



**HAL**  
open science

# Méthode basée sur le recuit simulé pour optimiser l'implantation d'atelier dans le contexte des systèmes de production reconfigurable

Jean-Baptiste Clarion

► **To cite this version:**

Jean-Baptiste Clarion. Méthode basée sur le recuit simulé pour optimiser l'implantation d'atelier dans le contexte des systèmes de production reconfigurable. Automatique. Université de Bordeaux, 2023. Français. NNT : 2023BORD0156 . tel-04235645

**HAL Id: tel-04235645**

**<https://theses.hal.science/tel-04235645v1>**

Submitted on 10 Oct 2023

**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.

THÈSE PRÉSENTÉE  
POUR OBTENIR LE GRADE DE  
**DOCTEUR DE**  
**L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR  
SPÉCIALITÉ AUTOMATIQUE, PRODUCTIQUE, SIGNAL ET IMAGE, INGENIERIE  
COGNITIVE

Par Mr Jean-Baptiste CLARION

**Méthode basée sur le recuit simulé pour optimiser l'implantation  
d'atelier dans le contexte des systèmes de production  
reconfigurable**

Sous la direction de : Rémy DUPAS  
Co-encadrant : Julien FRANÇOIS

Soutenue le 23 juin 2023

Membres du jury :

|                        |   |                    |
|------------------------|---|--------------------|
| Mme. BATAIA, Olga      | Professeur, KEDGE BUSINESS SCHOOL             | Rapporteur         |
| M. DELORME, Xavier     | Professeur, École des Mines de Saint-Étienne  | Rapporteur         |
| Mme. KLEMENT, Nathalie | Maître de Conférences, Arts et Métiers Lille  | Examinatrice       |
| M. DUPAS, Rémy         | Professeur, Université de Bordeaux            | Directeur de thèse |
| M. FRANCOIS, Julien    | Maître de Conférences, Université de Bordeaux | Examineur          |

Membre invité :

|                  |               |        |
|------------------|---------------|--------|
| M. JUAN, Antoine | EZ-Wheel, CEO | Invité |
|------------------|---------------|--------|

# **Titre : Méthode basée sur le recuit simulé pour optimiser l'implantation d'atelier dans le contexte des systèmes de production reconfigurables**

## **Résumé :**

Ce travail de thèse est situé dans le contexte des systèmes de production reconfigurables (RMS), et concerne plus particulièrement leur implantation et réimplantation dans un atelier. L'objectif de la thèse est de développer une méthode pour optimiser l'implantation d'atelier. Deux objectifs sont pris en compte, à tour de rôle : la distance parcourue ou l'énergie consommée pour répondre à une demande de transport des produits. Pour cela les machines sont caractérisées par leurs implantation, orientation et forme, qui forment la configuration d'une machine. La configuration de l'atelier correspond à la configuration de l'ensemble des machines au sein de l'atelier. Ces trois caractéristiques sont modifiables et constituent les trois niveaux de la solution. La méthode d'optimisation est basée sur la métaheuristique du recuit simulé. Cette métaheuristique permet d'optimiser les machines sur un seul niveau à la fois, les trois niveaux les uns à la suite des autres ou les trois niveaux en même temps. Pour clore cette étude, la simulation d'une configuration d'atelier optimisée via un modèle plus approchant de la réalité permet de tester des hypothèses complémentaires. Ce travail a été effectué dans le cadre des conventions industrielles de formation par la recherche (*Cifre*) réalisée dans l'entreprise EZ-WHEEL.

**Mots clés :** Système de production reconfigurable, Problème d'implantation d'atelier, recuit simulé

## **Title: Method based on simulated annealing to optimize workshop layout in the context of reconfigurable manufacturing systems**

### **Abstract:**

This thesis is situated in the context of reconfigurable production systems (RMS), and concerns more particularly their implementation and re-implementation in a workshop. The objective of the thesis is to develop a method to optimize the workshop implementation. Two objectives are taken into account, in turn: the distance travelled or the energy consumed to meet a demand for transport of products. For this purpose, the machines are characterized by their layout, orientation and shape, which form the configuration of a machine. The configuration of the workshop corresponds to the configuration of all the machines in the workshop. These three characteristics are changeable and constitute the three levels of the solution. The optimization method is based on the simulated annealing metaheuristic. This metaheuristic allows to optimize the machines on only one level at a time, the three levels one after the other or the three levels at the same time. To conclude this study, the simulation of an optimized workshop configuration using a model that is closer to reality allows us to test additional hypotheses. This work was carried out within the framework of the "conventions industrielles de formation par la recherche" (*Cifre*) carried out in the company EZ-WHEEL.

**Keywords:** Reconfigurable manufacturing systems, Facility layout problem, Simulating annealing

## **Laboratoire de l'intégration du Matériau au Système**

[IMS, CNRS UMR 5218, Bât. A31 – 351 Cours de la libération – 33400 Talence]

## Remerciements

Je vais enfin pouvoir répondre à la question « Alors cette thèse quand est-ce que c'est fini ? » par « Ça y est, c'est enfin terminé ! ».

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein :

- Du laboratoire de l'intégration du matériau au système (IMS), au sein de l'équipe productive de l'université de Bordeaux.
- De l'entreprise EZ-Wheel, située à La Couronne.

Je souhaite remercier mes encadrants pour la confiance qu'ils m'ont accordée dans la réalisation de ce projet en plus de leur bienveillance :

- Monsieur Rémy Dupas, Professeur de l'Université de Bordeaux pour avoir assuré le rôle de directeur de thèse, pour tous ses conseils avisés et ses relectures approfondies.
- Monsieur Julien François, Maître de conférences à l'Université de Bordeaux pour son aide dans les recherches et l'écriture du manuscrit.
- Monsieur Antoine Juan, CEO d'EZ-WHEEL pour la liberté accordée à la réalisation de la thèse.

Je tiens également à remercier mes parents de m'avoir hébergé pendant ces années de thèses. J'espère les rendre fiers de moi. Ainsi que mon frère pour les moments passés ensemble. Sans oublier toute la famille pour ces repas passés ensemble.

Je tiens aussi à remercier mes amis pour ces week-ends et soirées passées ensemble. Ainsi que mes amis du rugby pour toutes ces émotions sur le terrain et après lors des troisièmes mi-temps.

Je remercie l'ANRT et la Région Aquitaine pour le financement de ma thèse dans le cadre du projet PORTAGE.

« S'il n'y a pas de solution, c'est qu'il n'y a pas de problème »  
Jacques Rouxel

« C'est l'envie d'en faire moins qui pousse l'Homme à faire toujours plus »

## Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduction générale.....</b>  | <b>13</b> |
| <b>Chapitre 1 : les systèmes de production reconfigurables.....</b>            | <b>16</b> |
| <b>1. Introduction.....</b>  | <b>16</b> |
| <b>2. Les systèmes de production.....</b>                                      | <b>16</b> |
| 2.1. Systèmes de production dédiés.....  | 16        |
| 2.2. Systèmes de production flexibles.....                                     | 17        |
| 2.3. Systèmes de production reconfigurables (ou RMS).....                      | 17        |
| 2.4. Présentation des domaines de recherches.....                              | 21        |
| <b>3. Niveaux de structuration des RMS.....</b>                                | <b>22</b> |
| <b>4. Analyse des performances des RMS.....</b>                                | <b>24</b> |
| 4.1. Stratégie d'organisation de système de production reconfigurable.....     | 24        |
| 4.2. Développement durable.....  | 28        |
| 4.3. Planification et ordonnancement des agencements de machines.....          | 29        |
| <b>5. Caractéristiques des RMS.....</b>  | <b>31</b> |
| 5.1. Stratégie de reconfiguration.....   | 31        |
| 5.2. Personnalisation.....   | 32        |
| 5.3. Possibilité de diagnostic.....  | 32        |
| 5.4. Évolutivité.....  | 32        |
| 5.5. Convertibilité.....   | 33        |
| 5.6. Adaptabilité.....   | 33        |
| 5.7. Modularité.....   | 33        |
| 5.8. Intégrabilité.....  | 33        |
| 5.9. Mobilité.....   | 34        |
| <b>6. Champs d'application des RMS.....</b>                                    | <b>34</b> |
| 6.1. Moyen de transport.....   | 34        |
| <b>7. Conclusion.....</b>  | <b>35</b> |
| <b>Chapitre 2 : les problèmes d'implantation d'atelier (PIA).....</b>          | <b>37</b> |
| <b>1. Introduction.....</b>  | <b>37</b> |
| <b>2. Caractérisation des PIA.....</b>   | <b>39</b> |
| 2.1. Caractéristiques de l'atelier impactant l'implantation.....               | 39        |
| 2.2. Approches d'implantation.....   | 40        |
| 2.3. Méthode pratique de mesure et d'analyse des caractéristiques des PIA..... | 43        |
| <b>3. Modélisation et résolution des PIA.....</b>                              | <b>46</b> |
| 3.1. Modélisation.....   | 46        |
| 3.2. Résolution.....   | 52        |
| 3.3. Synthèse.....   | 56        |
| <b>4. Conclusion.....</b>  | <b>59</b> |
| <b>Chapitre 3 : méthodologie de résolution du problème d'implantation.....</b> | <b>60</b> |
| <b>1. Présentation du problème d'implantation.....</b>                         | <b>60</b> |
| 1.1. Contexte et hypothèses de travail.....                                    | 60        |
| 1.2. Modélisation de l'atelier.....  | 64        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 1.3.      | Présentation du problème de reconfiguration.....                            | 64         |
| <b>2.</b> | <b>Modélisation mathématique du problème.....</b>                           | <b>67</b>  |
| 2.1.      | Ensembles et indices.....   | 67         |
| 2.2.      | Paramètres du modèle.....   | 68         |
| 2.3.      | Variables.....  | 68         |
| 2.4.      | Contraintes.....  | 68         |
| 2.5.      | Fonctions objectif.....   | 69         |
| <b>3.</b> | <b>Méthode de résolution et application du recuit simulé.....</b>           | <b>72</b>  |
| 3.1.      | Paramètres d'entrées.....   | 72         |
| 3.2.      | Résultats.....  | 73         |
| 3.3.      | Codage de la solution.....  | 73         |
| 3.4.      | Recherche de voisins.....   | 73         |
| <b>4.</b> | <b>Conclusion.....</b>  | <b>74</b>  |
|           | <b>Chapitre 4 : résultats des expérimentations.....</b>                     | <b>75</b>  |
| <b>1.</b> | <b>Contexte expérimental.....</b>   | <b>75</b>  |
| 1.1.      | Instances de demande de transport (IDT).....                                | 76         |
| 1.2.      | Configuration initiale.....   | 77         |
| 1.3.      | Stratégies d'optimisation.....  | 77         |
| 1.4.      | Indicateur de comparaison de deux résultats.....                            | 78         |
| 1.5.      | Configuration matérielle et logicielle.....                                 | 79         |
| <b>2.</b> | <b>Comparaison avec l'article de référence.....</b>                         | <b>79</b>  |
| 2.1.      | Optimisation sur un seul niveau ( $Opt\ 1\ Per\ Niv_i$ ).....               | 79         |
| 2.2.      | Optimisation parallèle ( $Opt\ 1\ Per\ 3\ Niv_{Par}$ ).....                 | 80         |
| 2.3.      | Optimisation séquentielle ( $Opt\ 1\ Per\ 3\ Niv_{Seq}$ ).....              | 81         |
| <b>3.</b> | <b>Approfondissement de l'optimisation séquentielle.....</b>                | <b>82</b>  |
| 3.1.      | Optimisation parallèle versus séquentielle.....                             | 83         |
| 3.2.      | Optimisation parallèle-séquentielle ( $Opt\ 1\ Per\ 3\ Niv_i$ ).....        | 84         |
| 3.3.      | Ordre d'optimisation séquentielle.....                                      | 85         |
| <b>4.</b> | <b>Optimisation sur plusieurs périodes.....</b>                             | <b>87</b>  |
| 4.1.      | Optimisation de la distance.....  | 87         |
| 4.2.      | Optimisation de l'énergie.....  | 91         |
| <b>5.</b> | <b>Conclusion.....</b>  | <b>95</b>  |
|           | <b>Chapitre 5 : étude par simulation d'une configuration optimisée.....</b> | <b>97</b>  |
| <b>1.</b> | <b>Adaptation du modèle d'optimisation au modèle de simulation.....</b>     | <b>97</b>  |
| 1.1.      | Hypothèses de travail.....  | 99         |
| 1.2.      | Réparation des trajets à vide.....  | 99         |
| 1.3.      | Chemin parcouru par le RMA.....   | 101        |
| <b>2.</b> | <b>Description des scénarios de simulation.....</b>                         | <b>104</b> |
| 2.1.      | Hypothèses de simulation.....   | 104        |
| 2.2.      | Données et valeurs.....   | 105        |
| 2.3.      | Modélisation de l'usage de la batterie pour la simulation.....              | 105        |
| 2.4.      | Déroulement de la simulation.....   | 106        |
| 2.5.      | Socle commun aux scénarios de simulation.....                               | 106        |
| 2.6.      | Scénarios de simulation.....  | 107        |
| <b>3.</b> | <b>Analyse des résultats de simulation.....</b>                             | <b>109</b> |
| 3.1.      | Indicateurs clés de performances (ICP).....                                 | 109        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.2. Analyse et comparaisons des résultats..... | 110        |
| <b>4. Conclusion.....</b>                       | <b>113</b> |
| <i>Conclusion générale et perspectives.....</i> | <i>115</i> |
| 1. Conclusion générale.....                     | 115        |
| 2. Perspectives.....                            | 117        |
| <i>Bibliographie.....</i>                       | <i>119</i> |
| <i>Annexes.....</i>                             | <i>127</i> |
| Projet PORTAGE.....                             | 127        |
| Recuit simulé.....                              | 129        |
| Plan de l'atelier (AnyLogic).....               | 132        |
| Vue des processus logiques (AnyLogic).....      | 132        |



## Listes des figures

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figure 1-1 : aspect dynamique du RMS vis-à-vis des aspects statiques des FMS et DMS (Koren et Shpitalni, 2010).....</i>                     | <i>18</i> |
| <i>Figure 1-2 : quantité de publications par année avec le mot clé "Reconfigurable Manufacturing System".....</i>                              | <i>19</i> |
| <i>Figure 1-3 : carte des auteurs avec le mot clé "Reconfigurable Manufacturing System".....</i>   | <i>20</i> |
| <i>Figure 1-4 : exemple de système de production reconfigurable(Koren et al., 2018).....</i>   | <i>20</i> |
| <i>Figure 1-5 : schéma des domaines de recherche du RMS (Bortolini et al., 2018).....</i>  | <i>22</i> |
| <i>Figure 1-6 : hiérarchie des niveaux de production (ElMaraghy, 2009).....</i>  | <i>22</i> |
| <i>Figure 1-7 : RMT à architecture modulaire (a) et à architecture intégrale (b) (Gadalla et Xue, 2017).....</i>                               | <i>23</i> |
| <i>Figure 1-8: ligne de production reconfigurable (Yelles-Chaouche et al., 2020).....</i>  | <i>25</i> |
| <i>Figure 1-9 : système de fabrication cellulaire reconfigurable (Yelles-Chaouche et al., 2020).....</i>                                       | <i>26</i> |
| <i>Figure 1-10 : scénario illustrant le fonctionnement d'un MMS (Schönemann et al., 2015)....</i>  | <i>27</i> |
| <i>Figure 1-11 : systèmes de production mobiles sans ligne fixe, vue d'ensemble (Hüttemann et al., 2019).....</i>                              | <i>28</i> |
| <i>Figure 2-1 : quantité de publications par année avec le mot clé "Facility Layout Problem"..</i>   | <i>37</i> |
| <i>Figure 2-2 : carte des auteurs avec le mot clé "Facility Layout Problem".....</i>   | <i>38</i> |
| <i>Figure 2-3: dimensions régulière et irrégulière de poste de travail (Drira et al., 2007).....</i>   | <i>40</i> |
| <i>Figure 2-4 : disposition des postes de travail par rapport aux systèmes de transport des produits (Hosseini-Nasab et al., 2018).....</i>    | <i>41</i> |
| <i>Figure 2-5 : illustration d'une disposition de postes de travail sur plusieurs niveaux (Hosseini-Nasab et al., 2018).....</i>               | <i>43</i> |
| <i>Figure 2-6 : exemple d'un diagramme spaghetti avant amélioration (à gauche) et après amélioration (à droite) (Balaji et al., 2021).....</i> | <i>44</i> |
| <i>Figure 2-7 : exemple d'une VSM Suhadak et al.( 2015).....</i>   | <i>44</i> |
| <i>Figure 2-8 : représentations d'implantations discrètes et continues (Drira et al., 2007).....</i>   | <i>46</i> |
| <i>Figure 2-9 : exemple de machine de forme irrégulière dans une représentation discrète (Bock and Hoberg, 2007).....</i>                      | <i>50</i> |
| <i>Figure 2-10 : illustration de différentes orientations pour des machines (Kim and Kim, 2000).....</i>                                       | <i>51</i> |
| <i>Figure 2-11 : exemple de placement de points de ramassage et de dépôt, combiné à l'orientation des machines (Kim and Kim, 2000).....</i>    | <i>52</i> |
| <i>Figure 3-1 : représentation d'une machine.....</i>  | <i>61</i> |
| <i>Figure 3-2 : orientations possibles d'une machine.....</i>  | <i>61</i> |
| <i>Figure 3-3 : orientations possibles pour une machine avec une forme en L.....</i>   | <i>62</i> |
| <i>Figure 3-4 : orientations possibles pour une machine avec une forme en L'.....</i>  | <i>62</i> |
| <i>Figure 3-5 : orientations possibles pour une machine avec une forme en U.....</i>   | <i>62</i> |
| <i>Figure 3-6 : orientations possibles pour une machine avec une forme en U'.....</i>  | <i>62</i> |
| <i>Figure 3-7 : étapes de la reconfiguration d'un site.....</i>  | <i>63</i> |
| <i>Figure 3-8 : exemple de graphe sans machine (à gauche) et composé de quatre machines (à droite).....</i>                                    | <i>64</i> |
| <i>Figure 3-9 : scénario de planification.....</i>   | <i>65</i> |
| <i>Figure 3-10 : demandes de transport en charge de l'exemple de la Figure 3-8.....</i>  | <i>66</i> |
| <i>Figure 3-11 : modèle de transport à vide de l'exemple de la Figure 3-8.....</i>   | <i>67</i> |

|  |            |
|--|------------|
| <i>Figure 3-12 : exemple d'un vecteur d'implantation avec a machines.....</i>  | <i>73</i>  |
| <i>Figure 3-13 : échange de sites des machines 2 et 4.....</i>   | <i>74</i>  |
| <i>Figure 4-1 : IDT 9_A.....</i>   | <i>77</i>  |
| <i>Figure 4-2 : comparaison entre le résultat trouvé par Guan et al. (2012) et la stratégie d'optimisation par niveau.....</i>                 | <i>80</i>  |
| <i>Figure 4-3 : ajout de l'optimisation parallèle.....</i>   | <i>81</i>  |
| <i>Figure 4-4 : ajout de l'optimisation séquentielle.....</i>  | <i>82</i>  |
| <i>Figure 4-5 : comparaison entre les optimisations parallèle et séquentielle.....</i>   | <i>84</i>  |
| <i>Figure 4-6 : comparaison des durées d'utilisation de l'optimisation parallèle.....</i>  | <i>85</i>  |
| <i>Figure 4-7 : distance parcourue avec une ou plusieurs reconfigurations d'atelier.....</i>   | <i>89</i>  |
| <i>Figure 4-8 : influence du coût de reconfiguration des machines sur la distance parcourue par le RMA.....</i>                                | <i>90</i>  |
| <i>Figure 4-9 : influence du coût de reconfiguration des machines avec une taille de lot égale à cinq sur la distance parcourue.....</i>       | <i>90</i>  |
| <i>Figure 4-10 : influence du coût de reconfiguration des machines.....</i>  | <i>91</i>  |
| <i>Figure 4-11 : consommation d'énergie sur cinq périodes en fonction de la stratégie de reconfiguration.....</i>                              | <i>92</i>  |
| <i>Figure 4-12 : influence du poids des machines sur la reconfiguration de l'atelier.....</i>  | <i>93</i>  |
| <i>Figure 4-13 : influence de la distance entre les machines sur la consommation d'énergie.....</i>  | <i>94</i>  |
| <i>Figure 4-14 : influence de la taille de lot sur le coût en énergie.....</i>   | <i>94</i>  |
| <i>Figure 5-1 : cheminement des données jusqu'à leur entrée dans le bloc « Simulation ».....</i>   | <i>98</i>  |
| <i>Figure 5-2 : exemple de paramètres d'entrées (à gauche) et de résultats (à droite) du bloc « Optimisation ».....</i>                        | <i>98</i>  |
| <i>Figure 5-3 : illustration des graphes d'atelier pour la configuration initiale (à gauche) et la configuration optimisée (à droite).....</i> | <i>98</i>  |
| <i>Figure 5-4 : graphe des trajets non connexe.....</i>  | <i>100</i> |
| <i>Figure 5-5 : graphe des trajets fortement connexe.....</i>  | <i>101</i> |
| <i>Figure 5-6 : duplication d'un arc d'une pondération de trois.....</i>   | <i>101</i> |
| <i>Figure 5-7 : transformation du graphe des trajets en GTU (de gauche à droite).....</i>  | <i>102</i> |
| <i>Figure 5-8 : Début de construction du chemin eulérien.....</i>  | <i>103</i> |
| <i>Figure 5-9 : correction du chemin eulérien.....</i>   | <i>103</i> |
| <i>Figure 5-10 : données du scénario de simulation.....</i>  | <i>104</i> |
| <i>Figure 5-11 : déroulement de la simulation.....</i>   | <i>106</i> |
| <i>Figure 5-12 : Configuration optimisée du scénario de simulation théorique (ST).....</i>   | <i>108</i> |
| <i>Figure 5-13 : exemple de division de chemin optimisé pour deux RMAs.....</i>  | <i>109</i> |
| <i>Figure 5-14 : illustration d'un trajet théorique versus un trajet réalisé.....</i>  | <i>111</i> |
| <i>Figure 0-1 : illustration du kit de développement.....</i>  | <i>128</i> |
| <i>Figure 0-2 : pseudocode du recuit simulé.....</i>   | <i>130</i> |
| <i>Figure 0-3 : plan de l'atelier (simulation avec deux RMA).....</i>  | <i>132</i> |
| <i>Figure 0-4: vue de la modélisation par évènements discrets (simulation avec deux RMA).....</i>  | <i>132</i> |

