 8(1):44–49, Feb 1995.
- [13] W. Carriker. Intel 300 mm fab layout and material handling automation integration learning. In 2004 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, pages 257–261, May 2004.
- [14] Ahmed Ben Chaabane, Stéphane Dauzère-Pérès, Claude Yugma, Lionel Rulliere, and Gilles Lamiable. Analyzing the impact of key parameters of vehicle management policies in a unified amhs. In *Proceedings of the 2013 IEEE Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World*, pages 3818–3828, 2013.
- [15] K-H Chang, A-L Chang, and C-Y Kuo. A simulation-based framework for multiobjective vehicle fleet sizing of automated material handling systems: an empirical study. *Journal of Simulation*, 8(4):271–280, Nov 2014.
- [16] Kuo-Hao Chang, Yu-Hsuan Huang, and Shih-Pang Yang. Vehicle fleet sizing for automated material handling systems to minimize cost subject to time constraints. *IIE Transactions*, 46(3):301–312, 2014.
- [17] SC Chen, CC Yang, WT Lin, TM Yeh, and YS Lin. Construction of key model for knowledge management system using ahp-qfd for semiconductor industry in taiwan. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 18(5):576–597, 2007.
- [18] Jao-Hong Cheng, Chih-Ming Lee, and Chih-Huei Tang. An application of fuzzy delphi and fuzzy ahp on evaluating wafer supplier in semiconductor industry. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 6(5):756–767, 2009.
- [19] S Chick, PJ Sánchez, D Ferrin, and DJ Morrice. An approach to robust layout planning of amhs.
- [20] F. Fred Choobineh, Ardavan Asef-Vaziri, and Xiaolei Huang. Fleet sizing of automated guided vehicles: a linear programming approach based on closed queuing networks. *International Journal of Production Research*, 50(12):3222–3235, 2012.
- [21] Shu-Hsing Chung, Amy HI Lee, and WL Pearn. Product mix optimization for semi-conductor manufacturing based on ahp and anp analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(11-12):1144–1156, 2005.
- [22] Stéphane Dauzere-Péres, Claude Yugma, Ahmed Ben Chaabane, Lionel Rulliere, and Gilles Lamiable. A study on storage allocation in an automated semiconductor manufacturing facility. In *Proceedings of the 12th International Material Handling Research Colloquium*, pages 682–692, June 2012.

[23] Pius J Egbelu. The use of non-simulation approaches in estimating vehicle requirements in an automated guided vehicle based transport system. *Material flow*, 4(1):17–32, 1987.

- [24] Pius J Egbelu and Jose MA Tanchoco. Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules. *International Journal of Production Research*, 22(3):359–374, 1984.
- [25] Ike C Ehie and Colin O Benjamin. An integrated multiobjective planning model: A case study of the zambian copper mining industry. *European Journal of Operational Research*, 68(2):160–172, 1993.
- [26] Christian Fischmann, F Bttinger, Roland Wertz, and Christian Kunz. Buffer management for automated material handling systems in semiconductor industries. In *Proceedings 22nd European Conference on Modeling and Simulation (ECMS 2008)*, pages 423–427, 2008.
- [27] Guisseppi A Forgionne and Rajiv Kohli. A multiple criteria assessment of decision technology system journal quality. *Information & Management*, 38(7):421–435, 2001.
- [28] Michel Freyssenet. Processus et formes sociale d'automatisation : le paradisme sociologique. *Sociologie du travail*, 4 :469–496, 1992.
- [29] Tharma Ganesharajah, Nicholas G Hall, and Chelliah Sriskandarajah. Design and operational issues in agy-served manufacturing systems. *Annals of Operations Research*, 76:109–154, 1998.
- [30] Na Geng and Zhibin Jiang. A review on strategic capacity planning for the semiconductor manufacturing industry. *International journal of production research*, 47(13):3639–3655, 2009.
- [31] Adel Guitouni. L'ingenierie du choix d'une procedure d'agregation multicritere. Universite Laval, 2001.
- [32] Richard L Guldi, Douglas E Paradis, Martin T Whitfield, Frank D Poag, and David P Jensen. Strategy and metrics for wafer handling automation in legacy semiconductor fab. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 12(1):102–108, 1999.
- [33] Abdelkader Hammami. *Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau*. Theses, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Laval, September 2003.
- [34] C. Han, K. Pare, M. Tokumoto, and A. Aoki. High throughput amhs design with dual unified oht system. In 2006 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing, pages 185–188, Sept 2006.