## Listes des tableaux

|   |     |
|---|-----|
| <i>Tableau 2-1 : tableau de synthèse des publications ces dans le chapitre (1/3)</i> .....                  | 57  |
| <i>Tableau 2-2 : tableau de synthèse des publications citées dans le chapitre (2/3)</i> .....               | 58  |
| <i>Tableau 2-3 : tableau de synthèse des publications citées dans le chapitre (3/3)</i> .....               | 59  |
| <i>Tableau 4-1 : ensemble des demandes de transport</i> .....   | 76  |
| <i>Tableau 4-2: plan d'expérience du premier groupe d'IDT</i> .....   | 79  |
| <i>Tableau 4-3 : tableau des gains en pourcentage par rapport au modèle de référence</i> .....              | 82  |
| <i>Tableau 4-4 : plan d'expériences du deuxième groupe d'expérimentations</i> .....                         | 83  |
| <i>Tableau 4-5 : temps dédié à l'optimisation parallèle en minutes</i> .....                                | 84  |
| <i>Tableau 4-6 : distances parcourues (mètres) en fonction de l'ordre d'optimisation</i> .....              | 86  |
| <i>Tableau 4-7 : classement des ordres d'optimisation séquentielle pour les instances 25_A à 25_E</i> ..... | 86  |
| <i>Tableau 4-8 : résumé des résultats obtenus</i> .....   | 87  |
| <i>Tableau 4-9 : plan d'expériences avec pour fonction objectif la distance</i> .....                       | 88  |
| <i>Tableau 4-10 : récapitulatif des trois stratégies de reconfiguration</i> .....                           | 88  |
| <i>Tableau 4-11 : plan d'expérience pour la fonction objectif de l'énergie</i> .....                        | 92  |
| <i>Tableau 4-12: récapitulatif des trois stratégies de reconfiguration</i> .....                            | 92  |
| <i>Tableau 5-1 : valeurs numériques communes aux scénarios de simulations « réalistes »</i> .....           | 105 |
| <i>Tableau 5-2 : valeurs numériques liées à l'utilisation de la batterie des RMA</i> .....                  | 106 |
| <i>Tableau 5-3 : spécificité des scénarios de simulation</i> .....  | 109 |
| <i>Tableau 5-4 : résultats du modèle d'optimisation et du scénario de simulation théorique</i> ...          | 110 |
| <i>Tableau 5-5 : résultats des scénarios SACO et SSCO</i> .....   | 112 |
| <i>Tableau 5-6 : résultats des scénarios SACO et S2RMA</i> .....  | 113 |

## Liste des équations

|                    |     |
|--------------------|-----|
| Équation 2-1.....  | 48  |
| Équation 2-2.....  | 48  |
| Équation 2-3.....  | 48  |
| Équation 2-4.....  | 51  |
| Équation 2-5.....  | 51  |
| Équation 3-1.....  | 68  |
| Équation 3-2.....  | 68  |
| Équation 3-3.....  | 69  |
| Équation 3-4.....  | 69  |
| Équation 3-5.....  | 69  |
| Équation 3-6.....  | 69  |
| Équation 3-7.....  | 69  |
| Équation 3-8.....  | 70  |
| Équation 3-9.....  | 70  |
| Équation 3-10..... | 70  |
| Équation 3-11..... | 71  |
| Équation 3-12..... | 71  |
| Équation 3-13..... | 71  |
| Équation 3-14..... | 72  |
| Équation 3-15..... | 72  |
| Équation 3-16..... | 72  |
| Équation 4-1.....  | 78  |
| Équation 5-1.....  | 105 |
| Équation 5-2.....  | 110 |
| Équation 0-1.....  | 129 |

## Table des sigles et acronymes

|       |   |      |   |
|-------|---|------|---|
| AG    | GENETIC ALGORITHMS, 54  | NLP  | Nonlinear programming, 48   |
| AGV   | Automatic Guided Vehicle, 24  | PMP  | PROFILE MINIMIZATION PROBLEM, 53  |
| AHP   | Analytic Hierarchy Process, 46  | PT   | Parallel Tempering, 51  |
| B&B   | BRANCH AND BOUND, 40  | QAP  | problèmes d'assignation quadratique, 45<br>Quadratic Assignment Problem, 47 |
| CART  | CLASSIFICATION AND REGRESSION TREES, 44   | QSP  | Quadratic set covering problem, 48  |
| DCMS  | Dynamique Cellular Manufacturing System, 27                                       | RAM  | Reconfigurable Assembly Machines, 25  |
| DMS   | Dedicated Manufacturing System, 16  | RCMS | Reconfigurable cellular manufacturing systems, 27                           |
| EM    | electromagnetism-like mechanism, 54   | REMS | Reconfigurable and energy-efficient manufacturing,<br>30                    |
| FMS   | Flexible Manufacturing System, 17   | RIM  | Reconfigurable Inspection Machines, 25                                      |
| GT    | Graph theoretic problem, 48   | RM   | Reconfigurable Machine, 27  |
| IP    | Integer programming, 48   | RMA  | Robot Mobile Autonome, 24   |
| LP    | Linear programming, 48  | RMS  | Reconfigurable Manufacturing System, 17                                     |
| MINLP | Mixed Integer Nonlinear Programming, 50   | SA   | Simulated Annealing, 53, 128  |
| MIP   | Mixed integer programming problem, 48<br>programmes en nombres entiers mixtes, 45 | VNS  | Variable Neighbourhood, 51  |
| MMS   | Matrix-structured Manufacturing Systems, 28                                       | VSM  | Value Stream Mapping, 43  |

## Introduction générale

Au cours des dernières années, le paysage industriel a connu de nombreux changements. Ainsi, avec les différentes révolutions industrielles, l'organisation des ateliers de production manufacturière a subi de profondes modifications induites par l'évolution technologique continue et l'évolution de la demande.

La hausse accrue de la concurrence ainsi que la réduction des délais entre le lancement de nouveaux produits obligent les usines à constamment se réorganiser. C'est ainsi que dans les années 90, les systèmes de production reconfigurables (RMS) ont vu le jour. Ce paradigme permet aux usines de produire une famille de produits avec de forts volumes, alors que les systèmes de production existants reposaient sur des lignes dédiées permettant de produire une seule référence de produit avec de forts volumes.

Notre travail est situé dans le champ des RMS et se situe au niveau de l'unité de production (atelier) dans la hiérarchie des niveaux de production qui distingue classiquement les six niveaux suivants : machines, cellules, système, segment, unité de production et réseau. Cependant avant d'exploiter le système de production reconfigurable, il convient de l'implanter au sein de l'atelier. Les problèmes d'implantation d'atelier constituent le second paradigme en lien avec les travaux présentés dans cette thèse. Un des principaux objectifs dans ce domaine est la réduction des distances parcourues pour le transport des produits.

Notre travail s'articule donc à la croisée des deux paradigmes précédemment évoqués tout en exploitant un robot mobile autonome analogue à celui qui est développé, dans la plate-forme robotisée, par EZ-Wheel dans le cadre du projet PORTAGE (voir annexe Projet PORTAGE). Le travail de thèse aborde la problématique de la réduction des distances parcourues pour le transport des produits et se focalise sur l'élaboration d'une méthode basée sur la métaheuristique du recuit simulé pour optimiser l'implantation d'atelier, dans le contexte des systèmes de production reconfigurables. Afin de traiter ce sujet, la thèse se découpe en cinq chapitres.

Au cours du premier chapitre, les axes de recherches dans le vaste domaine des RMS sont passés en revue. L'objectif est de déterminer l'ensemble des avantages permettant aux RMS de faciliter leur reconfiguration et leur déplacement au sein d'un atelier. Pour cela dans une première partie l'évolution des différents systèmes de production est présentée. Une seconde partie met en exergue les caractéristiques des systèmes de production reconfigurables. Une troisième partie présente les différents niveaux de structuration de ce système de production. Une quatrième partie expose l'analyse des performances des systèmes de production reconfigurables. Enfin une dernière partie montre les champs d'application de ces systèmes. L'ensemble des éléments abordés dans le chapitre montrent que les différents principes utilisés par les RMS permettent facilement leur reconfiguration et leur déplacement, grâce aux principes de modularité et de mobilité. Cependant peu de travaux abordent le problème important de l'implantation des RMS dans un atelier, sur lequel nous nous sommes focalisés.

Le second chapitre vise à présenter un état de l'art des différentes méthodologies de résolution qui existent pour l'implantation des machines dans un atelier. Pour cela, dans une première partie ces problèmes sont introduits. Une seconde partie caractérise et évalue les problèmes d'implantation d'atelier. Pour finir une troisième partie, expose les méthodes de modélisation et d'évaluation des problèmes d'implantation d'atelier. Cet état de l'art se structure autour de trois domaines qui sont la modélisation mathématique, les contraintes et les méthodes de résolution. D'après l'ensemble des éléments abordés dans ce chapitre, les problèmes

d'implantation d'atelier peuvent être modélisés de manière discrète, avec un ensemble de contraintes telles que les orientations et les formes. Plusieurs méthodes de résolution sont utilisées comme des méthodes d'optimisation approchées telles que le recuit simulé. Cependant, à notre connaissance, aucun auteur ne traite le problème de manière discrète en utilisant une représentation par les graphes prenant en compte l'implantation, l'orientation et la forme de RMS.

En conséquence dans le troisième chapitre, nous développons une méthodologie permettant de représenter un atelier de type RMS de manière discrète comportant des machines, dont l'implantation, l'orientation et la forme peuvent être modifiées. Dans une première partie, le problème d'implantation est détaillé. La modélisation des machines avec la prise en compte de leur orientation et de leur forme est détaillée. La modélisation de l'atelier est modélisée sous la forme d'un graphe. Dans une seconde partie, nous exposons le modèle mathématique qui comporte trois fonctions objectif différentes qui sont la distance parcourue par le RMA pour le transport des produits, l'énergie qu'il consomme ou son effort de déplacement. Dans une troisième partie, nous détaillons la méthode de résolution. Ce problème appartient à la famille des problèmes d'affectation quadratique qui sont d'une grande complexité. C'est pourquoi nous proposons une méthode de résolution métaheuristique basée sur le recuit simulé, que nous avons adapté au problème traité.

Dans le quatrième chapitre, la méthodologie du chapitre trois est appliquée avec sept instances de demandes de transport. Dans une première partie, plusieurs analyses sont menées portant notamment sur la comparaison des résultats par rapport à la littérature (résultat de référence) sur une instance de petite taille, sur l'étude de l'impact des différents niveaux de la solution et sur la comparaison de deux approches d'optimisation dans une première partie. Ces deux approches sont l'optimisation parallèle et séquentielle. L'optimisation parallèle consiste à optimiser tous les niveaux de la solution en même temps, quand l'optimisation séquentielle consiste à optimiser les niveaux de la solution les uns après les autres. Dans une seconde partie, nous utilisons de nouvelles instances de taille plus grande pour les demandes de transport comportant 25 machines. À partir de ces nouvelles instances, les deux approches d'optimisation, parallèle et séquentielle, sont comparées puis deux leviers d'amélioration sont testés : l'amélioration de la solution initiale et la modification de l'ordre d'optimisation séquentielle. Finalement l'aspect multi-période du critère d'optimisation, minimisation de la distance ou de la consommation d'énergie, est étudié, avec l'objectif de montrer la pertinence de la reconfiguration d'atelier entre deux périodes. Dans un premier temps la distance parcourue est étudiée puis dans un second temps l'énergie consommée est analysée. Ces deux études sont faites en modifiant trois paramètres qui sont le coût de déplacement des machines, la taille de lot et la distance entre les machines, pour la distance parcourue ; le poids des machines, la distance entre les machines et la taille de lot, pour l'énergie consommée.

Dans le cinquième et dernier chapitre, une étude par simulation d'une configuration optimisée est faite. Cette étude permet de modéliser plus finement le problème en intégrant des aspects non pris en compte dans le modèle d'optimisation développé dans le chapitre trois. Ces aspects concernent le chemin que doit parcourir le RMA, le temps mis par le RMA pour reconfigurer l'atelier et de placer l'ensemble des produits, le taux d'utilisation du RMA et l'utilisation de plusieurs RMA en même temps. Cela permet également de tendre vers des résultats plus réalistes. Pour cela dans une première partie, le modèle développé dans le

chapitre 3 est adapté afin de pouvoir effectuer les simulations. Dans une seconde partie, les scénarios de simulation sont décrits. Quatre scénarios de simulation sont construits : le premier reprenant le modèle d'optimisation, le second comprenant le chemin parcouru par le RMA optimal, le troisième ne comprenant pas le chemin parcouru par le RMA optimal et le quatrième reprenant le second scénario de simulation dans lequel deux RMA déplacent les produits. Enfin dans une quatrième partie, l'ensemble des résultats obtenus est analysé. Ces résultats sont issus de quatre indicateurs clés de performance qui sont la durée totale de déplacement des produits et machines, le taux d'utilisation du RMA, la distance parcourue par le RMA lors du déplacement des produits et l'énergie consommée lors du déplacement des produits. Les résultats obtenus avec les scénarios de simulation mettent en avant les proches résultats entre le modèle d'optimisation (MO) développé dans le chapitre trois et le scénario de simulation correspondant au MO ; la pertinence de l'optimisation du chemin parcouru par le RMA et l'avantage de l'utilisation de deux RMAs.

Pour finir, une conclusion générale avec les perspectives pour de futurs travaux clôt le travail de thèse.



# Chapitre 1 : les systèmes de production reconfigurables

## 1. Introduction

Le travail de thèse se situe dans le paradigme de recherche des systèmes de production reconfigurables (RMS). L'objectif en abordant ce champ de recherche est de déterminer l'ensemble des avantages du paradigme sur lesquels s'appuyer pour le travail de thèse. Dans une première partie, les différents systèmes de production sont abordés en commençant par les systèmes de production dédiés, puis les systèmes de production flexibles en terminant par les systèmes de production reconfigurables, ainsi que les domaines de recherches liés aux systèmes de production reconfigurables. Une seconde partie présente les caractéristiques des RMS. Une troisième partie présente les différents niveaux de structuration. Une quatrième partie expose l'analyse des performances des systèmes de production reconfigurables. Enfin une dernière partie montre les champs d'application de ces systèmes.

## 2. Les systèmes de production

La première révolution industrielle débute en Angleterre au milieu du 18<sup>e</sup> siècle puis en France et en suisse au début du 19<sup>e</sup> siècle. Elle est notamment due à l'introduction de la machine à vapeur dans le domaine industriel favorisé par l'utilisation du charbon comme combustible (Groumpos, 2021). Ce sont les débuts de l'industrie.

La maîtrise de l'électricité au début du 20<sup>e</sup> siècle et en particulier celle de l'invention du moteur électrique marque le début de la seconde révolution industrielle (Groumpos, 2021). L'utilisation de l'électricité a facilité la construction de machines plus petites et équipées de moteurs électriques internes (Boothroyd et Knight, 1932).

La troisième révolution industrielle a commencé quelques années seulement après la fin de la Seconde Guerre mondiale, dans les années 50 du XX<sup>e</sup> siècle, par une automatisation partielle utilisant des commandes programmables par mémoire et des ordinateurs (Groumpos, 2021).

### 2.1. Systèmes de production dédiés

L'invention en 1913 de la ligne d'assemblage mouvante par Henri Ford marque les débuts du paradigme de production de masse (Koren et al., 2018). À cette époque les lignes de production de masse sont dédiées à un seul et unique produit. Cette production de masse a entraîné les trois types de valeur ajoutée suivants : des volumes plus importants, des coûts plus bas et des temps de production plus rapides (Hu, 2013).

Bien que les chaînes de production aient évolué pour atteindre un système d'assemblage plus efficace, il s'agissait d'un système inflexible, connu plus tard sous le nom de système de production dédié (DEDICATED MANUFACTURING SYSTEM ou DMS). Ainsi lorsque ces lignes fonctionnent à forte charge, elles deviennent très rentables. En contrepartie, ce système de production dédié est très coûteux à mettre en place et est également très coûteux lorsqu'il s'agit de l'adapter à un autre produit.

L'utilisation généralisée des lignes de production a accru la concurrence entre les entreprises. Cependant, cette concurrence était principalement basée sur la réduction des coûts de production. Cette pratique n'était pas viable et a finalement conduit à l'émergence d'un nouveau paradigme qui ajoute de la valeur aux produits en permettant leurs personnalisations

au lieu de réduire leurs coûts (Hu, 2013) : les systèmes de production flexibles apparus dans les années 70.

## 2.2. Systèmes de production flexibles

Un système de production flexible (FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM ou FMS) peut être défini de la façon suivante : « système composé d'un ensemble de machines, d'un système de transport des pièces et des outils et de fixation des outils aux machines. Chaque composant du système de production flexible possède son propre système de contrôle informatisé local. Les systèmes de contrôle locaux sont coordonnés par un système de gestion informatisé global. Un système de production flexible produit automatiquement diverses pièces dans des proportions variables pour répondre aux exigences des clients. Un changement dans les exigences du client est automatiquement pris en compte si nécessaire. En d'autres termes, le système modifie automatiquement la planification de ses tâches en temps réel. Un système de production flexible s'adapte également en temps réel aux ruptures de ressources » (Dolgui, 2010).

Là où les systèmes de production dédiés ne sont consacrés qu'à un seul produit fabriqué en très grande quantité, les systèmes de production flexibles sont capables de gérer plusieurs produits différents en faible quantité.

L'avantage principal est l'évolutivité c'est-à-dire qu'il est relativement facile d'ajouter ou d'enlever des machines dans la ligne de production. Par contre, un tel système coûte très cher à mettre en place, les machines peuvent être longues à développer (Borenstein, 1998) et ce type de système est moins adapté pour des volumes de production élevés. La combinaison entre flux de produit faible et coût d'équipement élevé donne un coût de production élevé pour les systèmes de production flexibles. Ce type de système de production est implanté dans de nombreuses entreprises, quelle que soit leur taille (Spena et al., 2016). Les machines utilisées sont des machines à commande numérique (COMPUTER NUMERICAL CONTROL ou CNC).

## 2.3. Systèmes de production reconfigurables (ou RMS)

Ces dernières années, les systèmes de production ont dû s'adapter à un nouveau type de demande qui est la personnalisation de masse. La personnalisation de masse est la fabrication en grande quantité de produits légèrement différents. Pour améliorer leur réactivité, il était indispensable que les nouvelles usines possèdent un nouveau système de production permettant un délai d'exécution plus court et un système de fabrication plus flexible. Un nouveau type de système de production est ainsi nécessaire pour faire face aux grandes fluctuations de la demande et de la gamme de produits causées par les nouvelles conditions du marché. Ce système de production nécessite des changements rapides dans la capacité de production du système, à savoir l'évolutivité du système. En résumé, il faut un système réactif dont la capacité de production est ajustable aux fluctuations de la demande de produits et dont la fonctionnalité est adaptable aux nouveaux produits. Les systèmes de fabrication vus précédemment (dédiés et flexibles) ne sont pas en mesure de répondre à ces exigences dictées par ce nouvel environnement concurrentiel (Koren et al., 1999).

Pour faire face à ces nouvelles contraintes, un nouveau système de production (Koren, 1983) a été proposé, appelé « systèmes de production reconfigurables » (RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEM ou RMS). Ce système de production combine les avantages du

système de production dédié (une forte productivité) et ceux du système de production flexible avec sa capacité à produire différents produits issus de la même famille. Une famille de produit est définie comme étant l'ensemble de produits partageant des caractéristiques communes. De plus, les systèmes de production reconfigurables sont évolutifs et peuvent facilement s'adapter à l'évolution du marché (Koren et Shpitalni, 2010). L'une des définitions possibles des systèmes de production reconfigurables est la suivante : « *un système de fabrication reconfigurable est conçu dès le départ pour une modification rapide de la structure, ainsi que des composants matériels et logiciels, afin d'adapter rapidement la capacité de production et les fonctionnalités au sein d'une famille de pièces en réponse à des changements soudains du marché ou des exigences réglementaires* » (Koren et al., 1999). Ce type de système est composé de machines-outils reconfigurables (RECONFIGURABLE MACHINE TOOLS ou RMT).

La Figure 1-1 illustre l'aptitude d'un système de production reconfigurable à s'adapter plus facilement aux conditions du marché en comparaison des deux autres systèmes présentés précédemment (le système de production dédié et le système de production flexible). Dans un premier temps, le RMS est capable de produire le produit A. Puis dans un second temps, le RMS est reconfiguré pour être capable de soutenir une plus forte cadence pour le produit A. Dans un troisième temps, le RMS est à nouveau reconfiguré pour être capable de fabriquer le produit B en plus du produit A. Puis le système est une dernière fois reconfiguré pour être capable de fabriquer le produit C à la place du produit A.

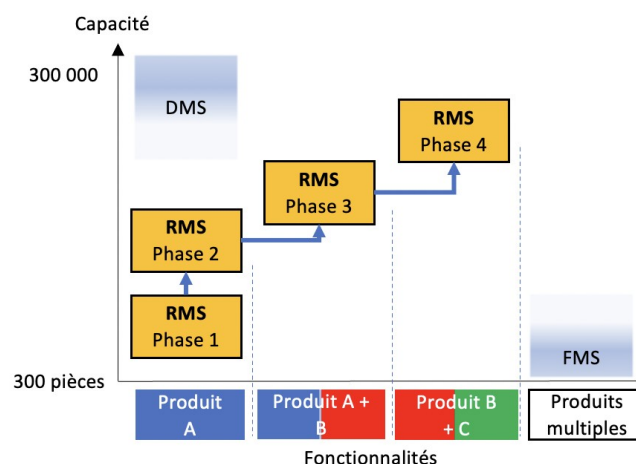


Figure 1-1 : aspect dynamique du RMS vis-à-vis des aspects statiques des FMS et DMS (Koren et Shpitalni, 2010)

Les avantages des RMS en ont fait un domaine de recherche très actif avec plus de 2000 publications (article de conférences, articles, revues de conférence, chapitres de livre, revues, livres) recensées sur les 10 dernières années (Figure 1-2) dans la base de données de Scopus en effectuant une requête avec les mots clés « Reconfigurable Manufacturing System ». Un pic de publications a eu lieu en 2015-2016. Une courbe de tendance est également affichée (en orange) sur la Figure 1-2. Nous remarquons que cette courbe est croissante avec une croissance de l'ordre d'une dizaine d'articles supplémentaires par année en moyenne.

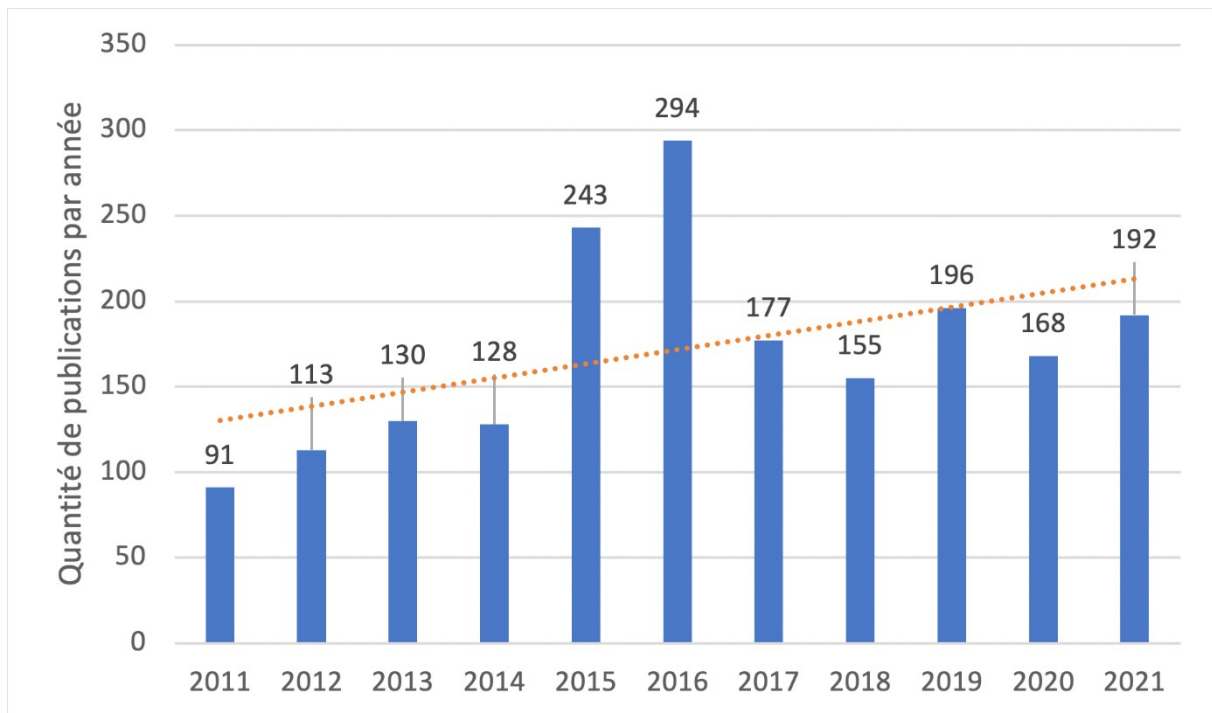


Figure 1-2 : quantité de publications par année avec le mot clé "Reconfigurable Manufacturing System"

La Figure 1-3 présente une cartographie des auteurs avec les mots clés "Reconfigurable Manufacturing System". Cette carte a été réalisée avec le logiciel de visualisation bibliométrique VOSviewer<sup>1</sup> à partir de la liste de référence provenant de la base de données Scopus. Il y a au total 2996 publications recensées depuis 1983. Sur cet ensemble de publication ont été conservés les auteurs ayant publié au moins cinq articles et dont le total de citations est supérieur ou égal à 129 citations afin de conserver un maximum de 100 auteurs.

Le diamètre des disques colorés correspond au nombre de citations de l'auteur, l'épaisseur des liens correspond aux nombres d'articles communs aux auteurs et caractérise donc la relation entre ces auteurs. Plus les auteurs ont publié ensemble plus ce lien est épais.

Sur la Figure 1-3, une part importante des citations proviennent des articles écrits par le professeur Y. Koren qui a inventé le paradigme des RMS. Le reste des citations est réparti de manière homogène parmi les autres auteurs avec néanmoins une concentration entre quatre auteurs qui sont S. Wang, C. Zhang, D. Li et J. Wan.

<sup>1</sup> <https://www.vosviewer.com>

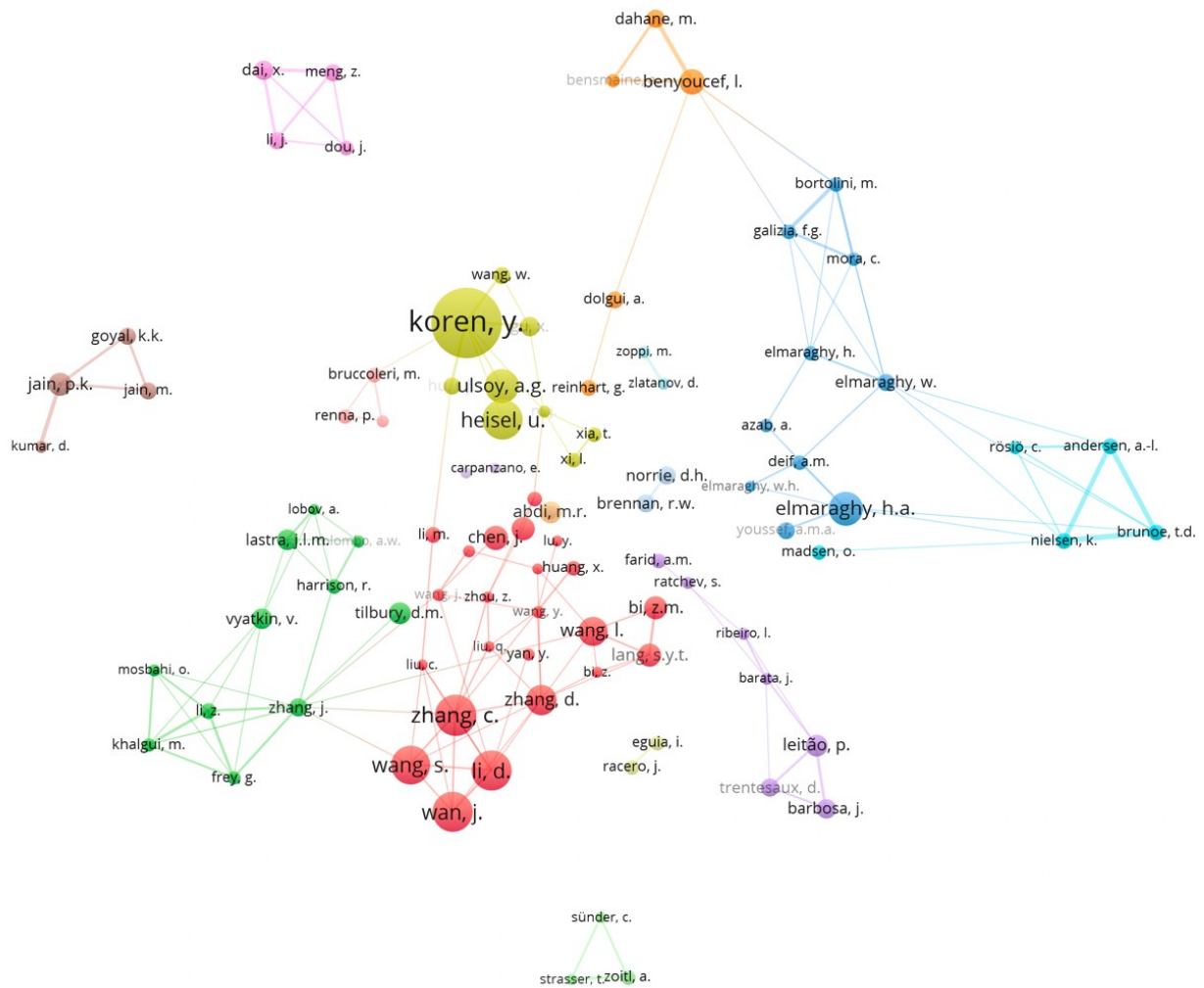


Figure 1-3 : carte des auteurs avec le mot clé "Reconfigurable Manufacturing System"

Les différents systèmes de production existants viennent d'être introduits avec leurs avantages et inconvénients. Dans la partie suivante, nous allons aborder plus en détail le système de production reconfigurable. La Figure 1-4 illustre un RMS. Comme décrit précédemment ce système regroupe les avantages des systèmes dédiés et des systèmes flexibles tout en minimisant leurs inconvénients.

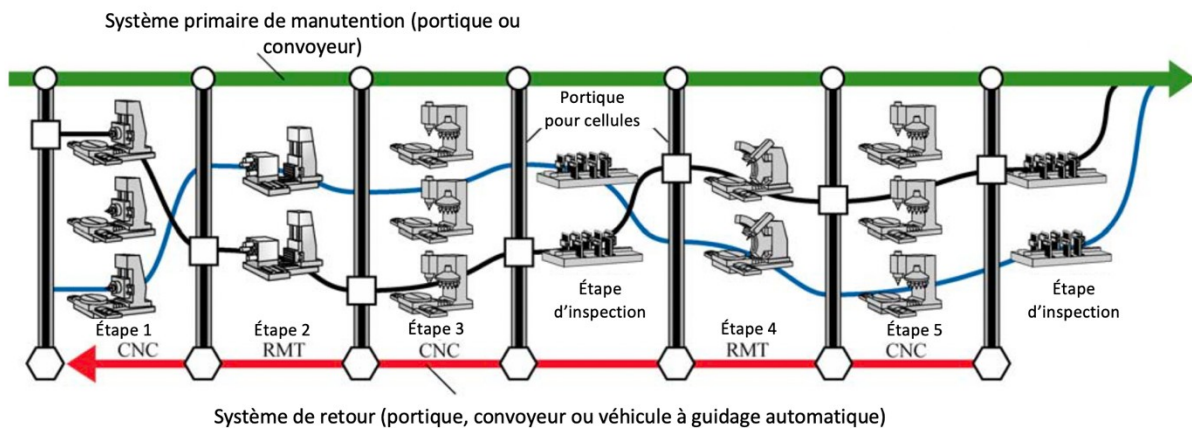


Figure 1-4 : exemple de système de production reconfigurable (Koren et al., 2018)

Comme le montrent les Figure 1-1 et Figure 1-4, un système de production reconfigurable doit être capable d'ajuster rapidement sa capacité de production. Un RMS est également censé intégrer rapidement les nouvelles technologies pour améliorer son efficacité. Le RMS semble être l'outil parfait pour la nouvelle ère de la personnalisation de masse qui exige simultanément la productivité d'un système dédié et la flexibilité d'une fabrication agile (Dolgui, 2010). Cette nouvelle ère est intrinsèquement liée au développement du concept d'usine 4.0 qui exploite la digitalisation et l'automatisation avancée des processus de production, en utilisant des technologies telles que l'internet des objets, l'intelligence artificielle et l'analyse de données. Dans ce contexte, les systèmes reconfigurables peuvent tirer parti des technologies numériques avancées pour optimiser leurs performances. Par exemple, la collecte de données en temps réel à partir de capteurs intégrés aux équipements permet de surveiller et d'analyser les performances de manière précise. Les systèmes reconfigurables peuvent également utiliser l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique pour optimiser les décisions de reconfiguration et améliorer la planification de la production. En combinant les principes de l'industrie 4.0 et les concepts des systèmes reconfigurables, les entreprises peuvent créer des environnements de production plus agiles, adaptables et performants. Les technologies de l'industrie 4.0 fournissent les outils nécessaires pour collecter, analyser et utiliser les données en temps réel, tandis que les systèmes reconfigurables offrent la flexibilité opérationnelle pour s'adapter aux changements et optimiser les processus. Bien qu'il soit pertinent de considérer l'industrie 4.0 et les systèmes reconfigurables conjointement, notre choix consiste dans cette partie à se concentrer uniquement sur les RMS.

#### 2.4. Présentation des domaines de recherches

La Figure 1-5 présente l'ensemble des domaines de recherche afférents aux RMS qui est listé par Bortolini et al. (2018). Le travail effectué dans le cadre de la thèse aborde plusieurs sous-ensembles de ces domaines en se limitant à : l'analyse des caractéristiques des RMS, l'évaluation des niveaux de structuration, les champs d'applications des RMS et l'analyse des performances des RMS. Au contraire, le domaine de la reconfigurabilité au service de l'industrie 4.0 n'est pas abordé. Les domaines et sous-domaines de recherche numérotés d'un à quatre en caractères gras dans la Figure 1-5 sont plus spécifiquement en lien avec les travaux de recherche traités dans ce manuscrit et sont en conséquence développés dans la suite du chapitre. Le domaine n°2 est abordé dans la troisième partie de ce chapitre, offrant une vue d'ensemble générale des niveaux de structuration des RMS. Le domaine n°3 est traité dans la quatrième partie, explorant différentes façons d'organiser les machines dans un atelier avec une prise en compte du développement durable. L'une des sous-parties du domaine quatre, intitulée "Planification et ordonnancement", est également développée dans la quatrième partie du chapitre. Le domaine n°1 est examiné dans la cinquième partie, mettant en évidence le choix d'utiliser des RMS dont les caractéristiques conviennent aux choix précédemment faits. Enfin, le domaine n°4 est étudié dans la sixième partie, permettant de déterminer le choix du mode de transport.

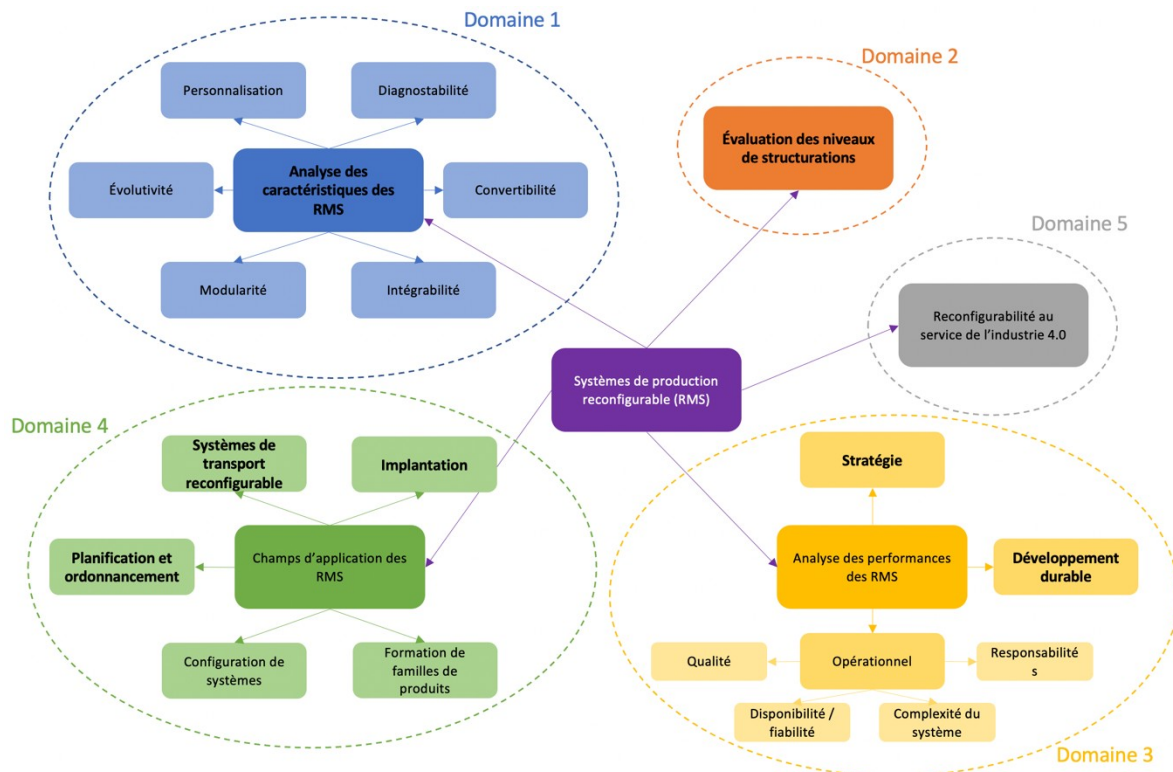


Figure 1-5 : schéma des domaines de recherche du RMS (Bortolini et al., 2018)

### 3. Niveaux de structuration des RMS

Cette section examine en détail les différents niveaux de production auxquels se rapportent les systèmes de production reconfigurables. Comme indiqué sur la Figure 1-6, une usine possède six niveaux de structuration (ElMaraghy, 2009). Chaque modification d'un niveau de structuration peut impacter la productivité de l'usine.

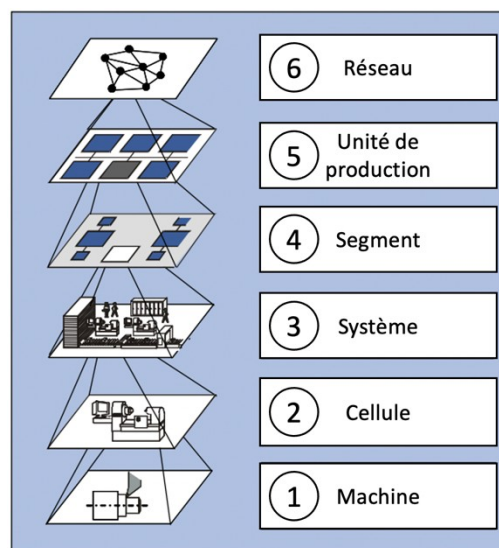


Figure 1-6 : hiérarchie des niveaux de production (ElMaraghy, 2009)

- Niveau machine : un système de production reconfigurable est composé de machines-outils à commande numérique ainsi que de machines reconfigurables (niveau de structuration 1). Ces dernières sont de différents types : machines-outils reconfigurables (Figure 1-7), machines d'inspection reconfigurables (reconfigurable inspection machines ou RIM), montages reconfigurables et machines d'assemblage reconfigurables (RECONFIGURABLE ASSEMBLY MACHINES ou RAM) (Koren et Shpitalni, 2010).

Une machine-outil reconfigurable peut être utilisée comme un groupe de machines en modifiant sa configuration pour répondre à différentes exigences de fabrication. Une telle machine-outil est généralement conçue avec des modules, qui peuvent être assemblés et désassemblés pendant la phase d'exploitation, afin d'obtenir différentes configurations. L'utilisation des RMT peut permettre de diminuer le nombre de machines différentes employées dans un système de production via la mise en œuvre des différents modules utilisables par la machine comme mentionnée sur l'exemple de la Figure 1-7-a.

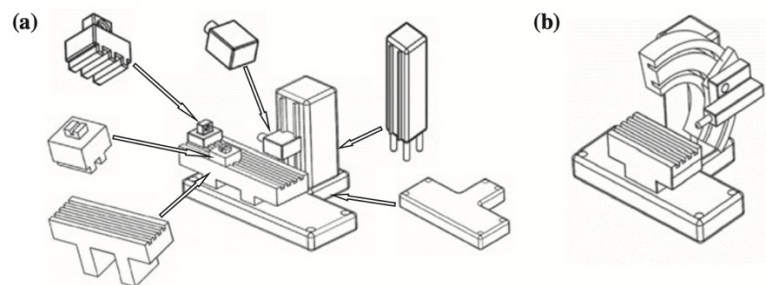


Figure 1-7 : RMT à architecture modulaire (a) et à architecture intégrale (b) (Gadalla et Xue, 2017)

- Niveau cellule : une cellule de production est généralement responsable de l'exécution d'un ensemble spécifique d'opérations ou de tâches liées à la fabrication d'une pièce ou d'un assemblage. Les machines, équipements et opérateurs associés à ces opérations similaires ou successives sont regroupés au sein de cellules, ce qui permet une coordination efficace des activités et une optimisation des flux de production. Cette structuration en cellules facilite la gestion et la coordination des processus de production, tout en offrant une certaine flexibilité pour s'adapter aux changements et aux variations de la demande.
- Niveau système : agrégation de plusieurs cellules de production. Ce niveau représente un regroupement de ces cellules qui travaillent ensemble pour fabriquer différentes variantes d'une pièce ou d'un produit, souvent appelées familles de produit. Le niveau système vise à assurer la coordination et la synchronisation des activités entre les cellules, permettant ainsi une gestion globale de la production et une optimisation des flux de produits et d'informations.
- Niveau segment : dans ce niveau, les segments sont des lignes de production distinctes où des produits entiers sont généralement fabriqués et préparés pour l'expédition. Ils regroupent souvent des installations spécifiques telles que les zones de fabrication, d'assemblage, de stockage tampon, de contrôle qualité et d'emballage. Les segments permettent une organisation plus spécifique des processus de production et facilitent la gestion des flux de produits et des opérations spécifiques à chaque segment.
- Niveau unité de production : le niveau « unité de production » est composé de tous les éléments qui constituent un système de production reconfigurable tel que les machines



reconfigurables, les postes de travail, les cellules, les systèmes de transport, etc. (Yelles-Chaouche et al., 2020). C'est à ce niveau que va être déterminé l'emplacement des postes de travail ainsi que l'ensemble des flux de production. La reconfiguration d'un système de fabrication est une décision critique et implique généralement un processus plus long. La procédure typique utilisée dans l'industrie pour la synthèse de configuration consiste à générer d'abord une configuration approximative en utilisant des méthodes d'optimisation ou de simulation de flux. Dans le cadre d'amélioration d'un système dans son ensemble, c'est le niveau unité de production qui est étudié.

- Niveau réseau : le 6<sup>e</sup> niveau de structuration, représente le niveau le plus élevé de structuration. Il fait référence à la connectivité des unités de production géographiquement séparées qui sont reliées par des flux de matières et d'informations le long de la chaîne d'approvisionnement. Ce niveau implique la coordination et la gestion des activités entre différentes installations de production, telles que des usines, des entrepôts ou des centres de distribution. Le niveau réseau vise à optimiser la coordination globale des opérations, à améliorer la visibilité et l'échange d'informations tout au long de la chaîne d'approvisionnement, ainsi qu'à maximiser l'efficacité et la réactivité du système de production reconfigurable dans son ensemble.

Parmi l'ensemble des niveaux précédents vus, nous nous focaliserons sur le niveau 5 (unité de production). Ce niveau est choisi parce qu'il nous permet de traiter un atelier dans son ensemble et donc d'aborder le problème du placement de l'ensemble des machines de l'atelier pour répondre à la demande de produits tout en satisfaisant certains critères jugés importants au niveau de l'organisation.

## 4. Analyse des performances des RMS

Après avoir examiné les différents niveaux de structuration des RMS, cette quatrième partie porte sur l'analyse des performances des systèmes de production reconfigurables. Dans cette partie, quatre stratégies d'organisation des RMS sont présentées dans un premier temps. Il y a les lignes de production reconfigurables, les systèmes de production reconfigurables en cellule, les systèmes matriciels et les systèmes sans ligne fixe. Dans un second temps, l'aspect développement durable des systèmes de production reconfigurables est présenté.

### 4.1. Stratégie d'organisation de système de production reconfigurable

Un système de production reconfigurable (RMS) est principalement composé d'un ensemble de machines reconfigurables, qui sont disposées d'une certaine manière pour fabriquer une famille donnée de produits tout en assurant une capacité de production souhaitée. La disposition de ces machines définit le type de système de fabrication, dont le choix est un enjeu majeur dans la phase de conception des RMS. Il s'agit d'une décision stratégique, coûteuse en termes d'investissement, qui a un impact direct sur la productivité et la qualité des produits (Koren, 2010).

#### 4.1.1. Lignes de production reconfigurables

Ces lignes sont conçues pour être adaptables et reconfigurables afin de répondre aux changements de produits, de volumes ou de processus de production. Elles permettent de modifier rapidement la configuration des machines, l'agencement des postes de travail et les

flux de production pour s'adapter aux besoins changeants. La Figure 1-8 montre la structure de base de ce type de lignes qui se trouve généralement dans les lignes reconfigurables d'assemblage ou d'usinage (Yelles-Chaouche et al., 2020).