[35] H. Heinrich, G. Schneider, F. Heinlein, S. Keil, A. Deutschlander, and R. Lasch. Pursuing the increase of factory automation in 200mm frontend manufacturing to manage the changes imposed by the transitionfrom high-volume low-mix to high-mix low-volume production. In 2008 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pages 148–155, May 2008.

- [36] Frederick S Hillier. *Introduction to operations research*. Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- [37] Chiung-Hsi Hsieh, Chiwoon Cho, Taho Yang, and Ting-Jiun Chang. Simulation study for a proposed segmented automated material handling system design for 300-mm semiconductor fabs. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 29:18–31, 2012.
- [38] C. W. Huang and C. L. Borst. Estimation of number of pgv for a 450mm fab: Fa: Factory automation. In 2016 27th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), pages 164–167, May 2016.
- [39] Chao-Jung Huang, Kuo-Hao Chang, and James T Lin. Optimal vehicle allocation for an automated materials handling system using simulation optimisation. *International Journal of Production Research*, 50(20):5734–5746, 2012.
- [40] Matloub Hussain, Mohsin Malik, and Hamda S Al Neyadi. Ahp framework to assist lean deployment in abu dhabi public healthcare delivery system. *Business Process Management Journal*, 22(3):546–565, 2016.
- [41] Young Jae Jang, Gi Han Choi, and Sun Il Kim. Modeling and analysis of stocker system in semiconductor and lcd fab. In *ISSM 2005*, *IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, 2005., pages 273–276, Sept 2005.
- [42] Jesus Jimenez, Bosun Kim, John Fowler, Gerald Mackulak, You In Choung, and Dong-Jin Kim. Material handling: Operational modeling and simulation of an interbay amhs in semiconductor wafer fabrication. In *Proceedings of the 34th Conference on Winter Simulation: Exploring New Frontiers*, WSC '02, pages 1377–1382. Winter Simulation Conference, 2002.
- [43] Nadine Kafa, Yasmina Hani, and Abederrahman El Mhamedi. Evaluating and selecting partners in sustainable supply chain network: a comparative analysis of combined fuzzy multi-criteria approaches. *OPSEARCH*, pages 1–36.
- [44] Cengiz Kahraman. Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments, volume 16. Springer Science & Business Media, 2008.
- [45] He-Yau Kang and Amy HI Lee. Priority mix planning for semiconductor fabrication by fuzzy ahp ranking. *Expert Systems with Applications*, 32(2):560–570, 2007.

[46] Jean-Etienne Kiba, Gilles Lamiable, Stéphane Dauzère-Pérès, and Claude Yugma. Simulation of a full 300mm semiconductor manufacturing plant with material handling constraints. In *Winter Simulation Conference*, pages 1601–1609. Winter Simulation Conference, 2009.

- [47] Téwendé Jean-Etienne Arthur Kiba. *Simulation et optimisation du transport automatise dans la fabrication de semi-conducteurs*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2010.
- [48] Byung-In Kim, Jaejoon Shin, Sangwon Jeong, and Jeongin Koo. Effective overhead hoist transport dispatching based on the hungarian algorithm for a large semiconductor fab. *International Journal of Production Research*, 47(10):2823–2834, 2009.
- [49] Junghoon Kim, Gwangjae Yu, and Young Jae Jang. Semiconductor fab layout design analysis with 300-mm fab data: "is minimum distance-based layout design best for semiconductor fab design?". *Computers & Industrial Engineering*, 99:330–346, 2016.
- [50] John E Kobza, Yu-ChenG Shen, and Roderick J Reasor. A stochastic model of empty-vehicle travel time and load request service time in light-traffic material handling systems. *IIE transactions*, 30(2):133–142, 1998.
- [51] Gulser Koksal and Alpay Eugitman. Planning and design of industrial engineering education quality. *Computers & industrial engineering*, 35(3-4):639–642, 1998.
- [52] PR Kumar. Scheduling semiconductor manufacturing plants. *IEEE Control Systems*, 14(6):33–40, 1994.
- [53] R. Kurosaki, N. Nagao, H. Komada, Y. Watanabe, and H. Yano. Amhs for 300 mm wafer. In 1997 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing Conference Proceedings (Cat. No.97CH36023), pages D13–D16, Oct 1997.
- [54] Chun-Kit Kwong and Hao Bai. A fuzzy ahp approach to the determination of importance weights of customer requirements in quality function deployment. *Journal of intelligent manufacturing*, 13(5):367–377, 2002.
- [55] Tuan Le-Anh and MBM De Koster. A review of design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research*, 171(1):1–23, 2006.
- [56] Amy H.I. Lee, He-Yau Kang, and Wen-Pai Wang. Analysis of priority mix planning for the fabrication of semiconductors under uncertainty. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(3):351–361, Mar 2006.
- [57] CW Lee and NK Kwak. Information resource planning for a health-care system using an ahp-based goal programming method. *Journal of the operational research society*, 50(12):1191–1198, 1999.