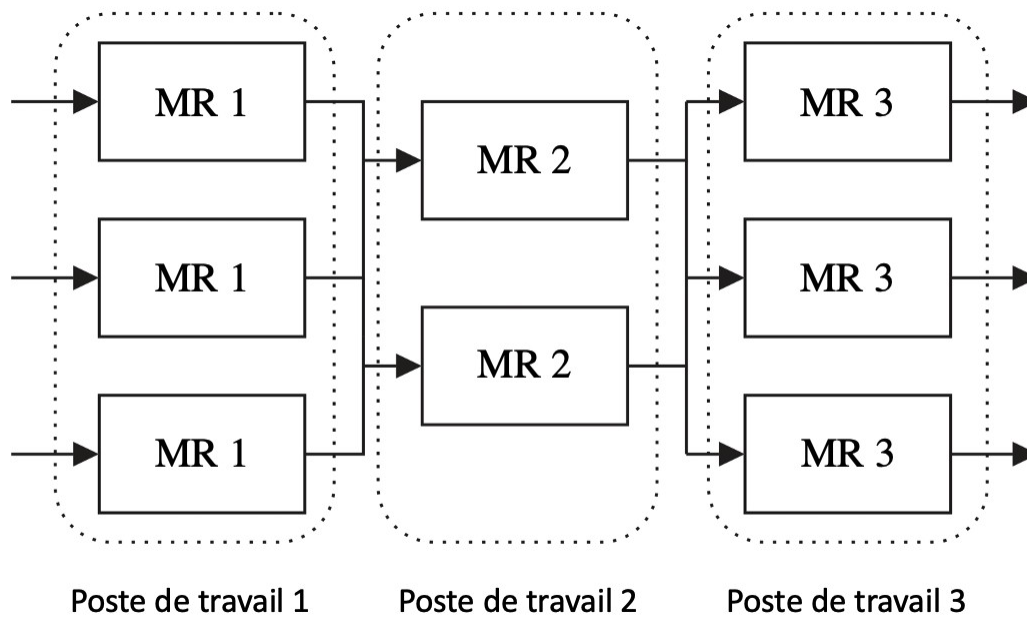


Figure 1-8: ligne de production reconfigurable (Yelles-Chaouche et al., 2020)

Dans les lignes de production reconfigurables, les postes de travail sont équipés de machines reconfigurables (RMT) ou de machines à commande numérique parallèles identiques. Cette configuration s'est avérée très efficace (Koren et al., 2017), car elle offre une grande évolutivité en permettant l'ajout de nouvelles machines. De plus, elle garantit une robustesse face aux pannes ou à l'indisponibilité des machines (Carlo et al., 2012; Ashraf et Hasan, 2018). Dans ce type de ligne, la reconfigurabilité est obtenue grâce à la possibilité d'ajouter ou de retirer des machines, ainsi qu'en utilisant des RMT pour s'adapter aux flux de production. Cette approche permet une flexibilité et une adaptabilité accrues tout en maintenant des performances fiables et résilientes face aux imprévus.

#### 4.1.2. *Systèmes de production cellulaires reconfigurables*

Les systèmes de production cellulaires reconfigurables sont des systèmes de fabrication flexibles qui permettent de produire différents types de produits en utilisant des cellules de production modulaires et reconfigurables (Yu et al., 2012; Aljuneidi et Bulgak, 2016). Dans un système de production cellulaire reconfigurable, les différentes étapes de production sont regroupées en cellules de production autonomes (Bennett, 2015). Chaque cellule de production est équipée de machines, d'équipements et de robots spécialisés dans une ou plusieurs étapes du processus de fabrication (Figure 1-9). Ces systèmes sont conçus pour répondre aux demandes changeantes du marché et pour s'adapter rapidement à de nouveaux produits ou à des variations dans les spécifications des produits existants. Selon Wemmerlov and Johnson (1997), l'implémentation d'un système de production cellulaire entraîne une réduction significative du temps de passage et du temps de réponse aux demandes des consommateurs. De plus, cela permet également de réduire les temps et les distances de transport des produits, tout en améliorant la qualité des produits. Ces cellules de production

peuvent être facilement reconfigurées pour s'adapter à de nouvelles tâches ou à de nouvelles séquences de production.

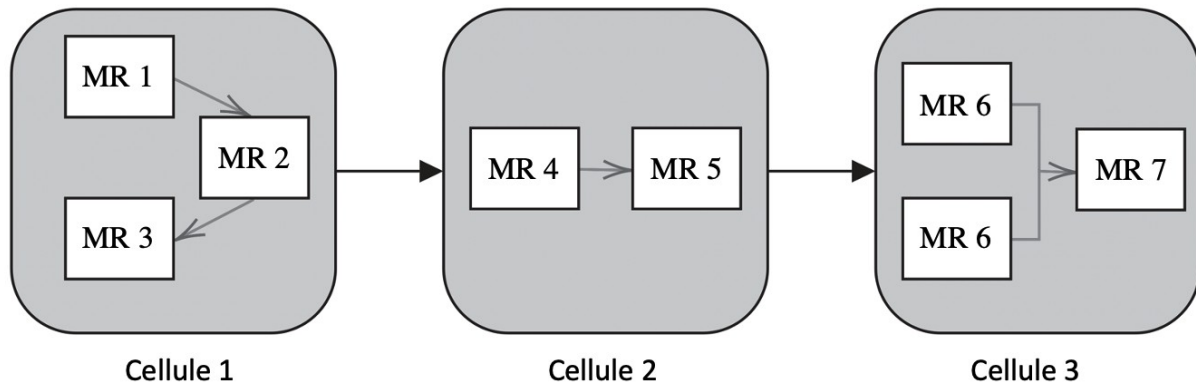


Figure 1-9 : système de fabrication cellulaire reconfigurable (Yelles-Chaouche et al., 2020)

#### 4.1.3. Systèmes de production matricielle

Les systèmes de production matricielle (MATRIX-STRUCTURED MANUFACTURING SYSTEMS ou MMS) sont des systèmes dans lesquels l'ensemble des machines est positionné sous forme de matrice dans l'usine (Figure 1 -10). D'après Schönemann et al. (2015) dans un tel système, les postes de travail sont capables d'effectuer différentes tâches et séries d'opérations pour différents types de produits. Les séries d'opérations peuvent être traitées sur différents postes de travail, ce qui permet d'éviter l'inactivité ou le blocage des machines. Les produits sont transportés de manière autonome à travers le MMS en prenant des décisions décentralisées telles que la sélection de la prochaine station de travail appropriée. Par conséquent, l'acheminement des produits n'est pas prédéterminé (Figure 1 -10). La sélection d'une station de travail peut être basée sur des objectifs d'optimisation prédéfinis et individuels, tels qu'un temps/distance de transport, un délai d'exécution, un délai de livraison, etc. Cela conduit à un comportement dynamique et stochastique du système, ce qui accroît la complexité des tâches de planification.

Ainsi, la Figure 1 -10 décrit un ensemble de 9 postes de travail capables de réaliser différentes tâches ( $T_{11}$  et  $T_{21}$  pour le poste 1,  $T_{11}$ ,  $T_{21}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{22}$  pour le poste 2, etc.). Sept produits sont identifiés par un numéro de 1 à 7, appartenant à deux familles de produits différents P1 et P2. Sur la Figure 1 -10, le produit identifié par le numéro 6 est prêt à quitter le poste 1 et il a le choix de sa destination entre les postes 2, 4, 5, 6 et 8. Ces postes sont définis par les tâches qu'ils peuvent réaliser. En l'occurrence le produit 6 après avoir fini la tâche 1.1 sur le poste 1 doit réaliser la tâche 1.2 sur l'un des postes précédemment évoqués. Idem pour le produit identifié par le numéro 2 présent sur le poste 5.

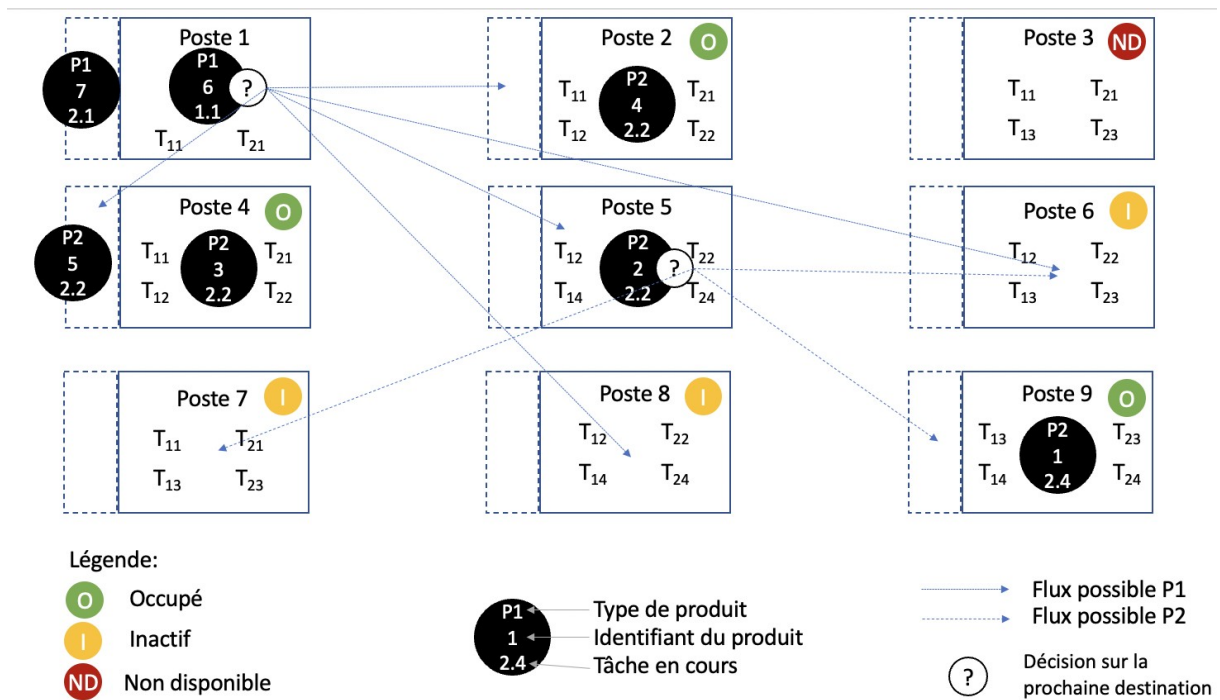


Figure 1-10 : scénario illustrant le fonctionnement d'un MMS (Schönemann et al., 2015)

#### 4.1.4. Systèmes de production sans ligne fixe

Ce nouveau concept a été introduit par Hüttemann et al. (2019) qui le définit comme une forme d'organisation de la production spécifiquement conçue pour les produits de grande taille. L'ensemble du matériel est mobile et en fonction des produits à assembler, une ligne est construite sur mesure (Figure 1-11).

Ainsi les systèmes de production mobiles sans ligne fixe reposent sur trois principes fondamentaux :

- le premier principe, appelé l'approche du « sol propre », se concentre sur la conception d'une usine offrant un vaste espace d'atelier sans obstacle physique tel que colonnes de support, machines fixes ou infrastructures de stockage qui sont susceptibles d'entraver la reconfiguration et les mouvements des ressources en raison de contraintes spatiales. L'objectif est de créer un atelier spacieux et libre, considéré comme une zone de transit étendue, permettant l'exécution des processus de production à tout moment et en tout lieu. Cette approche favorise la flexibilité et facilite la reconfiguration rapide des ressources pour répondre aux besoins changeants de production.
- le second principe, essentiel à l'application de l'approche du « sol propre », concerne la mobilité de toutes les entités impliquées dans l'atelier. Il englobe la possibilité de mouvement de toutes les entités liées à la production. Ces entités comprennent à la fois celles liées au produit lui-même (comme le produit principal et les pièces) et toutes les ressources de production telles que les machines de production, les systèmes de métrologie pour le contrôle robotique, les systèmes d'échange d'outils et les dispositifs de fixation. L'objectif est de garantir que toutes les entités requises pour le processus de production puissent être déplacées, réaffectées ou reconfigurées facilement et efficacement afin de répondre aux besoins de production changeants.

- Le troisième principe concerne l'affectation libre et sans restriction des ressources et des produits aux emplacements et aux tâches correspondantes. En d'autres termes, un système de production peut être entièrement reconfiguré en modifiant non seulement les ressources individuelles chargées d'exécuter différentes tâches, mais également les emplacements où les processus sont effectués. Cela signifie que les ressources et les produits peuvent être assignés et réaffectés de manière flexible pour s'adapter aux besoins changeants de production. L'avantage de ce principe est qu'il offre une grande souplesse dans la configuration et l'optimisation des ressources, ce qui permet d'améliorer l'efficacité et de répondre rapidement aux variations de la demande ou aux changements dans les spécifications des produits.

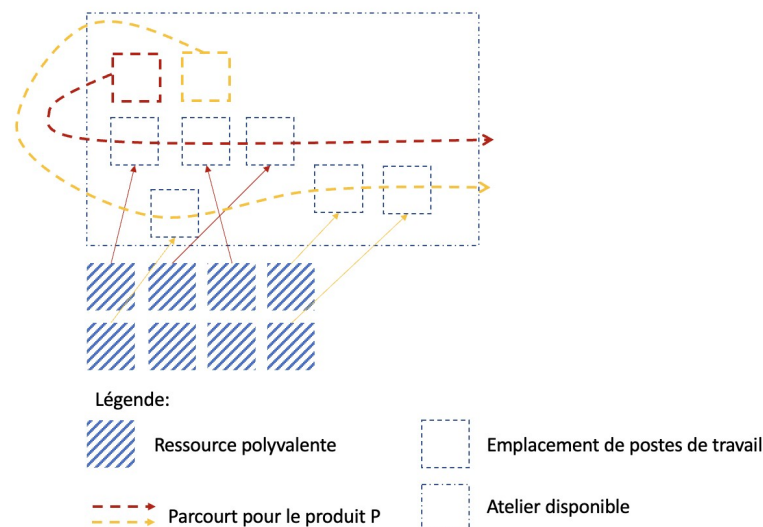


Figure 1-11 : systèmes de production mobiles sans ligne fixe, vue d'ensemble (Hüttemann et al., 2019)

Parmi l'ensemble des systèmes de production vus, le travail développé dans la thèse s'appuie sur un système de production matricielle.

#### 4.2. Développement durable

Dans la littérature, le développement durable en lien avec les RMS comporte trois composantes (Battaïa et al., 2020) : économique, environnementale et sociale. Dans cette partie, la composante environnementale est étudiée, en particulier l'efficacité énergétique des RMS. Un des aspects est la consommation globale du système de production. Cette partie présente différentes visions d'économie énergétique concernant les RMS. Choi et Xirouchakis (2015) ont développé un modèle qui intègre les considérations environnementales et la consommation d'énergie lors des changements de capacité dans un environnement de fabrication reconfigurable. Leur étude consiste à analyser les différentes configurations d'un système de production reconfigurable (RMS) afin d'évaluer de manière dynamique sa performance en fonction de divers critères de durabilité et de productivité. L'objectif est de comprendre l'impact des reconfigurations sur les aspects environnementaux et la consommation d'énergie, tout en prenant en compte les exigences de performance et de productivité. Cette approche permet d'optimiser la configuration du système de fabrication en tenant compte à la fois des objectifs de durabilité et de productivité. Zhang et al. (2015) ont introduit le concept de système de fabrication reconfigurable et économe en énergie, connu

sous le nom de REMS (RECONFIGURABLE AND ENERGY-EFFICIENT MANUFACTURING SYSTEM). Ils ont également proposé un modèle de simulation à événements discrets pour évaluer son efficacité énergétique. Le REMS vise à optimiser l'utilisation de l'énergie dans les opérations de fabrication en intégrant des fonctionnalités de reconfiguration afin d'adapter les ressources et les processus aux besoins spécifiques. Le modèle de simulation permet d'analyser et de mesurer l'efficacité énergétique du REMS en simulant différentes configurations et scénarios de production. L'objectif est d'identifier les améliorations potentielles pour réduire la consommation d'énergie et favoriser une utilisation plus efficace des ressources dans le système de fabrication reconfigurable. L'étude de Liu et al. (2019) s'est focalisée sur un système reconfigurable composé d'une table rotative et de modules d'usinage. Les auteurs ont abordé la phase de conception en optimisant la productivité, puis ont intégré les coûts énergétiques lors de la phase de fonctionnement. Cela leur a permis d'analyser l'efficacité du système à la fois en termes de productivité et de consommation d'énergie. Ghanei et AlGeddawy (2016) ont considéré un problème d'ordonnancement où la flexibilité et l'évolutivité du système de fabrication sont utilisées pour optimiser la production en fonction des variations des prix de l'énergie. Masmoudi et al. (2019) étudient un problème d'ordonnancement d'atelier en considérant le facteur de coût énergétique et les contraintes de pics de puissance. Pour cela, les auteurs proposent deux modèles de programmation entiers : une formulation disjonctive et une formulation indexée sur le temps. Les résultats ont montré que la formulation indexée sur le temps est plus performante que la formulation disjonctive.

Dans le cadre de la thèse, une des fonctions objectif utilisées concerne la consommation d'énergie. Cette fonction est utilisée afin d'étudier les leviers permettant de limiter ou réduire cette consommation énergétique.

### 4.3. Planification et ordonnancement des agencements de machines

Dans un environnement RMS, la planification et l'ordonnancement de la production deviennent de plus en plus complexes, car le système doit être à la fois fiable et rapide (Hees et Reinhart, 2015) avec des exigences élevées en termes de performance et de qualité (Zhao, 2011). Pour cela, il convient de définir au préalable le nombre de périodes de production qui est visible, soit l'horizon de visibilité. En plus de la planification de la production, l'ordonnancement va jouer un rôle dans la séquence de transport des produits entre machines. Dans le cadre d'un RMS, la planification devient plus complexe, car elle doit intégrer la possibilité d'une reconfiguration du système de production lors d'un changement de production. De même, l'ordonnancement doit aussi intégrer la séquence de déplacement des machines lors d'une reconfiguration.

#### 4.3.1. Approche de la planification

Avant d'agencer l'ensemble des machines, il convient de se demander sur quel horizon travailler et si cet horizon doit être découpé en plusieurs périodes ou non. Ainsi Gupta et Seifoddini (1990) affirment qu'un tiers des entreprises américaines procèdent à une réorganisation majeure de leurs équipements de production tous les deux ans.

En fonction de la variabilité du flux de produits pendant l'horizon de planification, le problème peut être considéré comme mono-période avec une production constante pendant une longue période, ou multi-période avec une production constante sur une courte période (semaine, mois ou année) et un enchaînement de plusieurs périodes.

#### 4.3.1.1. Mono période

Lorsque l'agencement d'un système de production est planifié, en supposant que le flux de produits entre les postes de travail reste constant sur toute la période de planification, cela constitue un problème d'implantation mono-période. Cette approche est généralement recommandée pour les systèmes de production à faible coût (Moslemipour et al., 2017). Cependant, pour les systèmes de production plus agiles ou personnalisés, dans lesquels les demandes peuvent varier considérablement sur de courtes périodes, une approche plus flexible et réactive, prenant en compte plusieurs périodes doit être prise en compte.

#### 4.3.1.2. Multi-périodes

Dans la plupart des secteurs industriels, prendre en compte une conception unique peut se révéler peu pratique, car le flux de produits est sujet à des variations dans le temps. Les entreprises doivent constamment s'adapter aux évolutions du marché en ajustant leur capacité de production, en adoptant de nouvelles technologies, en développant de nouveaux produits/services et en améliorant leurs processus. Ainsi, concevoir des agencements suffisamment flexibles devient essentiel pour faire face à ces changements (Emami and S. Nookabadi, 2013).

- Flexible : lors de la planification d'agencements flexibles, un schéma d'agencement optimal est conçu pour chaque période donnée afin de minimiser non seulement les coûts totaux de transport des produits, mais aussi ceux liés à l'agencement des postes de travail. Ces agencements multi-périodes flexibles ont été plus fréquemment traités dans la littérature au cours de la dernière décennie : 38 articles sur 44 soit 86,36% basés sur une recherche dans le moteur Web of science sur les années 2010-2019 (Pérez-Gosende et al., 2020). Lors d'une nouvelle période, une nouvelle configuration peut être établie.
- Cyclique : Kulturel-Konak et Konak (2015) ont introduit les agencements cycliques comme un cas particulier d'agencements multi-périodes. Avec cette approche, l'horizon de planification est divisé en  $n$  périodes avec  $n \in \{1, \dots, T\}$ . Après la période  $T$ , la matrice des flux de produits entre les postes de travail revient à son état initial. Outre la demande de produits, les besoins en surface de certains postes de travail peuvent également varier selon les périodes.
- Robuste : dans cette approche, l'objectif est de trouver un schéma d'agencement qui correspond au meilleur compromis pour satisfaire l'ensemble des demandes de production qui vont s'enchaîner (Moslemipour et al., 2017). Ainsi sans modification du schéma d'agencement, aucun coût de reconfiguration n'est engendré (hormis la mise en place de la configuration initiale, si besoin). La conception robuste n'est pas nécessairement une conception optimale pour une période donnée, mais elle s'avère appropriée tout au long de l'horizon de planification temporaire, car elle minimise le coût du transport des produits (Madhusudanan Pillai et al., 2011). Cependant, une telle approche ne permet pas d'obtenir un schéma d'agencement optimal pour chaque période, entraînant ainsi une diminution de l'optimalité à chaque période (Peng et al., 2018). Cette approche est idéale pour les situations dans lesquelles les coûts de déplacement des machines sont significatifs (Moslemipour et al., 2017), surtout

lorsque des machines lourdes sont nécessaires pour accomplir les tâches requises. Malgré son importance, cette approche est à notre connaissance peu étudiée dans la littérature au cours des années 2010-2020 (5 articles sur 44, 11,36 %)(Pérez-Gosende et al., 2021).

#### 4.3.2. Ordonnancement

L'ordonnancement consiste à planifier et organiser les tâches ou activités dans le temps tout en respectant certaines contraintes (telles que les ressources disponibles ou les délais de fabrication) dans le but d'optimiser un ou plusieurs critères. Cette étape lie les données de conception d'un produit à sa fabrication. Elle détermine le processus de fabrication ainsi que les ressources nécessaires pour réaliser les différentes opérations requises lors de la production du produit. Le problème d'ordonnancement des activités implique de prendre des décisions à court terme concernant la séquence de distribution des pièces dans les systèmes, le choix de la combinaison opération/machine et l'ordre dans lequel les pièces sont attribuées à chaque machine (Doh et al., 2016). Dans le contexte des systèmes de production reconfigurables (RMS), l'ordonnancement joue un rôle crucial pour déterminer l'ordre de passage des produits, choisir les machines appropriées et adapter ou modifier le RMS pour les produits suivants. De plus, l'ordonnancement des produits peut également influencer la consommation énergétique du RMS.

### 5. Caractéristiques des RMS

Le système de production reconfigurable doit satisfaire plusieurs caractéristiques qui sont listées et développées par Capawa Fotsoh et al. (2020). Ces 9 caractéristiques sont réparties équitablement dans trois catégories : i) le fonctionnement (parties : 5.1., 5.2., 5.3.), ii) les objectifs du système de production, à savoir allier flexibilité et productivité (parties : 5.4., 5.5., 5.6.), iii) la conception des RMS (parties : 5.7., 5.8., 5.9.).

#### 5.1. Stratégie de reconfiguration

La transition d'une configuration à une autre s'appelle une reconfiguration. Trois niveaux de reconfiguration ont été définis par Ketfi (2005) et Kanso (2010) :

- le niveau 0 consiste à agir sans arrêter le système. À ce niveau de reconfiguration, aucune modification de la structure du système n'est requise. Cela signifie que le système peut être ajusté en cours de fonctionnement ou pendant des temps d'arrêt très courts sans nécessiter de changements structurels majeurs. La flexibilité offerte par ce niveau de reconfiguration permet d'apporter des corrections ou des ajustements rapidement, sans perturber de manière significative les opérations en cours. Cette capacité à effectuer des adaptations sans altérer la structure du système est un atout précieux pour maintenir l'efficacité et la performance du système même en présence de changements ou d'imprévus.
- le niveau 1 consiste à modifier le système pour répondre aux changements de la demande ou de l'environnement du système. À ce niveau de reconfiguration, des changements dans les fonctionnalités du système sont nécessaires. Cela implique soit



l'ajout de machines déjà disponibles, soit la repositionnement ou la réaffectation des machines existantes. Ces ajustements sont réalisés afin d'adapter le système aux nouvelles exigences de production, aux variations de la demande ou à tout autre changement dans le processus de fabrication. Ce niveau de reconfiguration implique des modifications plus substantielles dans le fonctionnement du système, mais il permet de répondre efficacement aux besoins changeants et d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

- le niveau 2 consiste également à modifier le système, mais avec un effort plus important entraînant l'arrêt du système. À titre d'exemple, on pourrait ajouter au système un composant spécialement conçu pour faciliter la reconfiguration. Ce composant pourrait être une interface modulaire, un logiciel de gestion des ressources ou un système de contrôle adaptatif. En intégrant ce nouvel élément, le système serait en mesure de s'ajuster rapidement et efficacement aux changements requis sans perturber son fonctionnement global. Cette approche permettrait d'améliorer la flexibilité et l'adaptabilité du système, ce qui serait particulièrement avantageux dans des environnements en évolution constante. En ajoutant des composants dédiés à la reconfiguration, le système serait mieux équipé pour répondre aux défis changeants et optimiser ses performances dans des conditions variables.

## 5.2. Personnalisation

La personnalisation se réfère à la capacité du système à produire, au sein d'une famille de produits partageant des caractéristiques communes, un produit spécifique répondant aux besoins d'un client particulier. C'est l'une des possibilités d'évolution du produit. Dans le cadre d'une famille de produits, la personnalisation est contrôlée par un catalogue de variantes possibles (Koren et al., 1999). Un système de production reconfigurable doit être en mesure de produire chaque produit personnalisé sans nécessiter de changements radicaux dans sa configuration. Pour y parvenir, la configuration d'un RMS peut être adaptée selon les plages de caractéristiques spécifiques à la famille de produits. La personnalisation du RMS peut être réalisée en utilisant plusieurs outils sur la même machine ou en utilisant des machines dédiées.

## 5.3. Possibilité de diagnostic

Koren et Shpitalni (2010) définissent la possibilité de diagnostic comme « *la capacité de lire automatiquement l'état actuel d'un système pour détecter et diagnostiquer les causes profondes des défauts de production et corriger rapidement les défauts opérationnels.* ». Cette caractéristique permet de localiser et de traiter les défaillances de manière à ne pas pénaliser le système. Pour y parvenir, il est nécessaire d'adopter une stratégie de reconfiguration spécifique à la situation. En fonction des causes de défaillance observées, le système peut être modifié légèrement ou profondément.

## 5.4. Évolutivité

L'évolutivité d'un système de production reconfigurable fait référence à sa capacité à s'adapter, évoluer et se développer au fil du temps pour répondre aux changements des besoins de production, des spécifications des produits, des contraintes de fabrication ou des demandes du marché (Koren et al., 2018). Un système de production reconfigurable évolutif

est conçu de manière à pouvoir être modifié, étendu ou adapté de manière flexible sans nécessiter de changements majeurs ou de remplacement complet. L'évolutivité permet au système de rester compétitif et performant dans un environnement en constante évolution. Cela peut inclure l'ajout de nouvelles machines, l'intégration de technologies avancées, l'optimisation des processus de production ou même la reconfiguration de l'agencement des ressources pour améliorer l'efficacité et la productivité. L'avantage de l'évolutivité est de permettre au système de s'adapter rapidement aux variations de la demande, aux changements des préférences des clients, aux avancées technologiques ou à toute autre évolution du contexte industriel. Cela assure la pérennité du système et permet d'investir de manière plus durable dans une infrastructure de production, car celle-ci peut être adaptée au fil du temps pour répondre aux défis futurs.

### 5.5. Convertibilité

La convertibilité est la capacité de transformer la fonctionnalité des systèmes et des machines existants pour répondre aux nouvelles exigences de production (Koren et al., 1999). Cela peut concerner les machines, la structure globale du système ou du système de contrôle de la production. Dans le cas des machines, la convertibilité concerne les outils de production reconfigurables. Cela consiste à modifier une partie d'une machine pour qu'elle soit capable de réaliser une action auparavant impossible. Cependant si l'opération demandée n'est pas réalisable par la machine, il convient alors de la remplacer. Si l'évolution du système nécessite des tâches à réaliser qui auparavant étaient impossibles, la convertibilité peut conduire à une nouvelle structure du système en ajoutant ou en supprimant des postes de travail qui offrent des possibilités de nouveaux produits. La convertibilité peut également être obtenue en modifiant le système de contrôle de la production.

### 5.6. Adaptabilité

L'adaptabilité fait référence à la capacité du système à ajuster ses opérations, sa configuration ou ses processus pour répondre de manière proactive et réactive aux changements et aux variations de l'environnement de production (Maganha et al., 2018). Contrairement à la convertibilité, qui met l'accent sur la transformation pour réaliser différentes tâches ou produits, l'adaptabilité se concentre davantage sur la capacité du système à s'ajuster en temps réel pour optimiser sa performance face aux imprévus ou aux évolutions du marché. L'adaptabilité permet au système de production de faire face à des situations changeantes en apportant des réponses appropriées. Cela inclut la capacité à changer rapidement de production, à réallouer les ressources en fonction des besoins, à ajuster les priorités de production ou à modifier les processus pour s'adapter aux conditions changeantes. L'objectif est de maintenir la performance, la qualité et l'efficacité du système malgré les perturbations ou les variations imprévues.

### 5.7. Modularité

La modularité fait référence à l'organisation du système en modules autonomes et interchangeables pouvant satisfaire une variété de fonctions (Lameche et al., 2017). Chaque module a des caractéristiques standardisées et est conçu pour exécuter une fonction spécifique. La modularité permet d'assembler et de désassembler facilement des modules pour créer différentes configurations ou agencements du système (Benderbal, 2018).

## 5.8. Intégrabilité

L'intégrabilité fait référence à la capacité d'intégrer harmonieusement différentes composantes, technologies ou modules au sein du système global (Koren et al., 1999). Cela implique de concevoir une architecture cohérente et compatible, permettant aux différents éléments du système de fonctionner ensemble de manière efficace et fluide. L'intégrabilité est essentielle pour assurer le bon fonctionnement du système reconfigurable, car elle garantit que les différentes parties du système peuvent communiquer, échanger des informations et collaborer de manière transparente. Pour cela les interfaces des modules peuvent être matérielle, logicielle ou les deux dans le but de faciliter la communication entre les différentes parties (Lameche et al., 2017). Elle permet également d'assurer une utilisation optimale des ressources et une coordination efficace des opérations.

## 5.9. Mobilité

Dans les systèmes de production reconfigurables, la mobilité fait référence à la capacité des composantes du système, telles que les machines, les équipements ou les modules, à être déplacées facilement d'un emplacement à un autre. Cette mobilité permet de réorganiser l'agencement du système en déplaçant les ressources physiques pour répondre aux besoins changeants de la production. La mobilité est basée sur l'utilisation de moyens de transport (convoyeurs, Robots Mobiles Autonomes (RMA), véhicule à guidage automatique (Automatic Guided Vehicle), etc.). L'intégration de la mobilité dans un système de production reconfigurable permet d'améliorer sa flexibilité, sa réactivité et sa capacité d'adaptation. Cela offre une solution efficace pour optimiser l'utilisation des ressources, ajuster la configuration de production selon les besoins du marché et maintenir la performance du système face aux changements et aux aléas. La mobilité est un élément clé pour garantir la polyvalence et l'efficacité d'un système de production reconfigurable dans des environnements en constante évolution.

Dans le cadre de la thèse, nous souhaitons avoir une vue d'ensemble d'un atelier, pour cela nous faisons le choix de nous situer dans le niveau trois de la stratégie de reconfiguration (déplacement de machines). Nous souhaitons également pouvoir déplacer les machines et les modifier leurs formes. Dans les RMS les caractéristiques offrant ces deux possibilités sont la modularité et la mobilité.

Pour conclure, un système de production est dit reconfigurable s'il respecte plusieurs des précédentes caractéristiques. En compléments de ces caractéristiques, un système de production reconfigurable peut être étudié à différents niveaux de structuration, étudiés dans la partie suivante.

## 6. Champs d'application des RMS

Dans cette partie sont présentés les principaux domaines d'application des RMS proposés par la littérature. Les principaux domaines abordés par les RMS sont les moyens de transport utilisés, la planification des RMS et l'implantation des postes de travail. Seuls ces trois domaines sont présentés parce qu'ils ont un lien direct avec les travaux de recherche entrepris dans cette thèse.

## 6.1. Moyen de transport

Le rôle du moyen de transport est de déplacer des produits d'un point de départ vers une destination d'arrivée. Pour cela, il existe plusieurs moyens différents qui vont être utilisés en fonction de l'objectif. Les trois moyens les plus utilisés sont les convoyeurs, les véhicules à guidage automatique et les robots mobiles autonomes.

### 6.1.1. Convoyeurs

Un convoyeur est un mécanisme ou une machine qui permet le transport d'une charge isolée (cartons, bacs, sacs, etc.) ou de produits en vrac (terre, poudre, aliments, etc.) de façon continue sur un trajet prédéterminé. Les convoyeurs sont plus adaptés pour déplacer une très grande quantité de ressource.

### 6.1.2. Véhicules à guidage automatiques

Les véhicules à guidage automatique (AGV) sont couramment employés dans des contextes industriels pour déplacer des marchandises de manière autonome dans des usines, des entrepôts ou des ateliers. Un véhicule à guidage automatique est un robot qui se déplace de façon autonome sans intervention humaine. Les technologies d'automatisation traditionnelles sont le filoguidage, le laserguidage et l'optoguidage. Cependant, d'autres technologies aussi performantes existent telles que le géoguidage et le guidage par ultrason. Ces robots sont des transporteurs sur roues contrôlés par ordinateur ne nécessitant pas d'opérateur ou de conducteur à bord (Le-Anh et De Koster, 2006). Leur utilisation est principalement axée sur les déplacements horizontaux répétitifs. Toutefois, les AGV présentent un inconvénient en raison de leurs trajets fixes et de leur limitation à des points prédéfinis. Ainsi de petits ajustements, comme la reconfiguration suite à des changements dans l'agencement des machines, demandent généralement beaucoup de temps pour la plupart des AGV, entraînant des périodes d'inactivité et des baisses de productivité (Fragapane et al., 2021).

### 6.1.3. Robots mobiles autonomes

La nécessité d'une flexibilité accrue a conduit au développement de robots mobiles autonomes (RMA), qui se distinguent par leur capacité de navigation ainsi que par les services qu'ils peuvent fournir. Comparativement aux AGV, les RMA offrent une plus grande variété de services, allant au-delà des simples opérations de transport, comme la patrouille et la collaboration avec les opérateurs (Le-Anh et De Koster, 2006). Grâce à leur capacité de prise de décisions autonomes, ces plates-formes mobiles peuvent proposer des solutions flexibles. L'autonomie des RMA implique qu'ils prennent des décisions en permanence sur la manière de se comporter dans un environnement opérationnel, en respectant les règles et les contraintes en vigueur. Un défi de taille réside dans l'absence totale de superviseur humain capable de déterminer le bon fonctionnement d'un RMA. Par conséquent, un RMA doit surveiller son propre état de manière autonome, détecter les éventuelles défaillances du système et réagir de manière appropriée (Fragapane et al., 2021). Cette capacité d'autonomie permet aux RMA d'être plus adaptables et de s'adapter aux situations changeantes, améliorant ainsi leur efficacité et leur utilité dans divers environnements industriels.

Dans le cadre de la thèse, nous souhaitons pouvoir déplacer les machines. Par conséquent il faut choisir un moyen de manutention capable de s'adapter à faible coût à ces changements. C'est pourquoi nous faisons le choix d'utiliser des robots mobile autonome. Ce choix est également motivé par le développement d'un tel robot par l'entreprise EZ-Wheel qui finance la thèse cifre.

## 7. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons passé en revue l'ensemble des éléments et axes de recherche qui traite des systèmes de production reconfigurables. Parmi les différents éléments abordés, nous avons vu l'ensemble des caractéristiques qui définissent les RMS. Nous avons ensuite passé en revue les différents niveaux de structuration d'un RMS pour considérer ensuite les organisations actuelles (ligne, cellule) et à venir (matricielle et sans ligne fixe) sans oublier les éléments de transport entre les différents postes de travail (convoyeur, AGV et RMA).

Le paradigme des RMS étant très large, les recherches se font dans une multitude de domaines différents. Une limite que nous observons dans cet état de l'art est qu'un nombre réduit de publication ont été faite associant les RMS et leur implantation ou réimplantation. Or les caractéristiques des RMS, qui ont été évoquées à la partie deux de ce chapitre, permettent de modifier les machines et leur implantation avec plus de facilité que des machines ne répondant pas à ces critères. Dans le cadre de la thèse, c'est cet axe de recherche que nous choisissons d'exploiter. Un second point qui n'est pas abordé est la possibilité offerte par la modification physique de la forme des machines en utilisant les caractéristiques des RMS comme la modularité et la mobilité. Ces modifications peuvent par exemple influencer l'agencement des machines. Ces deux notions (de configuration et de reconfiguration) sont abordées plus en détail dans le chapitre suivant qui fait l'état de l'art des problèmes d'implantation d'atelier.

Cette thèse Cifre se situe dans le contexte de l'usine du futur. Un des enjeux dans ce domaine se situe notamment dans la transformation des usines existantes, afin qu'elles ne disparaissent pas face à la concurrence et profitent du potentiel énorme de la digitalisation et de la robotique collaborative. Parmi les différents challenges et usages de l'Usine du Futur, le sujet étudié dans cette thèse se focalise sur les problématiques de logistique interne au sein des usines. En effet, ce sujet revêt des caractéristiques très variées, notamment en termes de gestion des flux, éléments transportés et moyens de transport associés.

La société Ez-Wheel<sup>2</sup> est un acteur de cette thématique de l'Usine du Future qui fabrique des roues électriques autonomes qui s'installent sur tout châssis que ce soit des véhicules, engins de transport roulants ou des éléments non roulants. Ces roues, qui intègrent moteur et batteries, apportent une assistance électrique à tout type d'équipement déjà roulant évoluant aussi bien en environnement intérieur qu'extérieur. Ces roues permettent également de rendre mobiles des systèmes jusqu'alors connus comme fixes (tables, postes de travail, caisses à outils, etc.).

C'est pour cela que nous avons fait le choix dans la thèse d'utiliser des RMA de par leur capacité à adapter leurs trajets de façon autonome. Ainsi cette capacité pourra être exploitée lors des reconfigurations d'atelier. La partie ordonnancement permet de définir un ordre optimal de trajet à réaliser par le RMA pour déplacer un ensemble de produits.

<sup>2</sup> <https://www.ez-wheel.com/>



## Chapitre 2 : les problèmes d'implantation d'atelier (PIA)

### 1. Introduction

Le chapitre précédent s'est conclu par les champs d'application des RMS. Parmi ces derniers, un domaine qui n'a pas été évoqué précédemment concerne le placement des machines dans un atelier. Cette problématique est connue en anglais sous l'appellation FACILITY LAYOUT PROBLEM (FLP).

Les premiers à évoquer cette problématique sont Koopmans et Beckmann (1957) qui donnent la définition suivante : « un problème industriel courant dans lequel l'objectif est de configurer des postes de travail de manière à minimiser le coût de transport des produits ». D'autres définitions existent également comme celle plus globale de Heragu (2016) qui précise que « l'aménagement d'une installation est la disposition de tout ce qui est nécessaire à la production de biens ou à la prestation de services ». Shayan et Chittilappilly (2004) définissent quant à eux le problème d'implantation d'atelier comme « un problème d'optimisation qui tente de rendre les aménagements plus efficaces en tenant compte des diverses interactions entre les installations et les systèmes de transport lors de la conception des aménagements ».

Le domaine de recherche des PIA est un domaine actif avec plus de 2000 publications (article de conférences, articles, revues de conférence, chapitres de livre, revues, livres) sur les 17 dernières années (Figure 2-12) recensées dans la base de données de Scopus en utilisant les mots clés « Facility Layout Problem ». Sur la Figure 2-12, nous pouvons remarquer une croissance de la quantité de publication sur les 17 dernières années. Une courbe de tendance est également affichée (en orange) sur la Figure 2-12. Nous remarquons que cette courbe est croissante signifiant un intérêt progressif pour ce domaine de recherche.

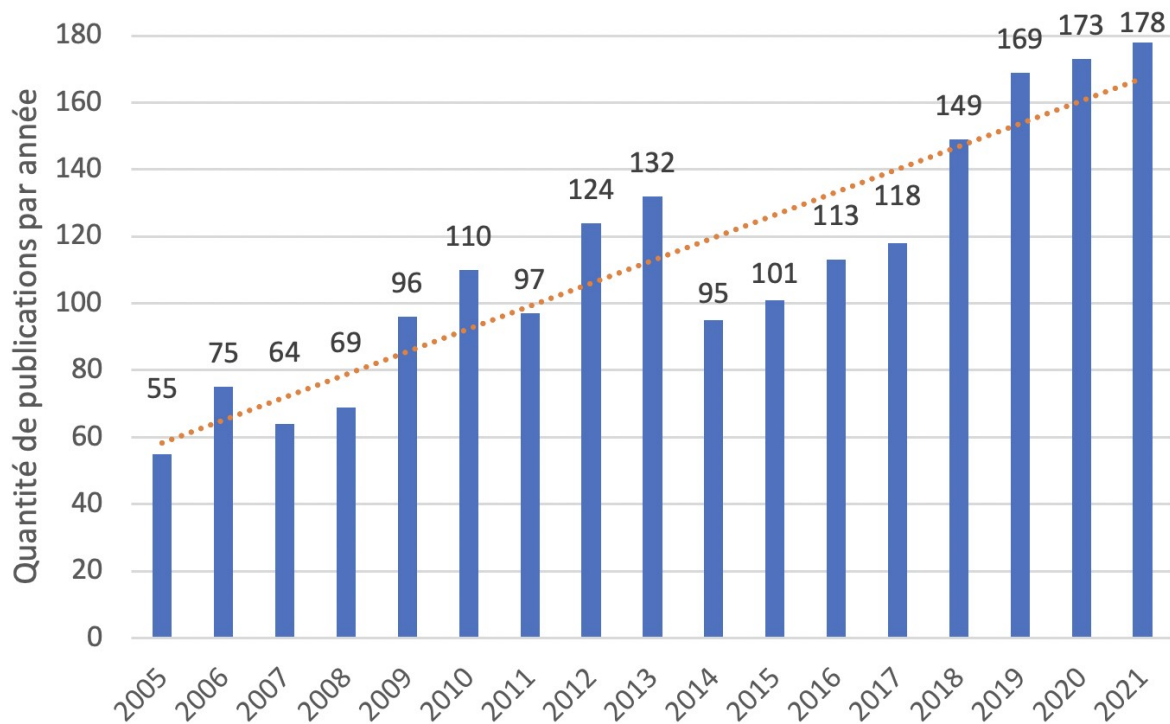


Figure 2-12 : quantité de publications par année avec le mot clé "Facility Layout Problem"

La Figure 2-13 présente une carte des auteurs avec le mot clé "Facility Layout Problem". La liste provient de la base de données Scopus. Il y a au total 2724 publications recensées depuis 1957. Sur cet ensemble de publications ont été conservées les auteurs ayant publié au moins 5 articles et dont le total de citations est supérieur ou égale à 96 citations afin de conserver un maximum de 100 auteurs. Compte tenu de la date de la première publication, ce domaine de recherche est très ancien.

Le diamètre des disques correspond au nombre de citations pour l'ensemble des articles de l'auteur et l'épaisseur des liens correspond aux nombres d'articles communs aux auteurs. Nous pouvons remarquer que quelques auteurs (Pierreval H., Kulturel-konak S., Amaral A.R.S., ou Singh S.P) sont particulièrement actifs dans le domaine avec un nombre important de contributions scientifiques. Nous pouvons également remarquer certains groupes de coauteurs (en jaune, vert, rose marron ou beige).