[58] Shu Li, Tom Tang, and Donald W Collins. Minimum inventory variability schedule with applications in semiconductor fabrication. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 9(1):145–149, 1996.

- [59] Da-Yin Liao and Hsien-Sheng Fu. Speedy delivery-dynamic oht allocation and dispatching in large-scale, 300-mm amhs management. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 11(3):22–32, 2004.
- [60] J. T. Lin, F. K. Wang, and C. J. Yang. The performance of the number of vehicles in a dynamic connecting transport amhs. *International Journal of Production Research*, 43(11):2263–2276, 2005.
- [61] James T Lin and Chao-Jung Huang. A simulation-based optimization approach for a semiconductor photobay with automated material handling system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46:76–100, 2014.
- [62] James T Lin, Fu-Kwun Wang, and Ping-Yung Yen. Simulation analysis of dispatching rules for an automated interbay material handling system in wafer fab. *International Journal of Production Research*, 39(6):1221–1238, 2001.
- [63] John DC Little. A proof for the queuing formula: L 1/4 lw. *Operations Research*, 9(3):383–387, 1961.
- [64] Baoding Liu and Xiaowei Chen. Uncertain multiobjective programming and uncertain goal programming. *Journal of Uncertainty Analysis and Applications*, 3(1):10, 2015.
- [65] Steve CH Lu, Deepa Ramaswamy, and PR Kumar. Efficient scheduling policies to reduce mean and variance of cycle-time in semiconductor manufacturing plants. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 7(3):374–388, 1994.
- [66] C. A. Mack. Fifty years of moore's law. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 24(2):202–207, May 2011.
- [67] G. T. Mackulak and P. Savory. A simulation-based experiment for comparing amhs performance in a semiconductor fabrication facility. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 14(3):273–280, Aug 2001.
- [68] Abbas Mardani, Ahmad Jusoh, Khalil MD Nor, Zainab Khalifah, Norhayati Zakwan, and Alireza Valipour. Multiple criteria decision-making techniques and their applications—a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1):516–571, 2015.
- [69] D. P. Martin. Total operational efficiency (toe): the determination of two capacity and cycle time components and their relationship to productivity improvements in a semiconductor manufacturing line. In 10th Annual IEEE/SEMI. Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop. ASMC 99 Proceedings (Cat. No.99CH36295), pages 37–41, 1999.

[70] William L Maxwell and Jack A Muckstadt. Design of automatic guided vehicle systems. *IIE Transactions*, 14(2):114–124, 1982.