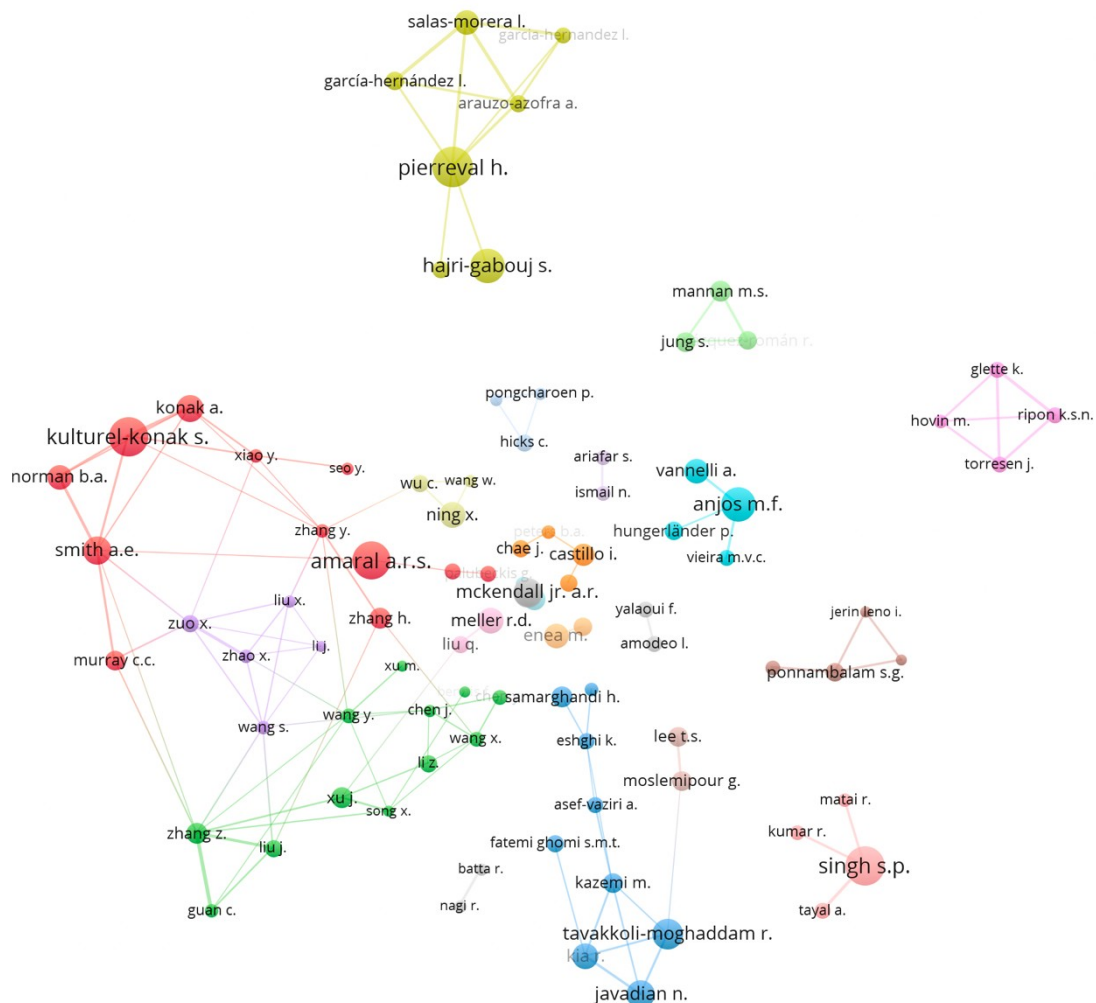


Figure 2-13 : carte des auteurs avec le mot clé "Facility Layout Problem"

L'objectif de ce chapitre est de réaliser un état de l'art du paradigme de recherche des FLP afin d'étudier l'ensemble des éléments permettant de modéliser et résoudre ce type de problème. Dans une première partie, la caractérisation et l'évaluation des PIA sont présentées. Dans une seconde partie, la modélisation et les méthodes de résolution sont détaillées.



## 2. Caractérisation des PIA

### 2.1. Caractéristiques de l'atelier impactant l'implantation

Dans cette partie, les différents éléments afférents à un atelier (ou une usine) et pouvant influencer l'implantation des postes de travail sont décrits. Dans un premier temps, la variété et le volume des produits sont explicités. Dans un second temps, une description de l'influence de la forme et des dimensions des postes de travail est faite. Enfin dans un troisième temps, les systèmes de transport puis une partie concernant les implantations sur plusieurs étages sont détaillés.

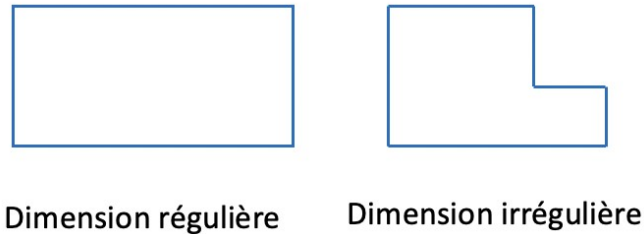
#### 2.1.1. Variété et volume des produits

La conception de l'implantation des postes de travail dépend généralement de la variété des produits et des volumes de production. Quatre types d'organisation sont mentionnés dans la littérature (Dilworth, 1996) et détaillés ci-dessous.

- Dans l'implantation en ligne, les machines et les équipements sont disposés sur une ligne en fonction de la séquence des opérations requises pour le produit (Dilworth, 1996). Les produits se déplacent d'un poste de travail à un autre de manière séquentielle, sans retour en arrière ni déviation. Les implantations de produits sont utilisées pour les systèmes ayant une capacité de production élevée et une faible variété de produits.
- Dans le cadre de l'implantation fixe des produits, il est observé que le produit lui-même ne subit aucun déplacement. En revanche, ce sont les diverses ressources telles que les machines et les opérateurs qui se déplacent afin d'effectuer les opérations nécessaires sur le produit (Dilworth, 1996). Ce type spécifique de configuration trouve son utilité dans les industries engagées dans la fabrication de produits volumineux et de grande envergure, tels que les locomotives, les wagons, les navires et les avions.
- Dans l'implantation par processus, la production est organisée en regroupant les équipements et les activités similaires pour améliorer la flexibilité et la capacité d'adaptation aux changements dans la production de divers produits (Dilworth, 1996). Un exemple concret de la disposition par processus serait une usine de fabrication d'automobiles où différentes étapes du processus de fabrication, comme la carrosserie, la peinture, le montage intérieur, etc., sont regroupées dans des zones distinctes, et chaque voiture suit ces étapes en fonction de ses besoins spécifiques.
- Dans le contexte de l'implantation cellulaire, les machines sont regroupées en cellules afin de traiter des familles de pièces similaires. Une fois que les cellules de machines sont formées, la problématique du positionnement des machines au sein de ces cellules se pose. Dans ce cas, il est nécessaire de déterminer la disposition optimale des machines dans chaque cellule (Proth, 1992).

#### 2.1.2. Dimensions des postes de travail

Dans ce paragraphe, le focus est fait sur les postes de travail qui vont accueillir les produits. Deux dimensions différentes de postes de travail sont à distinguer (Figure 2 -14) : soit régulières, c'est-à-dire généralement rectangulaires (Kim and Kim, 2000) ; soit irrégulières, c'est-à-dire généralement des polygones contenant au moins un angle interne supérieur à  $90^\circ$  (Lee and Kim, 2000). Comme mentionné par Chwif et al. (1998), un poste de travail peut avoir des dimensions données, définies par une longueur fixe et une largeur fixe. Dans ce cas, les machines peuvent être considérées comme des « boîtes noires ».



*Figure 2-14: dimensions régulière et irrégulière de poste de travail (Drira et al., 2007)*

## 2.2. Approches d'implantation

Selon Tompkins (2010), entre 20 % et 50 % des coûts de fabrication sont imputables au déplacement des produits et une bonne implantation de l'atelier pourrait permettre de les réduire de 10 % à 30 %. L'implantation des machines dans l'atelier peut être classée en sept catégories (Hosseini-Nasab et al., 2018), qui sont, les implantations à une rangée, à plusieurs rangées, à deux rangées, à rangées parallèles, en boucle, à champ libre et à étages multiples, comme l'illustre la Figure 2 -15. Ces catégories sont décrites ci-dessous et se distinguent par la forme de leur chemin de transport.

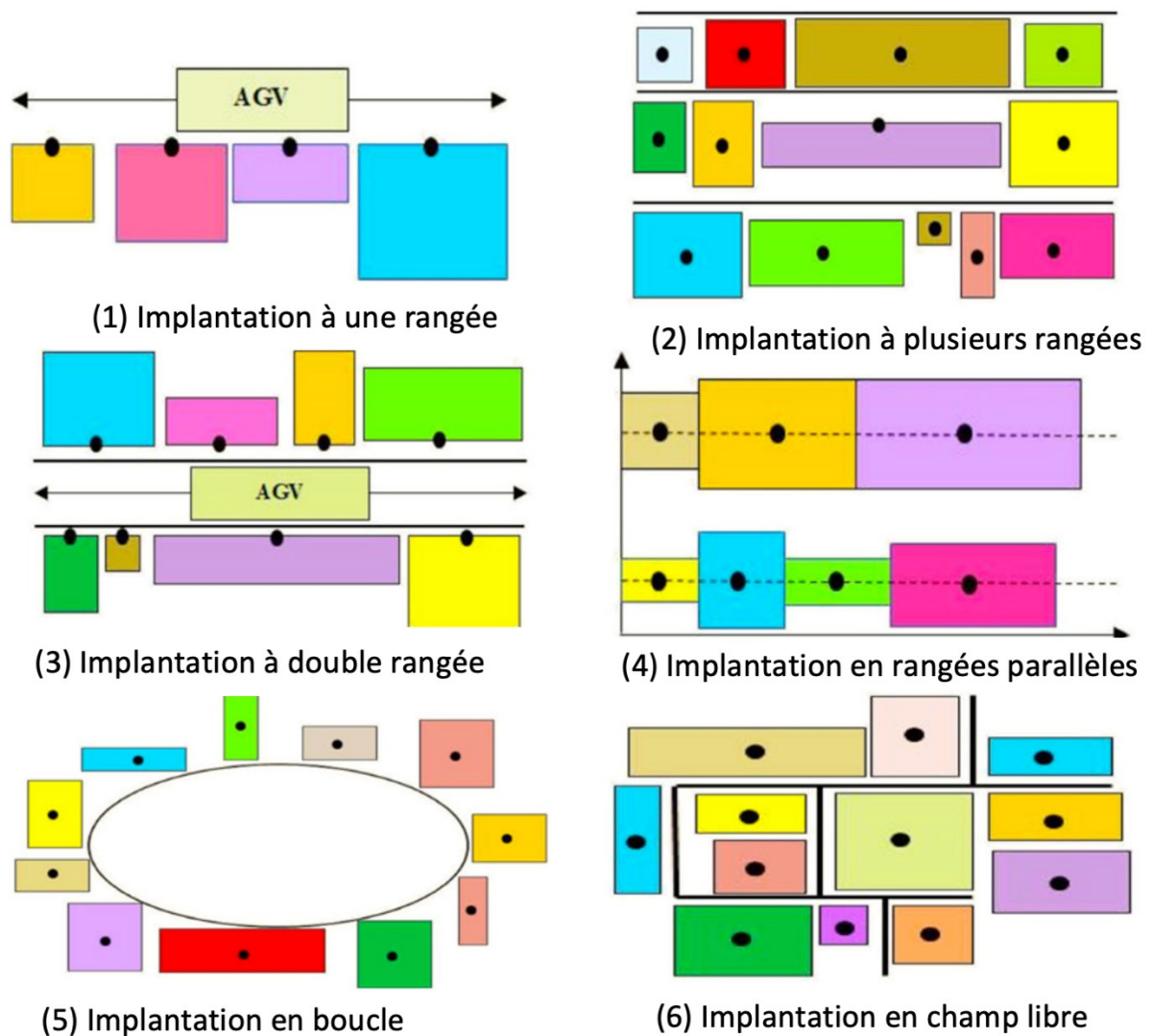


Figure 2-15 : disposition des postes de travail par rapport aux systèmes de transport des produits (Hosseini-Nasab et al., 2018)

- Implantation rangée unique (Figure 2-15(1)) : cette méthode concerne l'implantation d'un nombre donné de postes de travail de dimension régulière situés les uns à côté des autres, le tout formant une ligne (Palubeckis, 2015) (Samarghandi and Eshghi, 2010). Plusieurs formes peuvent être mentionnées dans la disposition à rangée unique, telles que la ligne droite ou la forme en U (Drira et al., 2007).
- Implantation à plusieurs rangées (Figure 2-15(2)) : cette méthode d'implantation consiste à positionner un ensemble de postes de travail rectangulaires sur un nombre spécifié de rangées dans un espace en deux dimensions, de manière à minimiser la somme totale pondérée des distances centre à centre entre toutes les paires de postes. Dans ce type de configuration, chaque poste de travail peut être assigné à n'importe quelle rangée. Toutes les rangées ont la même hauteur, et les distances entre les rangées adjacentes sont uniformes (Hungerländer and Anjos, 2015).
- Implantation à double rangée (Figure 2-15(3)) : dans ce cas, les postes de travail, de dimension régulière, pouvant avoir des largeurs différentes, sont positionnés de part et d'autre d'un système de transport automatisé de produits afin de minimiser le coût total de transport des produits entre les postes (Murray et al., 2013) (Wang et al.,

2015). Un système avec un véhicule à guidage automatique (AGV) ou un robot mobile autonome (RMA) fonctionne le long de l'allée pour déplacer les produits d'une machine à l'autre. La proposition de la disposition à double rangée et sa formulation comme un modèle de programmation mixte en nombres entiers ont été initialement présentés par Chung et Tanchoco (2010).

- Implantation en rangées parallèles (Figure 2 -15(4)) : cette implantation ressemble à l'implantation précédente (à double rangée) mais le système de transport des produits n'est pas forcément commun à toutes les rangées de machines et le nombre de rangées ne se limite pas à deux (Amaral, 2013). La disposition à double rangée et la disposition en rangées parallèles diffèrent dans leurs caractéristiques. Dans la disposition en rangées parallèles, il est supposé que les dispositions dans les deux rangées partent d'un point commun et qu'aucun espace n'est autorisé entre deux postes adjacents. En revanche, la disposition à double rangée ne repose pas sur une telle hypothèse. De plus, la disposition à double rangée considère que la distance entre les deux rangées parallèles est équivalente à la largeur de l'AGV, tandis que ce n'est pas le cas avec la disposition en rangées parallèles, selon Amaral (2013).
- Implantation en boucle (Figure 2 -15(5)) : l'implantation en boucle vise à organiser les postes de travail ou les installations le long d'une boucle fermée afin de faciliter la circulation des flux de production et de minimiser les distances de déplacement.
- Implantation en champ libre (Figure 2 -15(6)) : l'implantation en champs libre permet une disposition libre et flexible des postes de travail, offrant ainsi la possibilité d'explorer des solutions adaptées aux besoins spécifiques. Cela peut conduire à des avantages en termes d'optimisation des objectifs, mais nécessite une planification précise pour garantir une efficacité globale. La principale contrainte de la conception d'une disposition en champ libre réside dans la nécessité d'éviter le chevauchement des machines, ce qui implique que les postes doivent être positionnés au sol sans se superposer les uns aux autres, comme souligné par Niroomand et al. (2015).
- Implantation sur plusieurs étages (Figure 2 -16) : l'implantation sur plusieurs étages dans les problèmes d'implantation d'installations permet de prendre en compte la dimension verticale de l'espace et d'optimiser l'utilisation de l'espace disponible. Cela peut offrir des avantages en termes d'optimisation de l'espace et de séparation des flux de travail, mais nécessite une planification minutieuse pour garantir une coordination efficace entre les niveaux. Pour permettre le déplacement vertical des pièces, un dispositif de transport vertical tel qu'un ascenseur est nécessaire. Moseley (1963) a été le premier à se pencher sur la disposition sur plusieurs étages en 1963, comme mentionné par Izadinia et al. (2014). La construction en hauteur permet d'augmenter la superficie d'atelier tout en luttant contre l'artificialisation des sols.

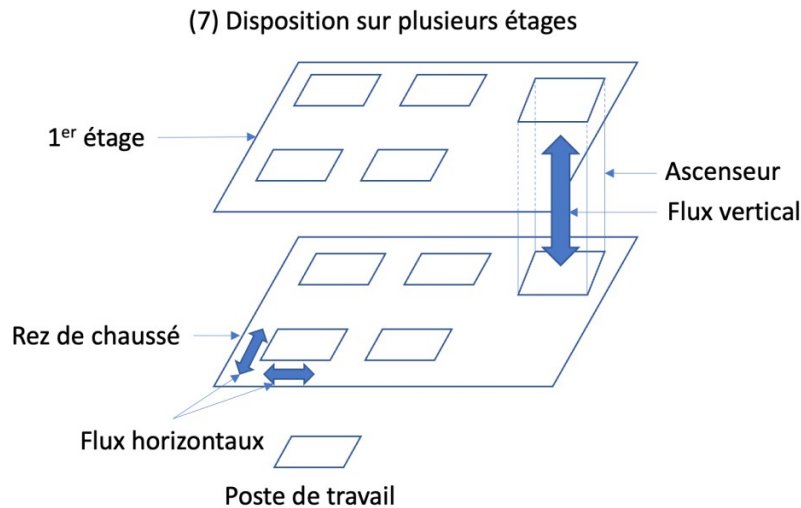


Figure 2-16 : illustration d'une disposition de postes de travail sur plusieurs niveaux (Hosseini-Nasab et al., 2018)

### 2.3. Méthode pratique de mesure et d'analyse des caractéristiques des PIA

Plusieurs approches existent pour répondre aux différents types de problèmes qui sont formulés dans la littérature. Elles visent soit à trouver de bonnes solutions, qui satisfont certaines contraintes données par le décideur, soit à rechercher un optimum global ou local pour un ou plusieurs objectifs de performance. Diverses méthodes ont été développées pour résoudre les PIA à critère unique, qui peuvent être divisées en quatre catégories, notamment les méthodes pratiques, les approches exactes, stochastiques, et approximatives.

Les outils utilisés en pratiques dans l'entreprise ne permettent pas en général d'optimiser les systèmes, mais permettent de mesurer les optimisations précédemment faites et d'identifier les points à améliorer (Kovács, 2019). Il existe de multiples outils appartenant notamment au domaine de l'amélioration continue. Concernant l'analyse de flux, les outils utilisés sont listés ci-après.

#### 2.3.1. Diagramme spaghetti

Le diagramme spaghetti est une représentation d'un espace de travail qui décrit le mouvement ou le chemin emprunté par les opérateurs, les produits ou d'autres objets au fur et à mesure qu'ils se déplacent dans un processus (Vasanthaseelan et al., 2021, Kumar et al., 2019). Étant donné que les diagrammes spaghetti sont courbés, qu'ils s'entrecroisent et passent entre les stations, le dessin final peut sembler assez désorganisé. Cependant, le dessin final retrace le déplacement du matériel ou des documents à travers un espace de travail ou une usine entière, mettant en évidence les inefficacités du processus (Manoj Kumar et al., 2021, Manoj Kumar et al., 2020). Ainsi, il peut être utilisé pour réviser l'aménagement de zones de travail afin d'augmenter l'efficacité en réduisant les longueurs de déplacement entre des stations consécutives (Manoj Kumar et al., 2020a, Manoj Kumar and Mysamy, 2019). Un exemple de diagrammes spaghetti avant (à gauche) et après (à droite) est présenté dans la Figure 2-17 (Balaji et al., 2021). L'objectif du diagramme spaghetti est de visualiser l'efficacité de l'implantation des postes de travail.

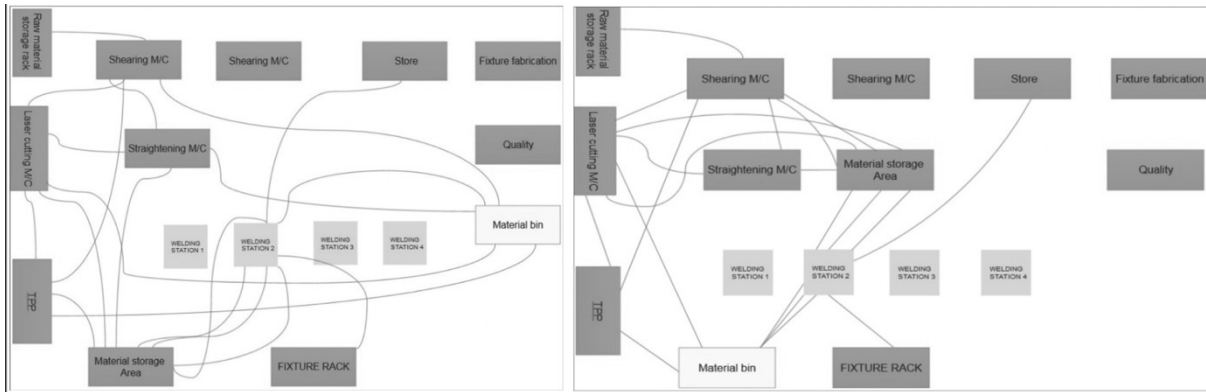


Figure 2-17 : exemple d'un diagramme spaghetti avant amélioration (à gauche) et après amélioration (à droite) (Balaji et al., 2021)

### 2.3.2. Value Stream Mapping (VSM)

La VSM est un outil du Lean Manufacturing permettant de cartographier un processus de production en suivant un produit d'un état initial à un état final. Il s'agit d'une cartographie visuelle dont l'analyse permet d'identifier les actions à non-valeur ajoutée et des actions à valeur ajoutée. La VSM fournit de nombreuses informations utiles sur le processus de fabrication. Suhadak et al. (2015) ont présenté une application de la VSM (Figure 2-18) couplée avec de la simulation lors de la conception de l'aménagement de postes de travail. Leur objectif final est de déterminer un ensemble de valeurs de paramètres qui optimisent le flux des produits dans l'ensemble du système - distance entre les machines, fréquence des mouvements de produits et capacité. Les auteurs ont utilisé la VSM pour montrer les informations relatives à la distance spatiale en mètres entre les postes de travail et le temps nécessaire en minutes pour traiter les produits pour chacune des sept étapes.

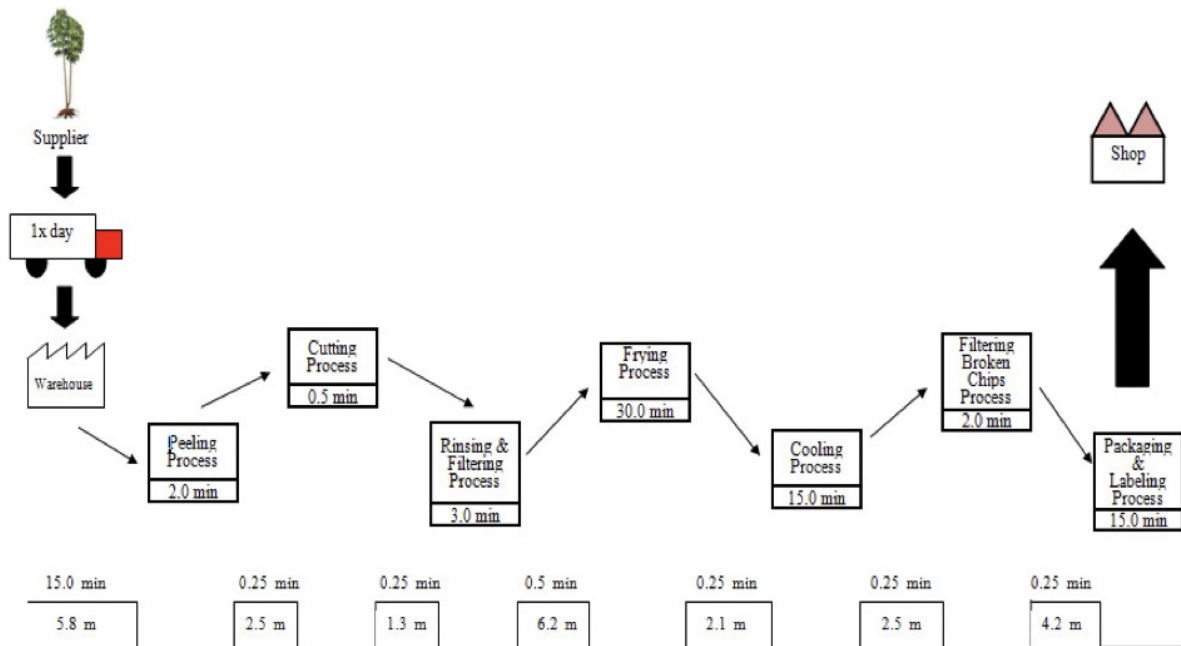


Figure 2-18 : exemple d'une VSM Suhadak et al. (2015)

### 2.3.3. Simulation

La simulation étant un domaine très vaste, aucun état de l'art concernant ce domaine n'est fait dans cette partie. Seul l'intérêt de l'utilisation de tels outils ainsi que leurs liens avec les PIA sont présentés.