- [71] David Miller, Clayton Menser, and Brad Gustafson. Improving material logistics via automation in an existing semiconductor fab. In *Advanced Semiconductor Manufacturing*, 2004. ASMC'04. IEEE Conference and Workshop, pages 252–256. IEEE, 2004.
- [72] George A Miller. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2):81, 1956.
- [73] Leanna Miller, Alger Bradley, Ashley Tish, Tongdan Jin, Jesus A Jimenez, and Robert Wright. Simulating conveyor-based amhs layout configurations in small wafer lot manufacturing environments. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pages 1944–1952. Winter Simulation Conference, 2011.
- [74] Ido Millet and William C Wedley. Modelling risk and uncertainty with the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 11(2):97–107, 2002.
- [75] Lars Mönch, John W Fowler, Stéphane Dauzère-Pérès, Scott J Mason, and Oliver Rose. A survey of problems, solution techniques, and future challenges in scheduling semiconductor manufacturing operations. *Journal of scheduling*, 14(6):583–599, 2011.
- [76] Lars Mönch, John W Fowler, and Scott J Mason. *Production planning and control for semiconductor wafer fabrication facilities: modeling, analysis, and systems*, volume 52. Springer Science & Business Media, 2012.
- [77] Jairo Rafael Montoya Torres. *Transport automatisé dans les systèmes de fabrication de semi-conducteurs : nouvelles approches de gestion tactique et opérationnelle*. PhD thesis, Saint-Etienne, EMSE, 2005.
- [78] JR Montoya-Torres. A literature survey on the design approaches and operational issues of automated wafer-transport systems for wafer fabs. *Production Planning & Control*, 17(7):648–663, 2006.
- [79] Razieh Mosadeghi, Jan Warnken, Rodger Tomlinson, and Hamid Mirfenderesk. Comparison of fuzzy-ahp and ahp in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49:54–65, 2015.
- [80] Anne M. Murray and David J. Miller. Automated material handling systems: Automated reticle handling: A comparison of distributed and centralized reticle storage and transport. In *Proceedings of the 35th Conference on Winter Simulation: Driving Innovation*, WSC '03, pages 1360–1365. Winter Simulation Conference, 2003.

[81] Shari Murray, Gerald T. Mackulak, John W. Fowler, and Theron Colvin. A simulation-based cost modeling methodology for evaluation of interbay material handling in a semiconductor wafer fab. In *Proceedings of the 32Nd Conference on Winter Simulation*, WSC '00, pages 1510–1517, San Diego, CA, USA, 2000. Society for Computer Simulation International.

- [82] Gajanana Nadoli and Devadas Pillai. Simulation in automated material handling systems design for semiconductor manufacturing. In *Proceedings of the 26th Conference on Winter Simulation*, WSC '94, pages 892–899, San Diego, CA, USA, 1994. Society for Computer Simulation International.
- [83] Dima Nazzal and Leon F McGinnis. Analytical approach to estimating amhs performance in 300 mm fabs. *International journal of production research*, 45(3):571–590, 2007.
- [84] Moulaye Aidara Ndiaye, Stéphane Dauzère-Pérès, Claude Yugma, Lionel Rullière, and Gilles Lamiable. Automated transportation of auxiliary resources in a semiconductor manufacturing facility. In *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, WSC '16, pages 2587–2597, Piscataway, NJ, USA, 2016. IEEE Press.
- [85] Ashkan Negahban and Jeffrey S Smith. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2):241–261, 2014.
- [86] Sachin K. Patil and Ravi Kant. A fuzzy ahp-topsis framework for ranking the solutions of knowledge management adoption in supply chain to overcome its barriers. *Expert Systems with Applications*, 41(2):679 693, 2014.
- [87] Brett A Peters and Taho Yang. Integrated facility layout and material handling system design in semiconductor fabrication facilities. *IEEE Transactions on Semiconductor manufacturing*, 10(3):360–369, 1997.
- [88] Neal G. Pierce and Richard Stafford. Modeling and simulation of material handling for semiconductor wafer fabrication. In *Proceedings of the 26th Conference on Winter Simulation*, WSC '94, pages 900–906, San Diego, CA, USA, 1994. Society for Computer Simulation International.
- [89] D. Pillai. Material handling automation for wafer fabrication facilities. In Ninth IEEE/CHMT International Symposium on Electronic Manufacturing Technology, Competitive Manufacturing for the Next Decade, pages 277–286, Oct 1990.
- [90] D. Pillai, T. Quinn, K. Kryder, and D. Charlson. Integration of 300 mm fab layouts and material handling automation. In 1999 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing Conference Proceedings (Cat No.99CH36314), pages 23–26, 1999.

[91] Chandra Prakash and MK Barua. Integration of ahp-topsis method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment. *Journal of Manufacturing Systems*, 37:599–615, 2015.

- [92] S Rajotia, K Shanker, and JL Batra. Determination of optimal agv fleet size for an fms. *International Journal of Production Research*, 36(5):1177–1198, 1998.
- [93] Jennifer Robinson, John Fowler, and Eileen Neacy. Capacity loss factors in semiconductor manufacturing. *Working paper*, 2003.
- [94] Carlos Romero. Handbook of critical issues in goal programming. Elsevier, 2014.
- [95] Bernard Roy. Méthodologie multicritère d' aide à la décision. Economica, 1985.
- [96] K. Rust, N. Patel, and Peng Qu. Modeling practical methods of material storage in a 300 mm fab. In *ISSM 2005*, *IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, 2005., pages 25–28, Sept 2005.
- [97] Thomas L Saaty. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1):9–26, 1990.
- [98] R Sadeghi, S Dauzere-Pérès, and C Yugma. A multi-method simulation modelling for semiconductor manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12):727–732, 2016.
- [99] Suchismita Satapathy, Swarn Kumar, Anshuman Garanayak, and Ashrant Pani. An analysis of physical disorders of workers at construction site: a fuzzy-ahp ranking. *International Journal of Business Excellence*, 14(2):212–239, 2018.
- [100] R. Schmaler, T. Schmidt, M. Schoeps, J. Luebke, R. Hupfer, and N. Schlaus. Simulation based evaluation of different empty vehicle management strategies with considering future transport jobs. In 2017 Winter Simulation Conference (WSC), pages 3576–3587, Dec 2017.
- [101] S Senthil, B Srirangacharyulu, and A Ramesh. A robust hybrid multi-criteria decision making methodology for contractor evaluation and selection in third-party reverse logistics. *Expert Systems with Applications*, 41(1):50–58, 2014.
- [102] Jen Shang and Toshiyuki Sueyoshi. A unified framework for the selection of a flexible manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 85(2):297–315, 1995.
- [103] Chien-wen Shen, Ming Jen Cheng, and Cheng-Wu Chen. A fuzzy ahp-based fault diagnosis for semiconductor lithography process. *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 7(2):805–815, 2011.
- [104] Sonal Sindhu, Vijay Nehra, and Sunil Luthra. Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid ahp-topsis analysis: case study of india. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73:496–511, 2017.

[105] Jeffrey S Smith. Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *Journal of manufacturing systems*, 22(2):157–171, 2003.

- [106] J. Steele and T. Biswas. Development of a shock amp; vibration spec for 300mm wafer amhs handling. In *The 17th Annual SEMI/IEEE ASMC 2006 Conference*, pages 245–250, May 2006.
- [107] B. Subramaniam and K. D. Kryder. Automation challenges in the next generation semiconductor factory. In 1997 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop ASMC 97 Proceedings, pages 349–355, Sep 1997.
- [108] B. Sylvain. 200mm fab amhs improvement during aggressive ramp. In 2011 IEEE/-SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pages 1–4, May 2011.
- [109] Zahari Taha and Sarkawt Rostam. A hybrid fuzzy ahp-promethee decision support system for machine tool selection in flexible manufacturing cell. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(6):2137–2149, 2012.
- [110] Ed Timmerman. An approach to vendor performance evaluation. *Journal of Supply Chain Management*, 22(4):2–8, 1986.
- [111] Juu-Hwa Ting and JMA Tanchoco. Unidirectional circular layout for overhead material handling systems. *International Journal of Production Research*, 38(16):3913–3935, 2000.
- [112] Evangelos Triantaphyllou. Multi-criteria decision making methods. In *Multi-criteria decision making methods : A comparative study*, pages 5–21. Springer, 2000.
- [113] Omkarprasad S Vaidya and Sushil Kumar. Dependency and its predictions for systems and its components. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 20(9):1096–1116, 2003.
- [114] Omkarprasad S Vaidya and Sushil Kumar. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*, 169(1):1–29, 2006.
- [115] Wan Weiwu and Kang Jun. Highway transportation comprehensive evaluation. *Computers & Industrial Engineering*, 27(1):257 259, 1994. 16th Annual Conference on Computers and Industrial Engineering.
- [116] T. Wiethoff and C. Swearingen. Amhs software solutions to increase manufacturing system performance. In *The 17th Annual SEMI/IEEE ASMC 2006 Conference*, pages 306–311, May 2006.
- [117] Lihui Wu, Dengjie Zhu, and Guohui Zhang. Modeling and analysis of automated interbay material handling system with object-oriented petri net. *Open Journal of Mechanical Engineering*, 3(1):1–9, 2015.