#### 2.3.3.1. Utilisation d'outils de simulation

L'utilisation d'outils de simulation de flux (par exemple AnyLogic<sup>3</sup>) permet de modéliser des environnements et de les simuler par la suite. La simulation possède plusieurs avantages :

- Les simulations représentent une façon sûre de tester et d'explorer différents scénarios de possibilités.
- Les expériences virtuelles avec des modèles de simulation sont moins coûteuses et nécessitent moins de temps que des expériences avec des actifs réels.
- Les modèles de simulation peuvent être animés en 2D/3D, ce qui permet de vérifier, communiquer et comprendre les concepts et les idées plus facilement.
- Contrairement aux analyses réalisées à l'aide de tableurs ou de solveurs, la simulation permet d'observer le comportement d'un système au fil du temps avec n'importe quel niveau de détail.
- Les incertitudes concernant le résultat et les délais d'une opération peuvent être facilement représentés dans les modèles à l'aide de la simulation, ce qui permet de quantifier les risques et de trouver des solutions plus robustes.
- Un modèle de simulation peut capturer bien plus de détails qu'un modèle analytique, ce qui offre une précision accrue et des prévisions plus détaillées.

Ainsi Ali et al. (2010) ont utilisé la simulation (QUEST<sup>4</sup>®) dans le but d'analyser et d'optimiser l'efficacité d'un flux de production dans une zone de travail manuel. L'activité de modélisation par simulation est utilisée dans cette étude, car elle permet de vérifier la conception de l'implantation des postes de travail sans avoir à les réorganiser dans la réalité. Les résultats du modèle de simulation peuvent également être utilisés comme points de référence pour évaluer l'efficacité de la nouvelle disposition.

#### 2.3.3.2. Liens entre la simulation et les PIA

La simulation est utilisée pour modéliser des environnements et aider à évaluer une implantation sans avoir à effectuer la réorganisation sur le système physique (c'est-à-dire atelier ou usine). Ainsi Ali et al. (2010) ont utilisé la simulation dans le cadre de l'aménagement d'une zone de travail manuel. L'objectif de cette étude est d'analyser et d'optimiser l'efficacité du flux de production dans la zone de travail manuel en utilisant le logiciel de simulation QUEST®.

Une étude (Lee et al., 2017) vise à proposer une autre voie en introduisant un cadre de prédiction intégré à la modélisation et à la simulation (M&S) et à un algorithme CART (CLASSIFICATION AND REGRESSION TREES) (arbre de décision). Les auteurs cherchent à construire un cadre pour analyser l'efficacité du flux de production (en termes de taux

---

<sup>3</sup> <https://www.anylogic.fr>

<sup>4</sup> <https://qes.com/analysis-simulation/>

d'utilisation des travailleurs) du processus d'assemblage manuel de composants mécaniques. La modélisation et la simulation sont utilisées pour créer différents scénarios à partir de l'implantation originale à des fins de comparaison. L'algorithme CART est utilisé pour extraire des règles de décision des résultats de la simulation. Ces règles de décision permettent d'interpréter les effets qui affectent le taux d'utilisation des travailleurs. L'objectif de cette recherche (Lee et al., 2017) est d'adopter les règles sur les modèles de simulation, et de proposer des lignes directrices sur des alternatives améliorées pour construire des modèles de simulation du processus d'assemblage manuel.

Les travaux de cette thèse sont focalisés sur une organisation de la production de type implantation de produits, avec des dimensions régulières des postes de travail. Ces derniers sont agencés en champ libre sur un seul étage. Enfin, les travaux de thèse utilisent aussi la simulation, détaillée dans le chapitre 5.

### 3. Modélisation et résolution des PIA

#### 3.1. Modélisation

Avant de résoudre un PIA, il est nécessaire de définir sa représentation et sa modélisation. Pour cela, une première sous-partie présente deux approches possibles pour représenter le problème, (discrète ou continue). Une seconde sous-partie aborde la modélisation mathématique du problème. Une troisième sous-partie expose les contraintes rencontrées dans ce type de problème.

##### *3.1.1. Représentation du problème*

Les problèmes d'implantation de postes de travail peuvent être représentés de deux façons différentes : la formulation discrète ou la formulation continue.

- Formulation discrète : dans une représentation discrète (Figure 2 -19a), les positions des postes de travail sont discrétisées : le site d'une usine est divisé en blocs rectangulaires de même surface et de même forme, et chaque bloc peut être affecté à un poste de travail. Dans ce cas, la résolution d'un PIA consiste donc à assigner les postes de travail sur les blocs.
- Formulation continue : dans une formulation continue (Figure 2 -19b), tous les postes de travail peuvent être placés n'importe où sur le site d'une usine et ne doivent pas se chevaucher les uns avec les autres. Cette représentation est plus complexe que la formulation discrète, mais permet de prendre en compte certaines contraintes spécifiques comme les espaces entre les postes de travail.



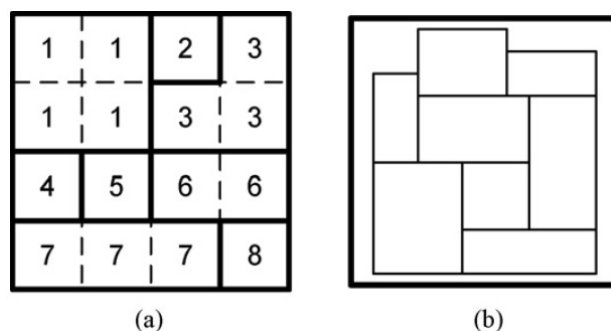


Figure 2-19 : représentations d'implantations discrètes et continues (Drira et al., 2007)

Ces formulations étant définies, la résolution d'un PIA, consistant à chercher une implantation des postes de travail, doit être guidée par un objectif à optimiser, appelé « fonction objectif ». Les paragraphes suivants présentent des travaux avec une fonction mono objectif, et d'autres comportant une fonction multi-objectifs. Enfin, quelques exemples de fonctions objectifs utilisées dans la littérature sont présentés.

#### 3.1.1.1. Mono objectif

Dans la plupart des articles sur les problèmes d'implantation, l'objectif principal est de minimiser une fonction liée au déplacement des pièces. La majorité des articles prennent en compte une seule fonction objectif (Drira et al., 2007).

Parmi les travaux relatifs au mono objectif, Garcia-Hernandez et al. (2019) utilisent une fonction mono objectif cherchant à minimiser le coût de transport ; Friedrich et al. (2018) ont utilisé une fonction mono objectif cherchant à réduire la distance des flux de produit.

#### 3.1.1.2. Problème multi-objectifs

Les méthodes multi-objectifs sont utilisées dans le problème d'implantation d'installations pour prendre en compte plusieurs objectifs, parfois contradictoires, simultanément. Elles permettent de trouver un compromis entre ces objectifs et de générer un ensemble de solutions non dominées ou Pareto-optimales. L'utilisation de méthodes multi-objectifs permet de mieux représenter la complexité et les compromis à réaliser pour le problème d'implantation d'installations, en prenant en compte différentes dimensions de l'efficacité et des performances. Aiello et al. (2006) ont traité un problème d'implantation lié à la minimisation du coût de transport et à la maximisation d'une fonction de contiguïté (évaluation des demandes de proximité entre deux départements). L'ensemble des solutions non dominées est ensuite trouvé et une "meilleure" solution est ensuite sélectionnée à partir de cet ensemble en utilisant la méthode de modélisation des préférences « Electre ». À titre d'exemple exemple, Dweiri et Meier (1996) ont cherché à minimiser simultanément le flux de transport, le flux d'équipement et le flux d'information. La plupart des auteurs combinent les différents objectifs en un seul, soit au moyen de la méthodologie du processus de hiérarchie analytique (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS ou AHP) (Yang et Kuo, 2003), soit en utilisant une combinaison linéaire des différents objectifs (Chen et Sha, 2005).

#### 3.1.1.3. Exemples de fonctions objectif

D'après Pérez-Gosende et al. (2021), les fonctions objectif utilisées sont la minimisation du coût total du transport qui est la fonction objectif la plus répandue dans les modèles d'optimisation des PIA (62,68%), suivie par la minimisation de la distance du flux (24,4%) et la minimisation des coûts de réimplantation (19,62%). Ces trois fonctions sont présentées ci-dessous :

- Minimiser le coût de transport : le coût de transport représente le coût du déplacement de l'ensemble du flux de produits allant d'un poste de travail au suivant. Il s'agit de l'objectif le plus utilisé dans les problèmes d'implantation de postes de travail. Dans les entreprises industrielles, le coût de transport est un facteur clé pour l'obtention d'une implantation optimale des machines (Singh and Ingole, 2019).
- Minimiser la distance parcourue : plus la distance parcourue par les produits est élevée, moins le placement des postes de travail est optimal. Ainsi Kovács (2019) a utilisé cette fonction objectif combinée à quatre méthodes de lean manufacturing (TAKT-TIME DESIGN, LINE BALANCE, CELLULAR DESIGN AND ONE-PIECE FLOW) pour diminuer la distance parcourue par les produits. Nous pouvons également citer Klausnitzer et Lasch (2019) qui ont réalisé deux modèles : le premier est une formulation de programmation linéaire en nombres entiers mixtes pour résoudre les problèmes d'implantation d'atelier de petite taille ; dans un second modèle, des allées entre les postes de travail sont prises en compte.
- Minimiser les coûts de réimplantation : les coûts de réimplantation peuvent être définis comme les coûts engendrés lors de la réimplantation avec un déplacement des postes de travail. Dans ce cas de figure, le point de départ est une implantation existante des postes qu'il faut modifier et/ou déplacer pour aboutir à une nouvelle implantation. Cette réimplantation peut être initiée lors du passage d'un flux de produits à un autre (Guan et al., 2012). Le déplacement d'une machine va nécessairement engendrer un coût de reconfiguration incluant notamment le temps passé à débrancher, déplacer, rebrancher, calibrer la machine.

### 3.1.2. Modélisation mathématique

Les modèles mathématiques sont utilisés pour trouver des solutions aux problèmes d'implantation, que la plupart des chercheurs considèrent comme des problèmes d'optimisation, avec des objectifs uniques ou multiples. L'ensemble de ces modèles mathématiques peut être modélisé de sept façons différentes (Hosseini-Nasab et al., 2018).

Problème d'affectation quadratique (QUADRATIC ASSIGNMENT PROBLEM ou QAP) : un PIA avec une représentation discrète et des installations de taille égale peut être formulé par un QAP. Dans cette formulation la fonction objectif est du second degré (Kusiak and Heragu, 1987). Une formulation typique, lorsqu'il s'agit de déterminer les emplacements relatifs des installations de manière à minimiser le coût total du transport des produits, est la suivante (Balakrishnan et al., 2003) :

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N f_{ik} d_{jl} X_{ij} X_{kl} \quad \text{Équation 2-1}$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ij}=1, j=1, \dots, N \quad \text{Équation 2-2}$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij}=1, i=1, \dots, N \quad \text{Équation 2-3}$$

Dans ce modèle (Équation 2 -1, Équation 2 -2 et Équation 2 -3), N est le nombre de machines ; i, k les machines ; j, l les emplacements ;  $f_{ik}$  coût du déplacement de la machine i à k ;  $d_{jl}$  la distance entre les emplacements j et l ;  $X_{ij}$  et  $X_{kl}$  les variables binaires de localisation de la machine i (respectivement k) à l'emplacement j (respectivement l).

La fonction objectif (Équation 2 -1) représente la somme des coûts de déplacement sur chaque paire de postes. L'équation (Équation 2 -2) garantit que chaque emplacement ne contient qu'un seul poste et l'équation (Équation 2 -3) garantit que chaque poste n'est placé que dans un seul emplacement.

Programmation quadratique en nombre entier ou mixte (QUADRATIC INTEGER PROGRAMMING, QIP OU QUADRATIC MIXED-INTEGER PROGRAMMING, QMIP): il s'agit d'une formulation qui considère les coûts quadratiques pour sélectionner les postes de travail et couvrir les contraintes, permettant ainsi de modéliser de manière plus précise les problèmes d'implantation avec des interactions complexes entre les postes de travail (Bazaraa, 1975).

Programmation linéaire (LINEAR PROGRAMMING ou LP) : méthode d'optimisation mathématique utilisée pour résoudre des problèmes dans lesquels les relations entre les variables et la fonction d'objectif sont linéaires. Elle permet de trouver les valeurs optimales des variables qui minimisent ou maximisent une fonction objectif, sous réserve de contraintes linéaires.

Programmation en nombres entiers (INTEGER PROGRAMMING ou IP) : méthode d'optimisation mathématique qui traite des problèmes discrets à contraintes linéaires où les variables de décision doivent prendre des valeurs entières. Lawler (1963) a été le premier à exprimer un problème d'implantation d'atelier (PIA) sous la forme d'un modèle de programmation en nombre entier.

Problème de programmation mixte en nombres entiers (MIXED INTEGER PROGRAMMING PROBLEM ou MIP) : le MIP est un problème d'optimisation où certaines variables peuvent prendre des valeurs entières et d'autres des valeurs continues. Il permet de modéliser des problèmes plus complexes et de trouver des solutions optimales qui satisfont des contraintes mixtes, en utilisant des méthodes de résolution avancées (Moslemipour et al., 2012).

Programmation non linéaire (NONLINEAR PROGRAMMING ou NLP) : méthode d'optimisation mathématique qui traite des problèmes avec des fonctions objectif ou des contraintes non linéaires. Elle permet de modéliser des problèmes plus complexes avec des relations non linéaires entre les variables, et nécessite des techniques d'optimisation spécifiques pour trouver les meilleures solutions.

Modélisation par les graphes (GRAPH THEORETIC PROBLEM ou GT): approche de modélisation mathématique qui utilise la théorie des graphes pour représenter des problèmes complexes. Elle permet de capturer les relations et les dépendances entre les éléments du problème et d'appliquer des algorithmes pour les résoudre de manière efficace et structurée (Kim and Kim, 1995). Dans un modèle GT, on suppose que l'opportunité de placer chaque paire de postes à proximité l'un de l'autre est connue (Jankovits et al., 2011).

### 3.1.3. Contraintes

En général, les contraintes des PIA sont constituées d'éléments tels que la forme des postes de travail, les espaces entre les postes de travail, l'orientation, le non-chevauchement, les points d'embarquement et de débarquement ou une prise en compte de données aléatoires.

#### 3.1.3.1. Forme des postes de travail

Les machines n'ont pas toutes la même forme. Ainsi, il est possible d'avoir des machines de formes diverses. Par simplification, les machines ont le plus souvent une forme de carré ou de rectangle.

À titre d'exemple, Welgama et Gibson (1993) proposent un algorithme d'optimisation multi-objectifs : le premier est la minimisation du coût de transport ; le second est la minimisation de l'espace perdu lors du placement des machines de formes différentes, mais fixées au préalable. Das (1993) présente une formulation par programmation en nombres entiers mixtes pour le problème d'implantation des machines dans les systèmes de fabrication flexibles. Il propose par ailleurs une heuristique en quatre étapes pour résoudre le problème. Les travaux cités exploitent des machines de formes régulières (de forme carrée ou rectangulaire). Cependant d'autres travaux recherches ont pris en compte des formes irrégulières. C'est notamment le cas de Bock et Hoberg (2007). Dans leur modèle, l'espace est représenté sous la forme d'une grille. Les machines sont composées de multiples carrés et peuvent ainsi avoir une forme irrégulière (Figure 2-20). Dans la Figure 2-20, la forme d'une machine est composée de carrés unitaires, 11 carrés pour la machine 4. À l'intérieur un carré correspond à l'entrée, carré plein noir et un carré encadré noir correspond à la sortie. La distance entre deux machines correspond au nombre de carrés séparant la sortie d'une machine de l'entrée d'une autre machine : 8 par exemple entre la machine 6 et 11.

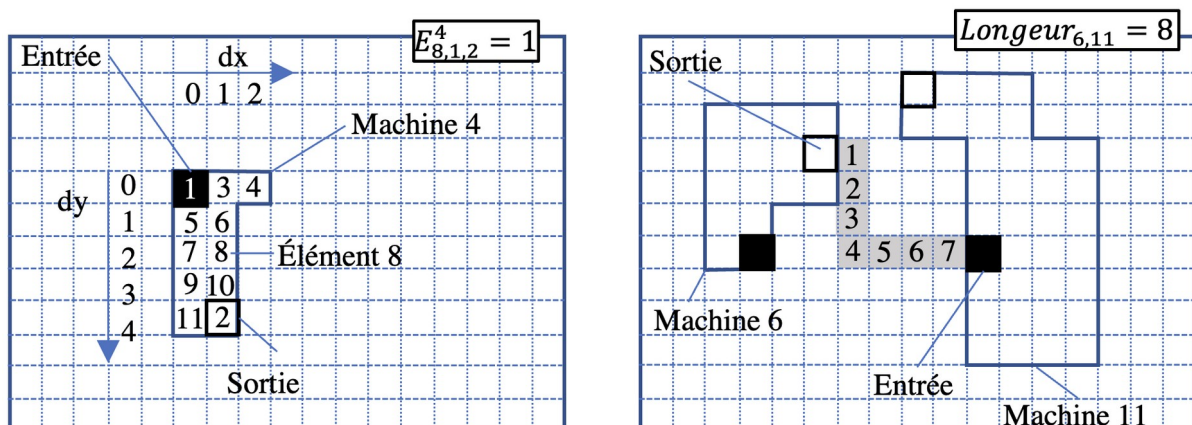


Figure 2-20 : exemple de machine de forme irrégulière dans une représentation discrète (Bock and Hoberg, 2007)

### 3.1.3.2. Prise en compte des espaces entre les postes de travail

Dans le cas de la modélisation des problèmes continus se pose la question de prendre en compte les espaces entre les postes de travail. Ces derniers permettent de représenter les couloirs de déplacement empruntés par les moyens de transport pour déplacer les produits entre les machines. La dimension de ces espaces a également une incidence sur le coût et le temps de transport. La capacité des chemins est limitée à un nombre spécifique de transporteurs, ce qui peut obliger les moyens de transport à attendre avant d'être autorisés à passer par un chemin. C'est pourquoi Pourvaziri et Pierreval (2021) présentent une approche hybride pour la conception d'implantation dans les systèmes de fabrication en tenant compte de la dimension des allées entre les postes de travail. D'autres auteurs prennent aussi en compte les allées dans le cadre de problème d'implantation de postes de travail (Kim and Chae, 2021; Pourvaziri et al., 2021).

### 3.1.3.3. Orientation des postes de travail

L'orientation des postes de travail est très peu prise en compte dans la littérature néanmoins, il existe quelques travaux sur cette question. C'est le cas notamment de Kim et Kim (2000) qui prennent en compte la rotation des postes de travail de 90° faisant apparaître quatre orientations possibles (Figure 2-21).

Ainsi que de Latifi et al. (2017) qui ont proposé une formulation de programmation non linéaire en nombres entiers mixtes (MIXED INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING ou MINLP) pour le problème de l'implantation d'une usine de traitement en prenant en compte l'orientation des postes de travail.

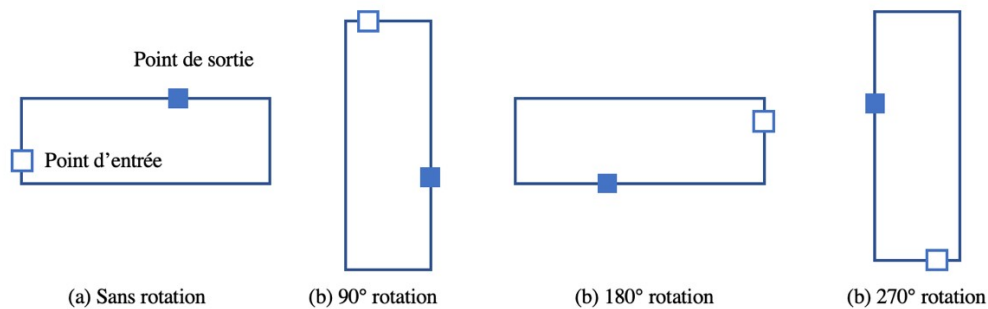


Figure 2-21 : illustration de différentes orientations pour des machines (Kim and Kim, 2000)

### 3.1.3.4. Non-chevauchement des postes de travail

La contrainte la plus importante dans une représentation continue est la non-superposition des postes de travail (Équation 2-4 et Équation 2-5). Ces derniers peuvent être placés n'importe où à la condition qu'il n'y ait aucun chevauchement entre eux. Welgama et Gibson (1993), par exemple, fixent deux conditions pour le non-chevauchement des postes de travail : la condition de non-chevauchement de la projection X et la condition de non-chevauchement de la projection Y. Les deux conditions sont les suivantes :

$$(x_{jt} - x_{ib})(x_{jb} - x_{it}) \geq 0 \quad \text{suivant l'axe des abscisses (Ox)} \quad \text{Équation 2-4}$$

$$(y_{jt} - y_{ib})(y_{jb} - y_{it}) \geq 0 \quad \text{suivant l'axe des ordonnées (Oy)} \quad \text{Équation 2-5}$$

Où  $(x_{it}, y_{it})$  et  $(x_{ib}, y_{ib})$  sont les coins supérieurs gauches et inférieurs droits du poste  $i$  et  $(x_{jt}, y_{jt})$  et  $(x_{jb}, y_{jb})$  sont les coins supérieurs gauche et inférieur droits du poste  $j$ .

### 3.1.3.5. Points de ramassage et de dépôts

Chaque poste de travail comporte un point de dépôt des produits, correspondant à une zone tampon dans laquelle le produit est stocké en attendant d'être traité. Le second point est celui du ramassage, une fois les opérations sur le produit effectuées, celui-ci est stocké dans une zone de ramassage en attendant d'être collecté pour être transporté vers le prochain poste de travail. La prise en compte de ces points permet au modèle d'être plus réaliste et d'intégrer l'optimisation des coûts de transport. Allant de pair avec l'orientation des postes de travail, la prise en compte des points de ramassage et de dépôt est également prise en compte par plusieurs auteurs. Nous pouvons par exemple citer Kim et Kim (2000) qui en plus de l'orientation des postes de travail ont pris en compte les points de dépôt (point d'entrée) et ramassage (point de sortie) (Figure 2-22). Dans leur modèle, ces points sont déterminés à l'avance. Friedrich (2018) commence par rechercher les formes et emplacements des postes de travail pour ensuite chercher à optimiser le placement des points de ramassage et de dépôt en utilisant deux méthodes heuristiques qui sont la recherche à voisinage variable (VARIABLE NEIGHBOURHOOD SEARCH ou VNS) et l'atténuation parallèle (PARALLEL TEMPERING ou PT).