- [118] T Yamagishi. The world's first automated reticle handling system using oht. In 2003 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing, pages 21–24, 2003.
- [119] Chia-Wen Yang, Kuo-Sung Huang, Gary Yu, and Dong-Yeh Jan. Using queuing theory to estimate the storage space of stocker in automated material handling systems. pages 102–104, Dec 2002.

#### École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

NNT: 2018LYSEM010

Ali BEN SALEM

#### AIDE A LA DÉCISION POUR L'AUTOMATISATION DE LA MANU-TENTION DANS UNE UNITÉ DE FABRICATION DE SEMI-CONDUCTEURS

Spécialité : Génie Industriel

**Mots clefs :** Aide à la décision, fabrication de semi-conducteurs, système de manutention, modélisation et simulation

#### Résumé:

Dans cette thèse, nous fournissons une aide à la décision pour un projet d'intégration d'un système de manutention automatisé (ou Automated Material Handling System (AMHS)) dans une unité de fabrication de semi-conducteurs d'ancienne génération (*wafer fab* 200mm). Les travaux sont réalisés en collaboration avec l'entreprise STMicroelectronics à Rousset. Étant donné que ce type d'unité de fabrication n'a pas été initialement conçu pour avoir une manutention automatisée, le challenge consiste à proposer un AMHS efficace pour améliorer la flexibilité et la productivité. Du côté industriel, vue l'ampleur financière et technique, une attention particulière doit être accordée à ce projet afin de garantir sa réussite.

Sur un niveau stratégique, nous avons proposé une méthodologie pour fournir les lignes directrices du projet d'automatisation de la manutention. Cette méthodologie garantie une intégration efficace et structurée de l'AMHS dans la globalité de la *wafer fab*. Ensuite, nous avons abordé la définition d'une méthode d'aide à la décision pour le déploiement de l'AMHS dans les différents ateliers de production de l'unité de fabrication.

Dans la dernière partie de la thèse, sur un niveau tactique, le travail a été orienté vers l'automatisation de la manutention en local en considérant un seul atelier de production à la fois. Ainsi, une méthodologie pour développer une conception "optimisée" et robuste d'un AMHS dans un atelier existant et fonctionnel a été proposée en se basant sur une approche de modélisation et simulation.

Les travaux de recherche menés dans cette thèse ont été appliqués sur le cas de STMicroelectronics à Rousset.

### École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

NNT: 2018LYSEM010

Ali BEN SALEM

#### DECISION SUPPORT FOR THE AUTOMATION OF MATERIAL HAND-LING IN A SEMICONDUCTOR MANUFACTURING FACILITY

**Speciality:** Industrial Engineering

**Keywords:** Decision support, semiconductor manufacturing, material handling system, modeling and simulation

#### **Abstract:**

In this thesis, we provide a decision support for an Automated Material Handling System (AMHS) integration project in a legacy semiconductor manufacturing facility, called 200mm wafer fab. The work is carried out in collaboration with the company STMicroelectronics in Rousset. Since this type of manufacturing facility was not originally designed to have an automated handling, the challenge is to provide a relevant AMHS to improve flexibility and productivity. On the industrial side, given the financial and technical scale, special attention should be given to the project to ensure its success.

At a strategic level, we proposed a methodology to provide the guidelines for the handling automation project. This methodology ensures an efficient and structured integration of the AMHS in the whole wafer fab. Then, we provided a decision support method to the AMHS deployment in the different workshops.

In the last part of the thesis, on a tactical level, the work was directed towards the handling automation in a local vision by considering only one production workshop at a time. Hence, a methodology for developing an "optimized" and robust AMHS design in an existing and functional workshop was proposed based on a modeling and simulation approach.

The research works carried-out in this thesis have been applied to the case of STMicroelectronics in Rousset.