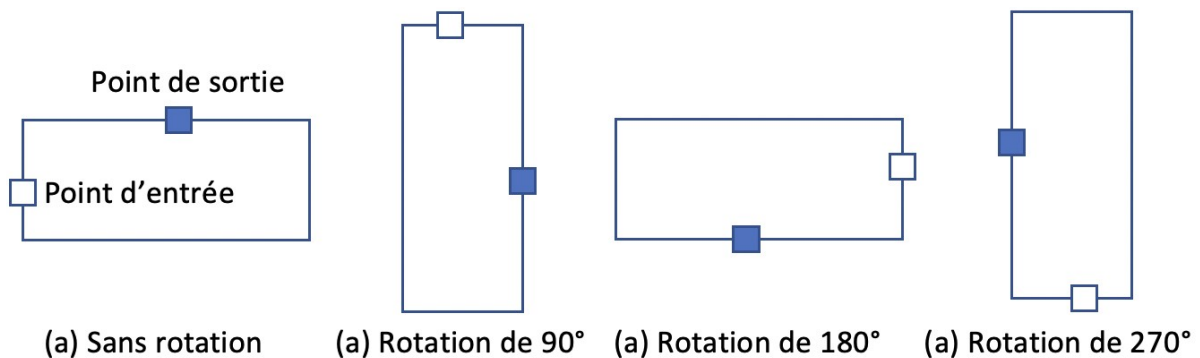


Figure 2-22 : exemple de placement de points de ramassage et de dépôt, combiné à l'orientation des machines (Kim and Kim, 2000)

### 3.1.3.6. Données aléatoires / floues

Pour résoudre un problème d'implantation d'atelier (PIA), différentes données sont nécessaires, telles que les dimensions des postes de travail, les coûts de transport et les flux de produits entre les postes. Dans de nombreux travaux de recherche, il est supposé que ces données soient déterministes et sont connues avec précision à l'avance. Cependant, cette hypothèse peut être irréaliste dans de nombreuses situations. En effet, lors de la conception d'un atelier, les données relatives aux demandes des clients, par exemple, ne sont généralement pas connues avec suffisamment de précision, car elles sont basées sur des prévisions ou des estimations. Ceci nécessite donc l'utilisation de méthodes de traitement adaptées telles que par exemple la théorie des sous-ensembles (Drira et al., 2013).

## 3.2. Résolution

Dans cette partie, les différentes approches de résolution des PIA sont présentées. Tout d'abord l'approche exacte qui concerne les petits problèmes, puis l'approche approximative concernant les problèmes plus importants.

### 3.2.1. Approche exacte

La résolution par une approche exacte des Problèmes d'Implantation d'Atelier (FLP) consiste à trouver une solution optimale en explorant toutes les possibilités pour sélectionner la meilleure solution. L'une des premières utilisations de cette méthode pour résoudre des PIA date des années 60 (Kusiak and Heragu, 1987). Cela est généralement réalisé à l'aide de méthodes de programmation mathématique telles que la programmation linéaire mixte en nombres entiers ou la programmation quadratique mixte en nombres entiers. Cette approche garantit une solution optimale, mais peut être limitée en termes de taille du problème. Elle est utilisée comme référence pour évaluer les performances d'autres méthodes et est adaptée lorsque la taille du problème le permet ou lorsque l'obtention d'une solution optimale est cruciale.

### 3.2.2. Approche approximative

Sahni et Gonzalez (1976) ont démontré que le problème d'affectation quadratique (QAP) est NP-difficile, ce qui signifie qu'il est très difficile de trouver une solution optimale dans un temps raisonnable, surtout pour les problèmes comportant 15 postes de travail ou plus. Cela souligne les limites des méthodes d'optimisation exactes pour la résolution des PIA complexes et la nécessité de recourir à des approches approximatives ou heuristiques pour obtenir des solutions de qualité acceptable dans des délais raisonnables. Parmi ces approches, les algorithmes d'amélioration, de construction et les métaheuristiques sont utilisés.

#### 3.2.2.1. Algorithmes d'amélioration

Les algorithmes d'amélioration sont des techniques de résolution utilisées pour améliorer progressivement une solution en explorant son voisinage direct. Ils sont utilisés dans les problèmes d'implantation d'atelier pour rechercher des solutions de meilleure qualité en optimisant l'agencement des postes de travail (Chiang and Chiang, 1998). Ces algorithmes peuvent être combinés avec d'autres méthodes de résolution pour obtenir des solutions plus performantes.

#### 3.2.2.2. Algorithmes de construction

Les algorithmes de construction sont des méthodes de résolution utilisées pour générer une solution initiale dans les problèmes d'implantation d'atelier. Ils fonctionnent en sélectionnant progressivement les éléments à inclure dans la solution en suivant des règles spécifiques. Ces algorithmes peuvent être utilisés seuls ou en combinaison avec d'autres techniques de résolution pour obtenir des solutions de meilleure qualité (Chiang and Chiang, 1998). Bien que ces méthodes de résolution aient des avantages et puissent produire des solutions

acceptables, il est important de reconnaître que leur inconvénient commun est la possibilité d'obtenir des solutions finales qui ne sont pas optimales (Kim and Kim, 1995).

### 3.2.2.3. Métaheuristiques

La méthode d'optimisation métaheuristique est la plus utilisée pour la résolution de problème d'implantation avec 40% d'utilisation (Hosseini-Nasab et al., 2018). D'après cette même référence, les principales métaheuristiques utilisées pour résoudre des PIA sont : les algorithmes génétiques, le recuit simulé, la recherche Tabou, l'optimisation par essaim de particules.

Nous allons présenter succinctement ces différentes métaheuristiques dont le fonctionnement est soit à parcours, soit à population et leur utilisation pour résoudre des PIA.

#### 3.2.2.3.1. Métaheuristiques à parcours

Dans le cas de métaheuristique à parcours, l'algorithme fait évoluer une seule solution sur l'espace de recherche à chaque itération.

Recherche Tabou : la recherche Tabou a été introduite par Glover (1986) qui la définit comme une métaheuristique. Les recherches locales (de voisinage) prennent une solution potentielle à un problème et explorent ses voisins immédiats (c'est-à-dire les solutions qui sont similaires, proches) dans l'espoir de trouver une solution améliorée. La recherche Tabou améliore les performances de la recherche locale en assouplissant cette règle de base. Tout d'abord, à chaque étape, les mouvements de dégradation peuvent être acceptés si aucun mouvement d'amélioration n'est disponible (comme lorsque la recherche est bloquée à un minimum local strict). De plus, des interdictions (appelées tabous) sont introduites pour décourager le retour à des solutions déjà visitées. L'implémentation de la recherche tabou utilise des structures de mémoire qui décrivent les solutions visitées ou des ensembles de règles fournies par l'utilisateur. Si une solution potentielle a été visitée précédemment dans une certaine période de temps ou si elle a violé une règle, elle est marquée comme "tabou" (interdite) afin que l'algorithme ne considère pas cette possibilité de manière répétée. L'algorithme finit par s'arrêter lorsqu'une des conditions d'arrêt est remplie.

La recherche Tabou est utilisée pour résoudre des PIA. Dans un premier exemple, Samarghandi et Eshghi (2010) ont utilisé la recherche Tabou pour trouver la solution optimale d'un cas particulier de problème d'implantation des installations à une rangée. Les résultats obtenus par ce théorème s'avèrent très utiles pour réduire les efforts de calcul. Les résultats de calcul de l'algorithme proposé sur des problèmes de référence montrent la plus grande efficacité de l'algorithme par rapport aux autres heuristiques pour résoudre le problème d'implantation des installations à une rangée. Dans un second exemple (Kothari and Diptesh Ghosh, 2013) présentent deux implémentations de la recherche tabou, l'une impliquant une recherche exhaustive du voisinage « 2-opt » et l'autre impliquant une recherche exhaustive du voisinage d'insertion. Les auteurs présentent également des techniques pour accélérer de manière significative la recherche des deux voisinages. Leurs expérimentations montrent que les techniques d'accélération sont efficaces et que leurs implémentations de la recherche tabou sont compétitives.



Recuit simulé : l'algorithme du recuit simulé (SIMULATED ANNEALING ou SA) a été introduit au début des années 80 par plusieurs auteurs (Kirkpatrick et al., 1983). Une caractéristique essentielle du recuit simulé est que, tout en acceptant des améliorations du coût des solutions, il accepte également des détériorations dans une mesure limitée grâce à l'utilisation de la condition de Metropolis. Initialement, pour de grandes valeurs de la température (T), de grandes détériorations seront acceptées ; au fur et à mesure que la température diminue, seules des détériorations plus petites seront acceptées et, finalement, lorsque la valeur de T s'approche de zéro, aucune détérioration ne sera acceptée. Ceci permet à l'algorithme de ne pas s'enfermer trop rapidement dans un optimum local.

De nombreux auteurs ont utilisé le recuit simulé pour résoudre des PIA. Dans un premier exemple, Palubeckis (2017) a proposé une approche pour le PMP (PROFILE MINIMIZATION PROBLEM), qui combine un schéma de recherche de voisinage variable (VNS) avec la technique de recuit simulé à départs multiples (MSA). La solution fournie par MSA est soumise en entrée à la composante VNS de la méthode. L'algorithme VNS s'appuie fortement sur une procédure rapide d'exploration de voisinage par insertion. L'auteur a constaté empiriquement qu'il est avantageux de donner entre 50 et 75% du temps de calcul à MSA et le reste à VNS. Les résultats des expériences de calcul démontrent la supériorité de son algorithme MSA-VNS par rapport aux approches métaheuristiques actuelles pour la PMP. En utilisant MSA-VNS, l'auteur a amélioré les meilleures solutions connues pour 50 instances PMP de référence de la littérature. Dans un second exemple, Wang et al. (2015) proposent la résolution d'un problème d'implantation à double rangée où les flux de produits changent au fil du temps dans différentes périodes de traitement. Un modèle de programmation mixte en nombres entiers est établi pour ce problème. Une méthodologie combinant un recuit simulé amélioré (ISA) et une programmation mathématique (MP) est proposée pour le résoudre. Premièrement, un schéma de codage est conçu pour représenter à la fois la séquence des installations et leurs emplacements exacts. Ensuite, un algorithme de recuit simulé amélioré est proposé pour produire une solution au problème d'implantation à double rangée. Enfin, le MP est utilisé pour améliorer cette solution en déterminant l'emplacement exact optimal de chaque installation. Les expériences montrent que cette méthodologie est capable d'obtenir les solutions optimales pour des problèmes de petite taille et qu'elle surpasse une approche exacte pour des problèmes de taille réaliste.

#### 3.2.2.3.2. Métaheuristiques à population

Dans le cas de métaheuristique à population, l'algorithme utilise la notion de population. Chaque individu correspond à une solution possible. La métaheuristique manipule ainsi un ensemble de solutions en parallèle, à chaque itération.

Algorithmes génétiques (GENETIC ALGORITHMS ou AG) : les algorithmes génétiques font partie de la famille des algorithmes évolutionnaires. Les algorithmes évolutionnaires utilisent des procédures de recherche à usage général inspirées des mécanismes de l'évolution naturelle. Ainsi les AG sont basées sur le mécanisme de la sélection naturelle (Holland, 1962). Dans les AG, une population d'individus est créée au début. Chaque individu est composé d'un génome représentant une solution. Les individus sont appelés chromosomes. Une fois la population primaire créée, chaque individu est évalué et trié du meilleur au moins bon. Ensuite, les chromosomes sont recombinaison deux par deux pour former un nouveau chromosome appartenant à une population secondaire. En plus de cette recombinaison, une mutation est générée sur chaque chromosome : elle porte sur la modification d'un gène

aléatoirement. Finalement, de nouveaux individus sont créés aléatoirement pour compléter la population secondaire et revenir à la même taille que la population primaire. Le processus est réitéré jusqu'à obtention d'un individu dont le génome est suffisamment performant.

Les AG sont également utilisés pour résoudre des PIA. Dans un premier exemple, Shayan et Chittilappilly (2004) ont conçu et développé un nouvel algorithme génétique appelé (GA.STS.FLP) qui produit des chromosomes légaux sans solliciter de procédure de réparation. Un système de pénalité est introduit pour faciliter la génération d'équipement avec des dimensions acceptable. Cet algorithme (GA.STS.FLP) nécessite un temps de calcul très court même pour la résolution de problèmes comportant 100 équipements. Dans un second exemple, Peng et al. (2018) propose un algorithme génétique adaptatif amélioré avec une stratégie d'initialisation de la population qui est développée pour réduire l'espace de recherche et améliorer l'efficacité de la résolution. Les expériences calculant le ratio de déviation des coûts sous différents niveaux de fluctuation montrent la bonne performance de la disposition robuste par rapport à la disposition prévue.

Optimisation par essaim de particules électromagnétiques : le mécanisme de type électromagnétique (ELECTROMAGNETISM-LIKE MECHANISM ou EM) est une heuristique pour l'optimisation globale, qui a été proposée pour la première fois par Birbil et Fang (2003). Elle est également définie de la manière suivante par Guan et al. (2012) : similaire à l'interaction des particules chargées, cette méthode utilise un mécanisme d'attraction-répulsion pour déplacer les particules de l'échantillon vers l'optimalisé. Pour cette méthode (EM), une particule représente une solution réalisable du problème, et chaque particule a une charge simulée, qui est souvent liée à la qualité de la solution que la particule représente. La qualité de la solution est liée au problème, appelée valeur de la fonction dans ce document. La particule avec une meilleure qualité de solution a une plus grande charge. La force entre deux particules est calculée en fonction de la charge simulée, la force étant dirigée vers la particule ayant la plus grande charge. La force totale d'une particule imposée par toutes les autres particules peut être calculée par synthèse vectorielle. Ensuite, les particules sont déplacées dans l'espace de solution réalisable par les forces imposées par les autres particules. L'EM original a été conçu pour l'optimisation globale de fonctions non linéaires continues avec des variables bornées.

Plusieurs auteurs ont eu recours aux EM pour résoudre des PIA. Dans un premier exemple, Guan et al. (2012) propose l'utilisation de l'EM pour la conception de l'implantation des systèmes de fabrication reconfigurables utilisant un véhicule guidé automatisé. Tout d'abord, le modèle formel prenant en compte les flux en charge et à vide est donné. Ensuite, l'EM est développé pour résoudre le modèle proposé. Dans l'EM, les particules sont codées de manière discrète. La charge d'une particule est calculée en fonction du coût total de transport de la particule. Dans la procédure de recherche locale, une stratégie de recherche de voisinage variable basée sur la distance de Hamming est adoptée. Dans la procédure de déplacement, les particules sont déplacées en fonction de l'ordre de chaque élément. Pour vérifier l'effet de la méthode proposée, plusieurs tests sont effectués. Les résultats des calculs montrent que la méthode proposée est capable d'obtenir des solutions optimales pour les problèmes à petite échelle et des solutions quasi optimales dans un temps de calcul limité pour les problèmes à grande échelle. Dans un second exemple, Rai et Jayswal (2018) abordent le problème de conception de la disposition du système de manière à minimiser le nombre de machines que les types de pièces traversent dans leur processus de fabrication. Les auteurs formulent le problème mathématiquement et le résolvent en utilisant l'EM qui obtient des résultats constamment meilleurs qu'une méthode populaire antérieure.

Dans le cadre de la thèse, le choix est fait de représenter le problème de façon discrète. Plusieurs fonctions objectif sont utilisées, mais jamais en même temps. Le problème est donc mono objectif avec un objectif pouvant être modifié. Un problème d'affectation quadratique est utilisé pour modéliser le problème. Plusieurs contraintes sont utilisées comme la forme, l'orientation et les points de ramassage et de dépôt des postes de travail avec en plus l'utilisation de données aléatoires. Enfin une résolution approximative du problème est utilisée avec l'emploi de la métaheuristique du recuit simulé.

### 3.3. Synthèse

Dans cette partie, une synthèse des publications utilisées dans le chapitre est regroupée dans les tableaux 1, 2 et 3. Seules les références dont un accès est possible sont répertoriées afin de garantir l'ensemble des informations. L'ensemble des critères qui compose les tableaux provient des différentes parties détaillées tout au long de ce chapitre. Les critères qui ne possèdent aucune référence accessible ne sont pas inscrits dans les tableaux, afin d'éviter des colonnes vides.

| Références                        | Agencement |            | Dimension des postes de travail |             | Agencement   |                      |                  |                       |                     |                |                    | Représentation du problème |          |
|-----------------------------------|------------|------------|---------------------------------|-------------|--------------|----------------------|------------------|-----------------------|---------------------|----------------|--------------------|----------------------------|----------|
|                                   | Produits   | Cellulaire | Régulière                       | Irrégulière | À une rangée | En plusieurs rangées | En double rangée | En rangées parallèles | En rangée en boucle | En champ libre | À plusieurs étages | Discrète                   | Continue |
| Shayan et Chittilappilly (2004)   | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Kim et Kim (2000)                 | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Lee et Kim (2000)                 | X          | -          | -                               | X           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Chwif et al. (1998)               | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Palubeckis (2017)                 | X          | -          | X                               | -           | X            | -                    | -                | -                     | -                   | -              | -                  | X                          | -        |
| Samarghandi et Eshghi (2010)      | X          | -          | X                               | -           | X            | -                    | -                | -                     | -                   | -              | -                  | X                          | -        |
| Kothari (2013)                    | X          | -          | X                               | -           | X            | -                    | -                | -                     | -                   | -              | -                  | X                          | -        |
| Hungerländer et Anjos (2015)      | X          | -          | X                               | -           | -            | X                    | -                | -                     | -                   | -              | -                  | X                          | -        |
| Murray et al. (2013)              | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | X                | -                     | -                   | -              | -                  | -                          | X        |
| Chung et Tanchoco (2010)          | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | X                | -                     | -                   | -              | -                  | -                          | X        |
| Amaral (2013)                     | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | X                     | -                   | -              | -                  | -                          | X        |
| Wang et al. (2015)                | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | X                | -                     | -                   | -              | -                  | -                          | X        |
| Hungerländer (2014)               | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | X                   | -              | -                  | -                          | X        |
| Niroomand et al. (2015)           | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Izadinia et al. (2014)            | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | -              | X                  | -                          | X        |
| Gupta et Seifoddini (1990)        | -          | X          | -                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | -        |
| Emami et S. Nookabadi (2013)      | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |
| Madhusudanan Pillai et al. (2011) | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |
| Peng et al. (2018)                | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |
| Kovács (2019)                     | X          | -          | -                               | X           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Garcia-Hernandez et al. (2019)    | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Friedrich et al. (2018)           | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Yang et Kuo (2003)                | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Aiello et al. (2006)              | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Singh et Ingole (2019)            | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |
| Klausnitzer et Lasch (2019)       | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Guan et al. (2012)                | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |
| Balakrishnan et al. (2003)        | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |
| Kim et Kim (1995)                 | X          | -          | -                               | X           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |
| Jankovits et al. (2011)           | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Welgama et Gibson (1993)          | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Das (1993)                        | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Bock et Hoberg (2007)             | X          | -          | -                               | X           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |
| Pourvaziri et Pierreval (2021)    | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Pourvaziri et al. (2021)          | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Latifi et al. (2017)              | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Friedrich (2018)                  | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | -                          | X        |
| Chiang et Chiang (1998)           | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |
| <b>Travail de thèse</b>           | X          | -          | X                               | -           | -            | -                    | -                | -                     | -                   | X              | -                  | X                          | -        |

Tableau 2-1 : tableau de synthèse des publications ces dans le chapitre (1/3)

| Référence                         | Fonction      |                 | Modélisation et résolution mathématique |                      |          |                  |                        |
|-----------------------------------|---------------|-----------------|---|----------------------|----------|------------------|------------------------|
|                                   | Mono-objectif | Multi-objectifs | Affectation quadratique                 | Basé sur les graphes | Linéaire | En nombre entier | Mixte en nombre entier |
| Shayan et Chittilappilly (2004)   | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Kim et Kim (2000)                 | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Lee et Kim (2000)                 | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Chwif et al. (1998)               | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Palubeckis (2017)                 | X             | -               | -                                       | X                    | -        | -                | -                      |
| Samarghandi et Eshghi (2010)      | X             | -               | -                                       | X                    | -        | -                | -                      |
| Kothari (2013)                    | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Hungerländer et Anjos (2015)      | X             | -               | -                                       | -                    | -        | X                | -                      |
| Murray et al. (2013)              | X             | -               | -                                       | -                    | X        | -                | -                      |
| Chung et Tanchoco (2010)          | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Amaral (2013)                     | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Wang et al. (2015)                | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Hungerländer (2014)               | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Niroomand et al. (2015)           | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Izadinia et al. (2014)            | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Gupta et Seifoddini (1990)        | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Emami et S. Nookabadi (2013)      | -             | X               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Madhusudanan Pillai et al. (2011) | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Peng et al. (2018)                | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Kovács (2019)                     | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Garcia-Hernandez et al. (2019)    | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Friedrich et al. (2018)           | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Yang et Kuo (2003)                | -             | X               | -                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Aiello et al. (2006)              | -             | X               | -                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Singh et Ingole (2019)            | -             | X               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Klausnitzer et Lasch (2019)       | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Guan et al. (2012)                | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Balakrishnan et al. (2003)        | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Kim et Kim (1995)                 | X             | -               | -                                       | X                    | -        | -                | -                      |
| Jankovits et al. (2011)           | X             | -               | -                                       | X                    | -        | -                | -                      |
| Welgama et Gibson (1993)          | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Das (1993)                        | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Bock et Hoberg (2007)             | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Pourvaziri et Pierreval (2021)    | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Pourvaziri et al. (2021)          | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | X                      |
| Latifi et al. (2017)              | X             | -               | -                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| Friedrich (2018)                  | X             | -               | -                                       | -                    | X        | -                | -                      |
| Chiang et Chiang (1998)           | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |
| <b>Travail de thèse</b>           | X             | -               | X                                       | -                    | -        | -                | -                      |

Tableau 2-2 : tableau de synthèse des publications citées dans le chapitre (2/3)

| Référence                         | Contraintes |        |             |                   |                                 |                    | Méthode de résolution            |  |
|-----------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------------------|--|
|                                   | forme       | espace | orientation | non-chevauchement | points de ramassage et de dépôt | données aléatoires | exacte (solveur)                 | approchée  |
| Shayan et Chittilappilly (2004)   | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | Algorithme génétique   |
| Kim et Kim (2000)                 | -           | -      | X           | X                 | X                               | -                  | -                                | Heuristique développée par les auteurs                                 |
| Lee et Kim (2000)                 | -           | -      | X           | X                 | X                               | -                  | -                                | Heuristique  |
| Chwif et al. (1998)               | X           | -      | X           | X                 | X                               | -                  | -                                | Recuit simulé  |
| Palubeckis (2017)                 | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Recuit simulé  |
| Samarghandi et Eshghi (2010)      | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Recherche Tabou  |
| Kothari (2013)                    | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Recherche Tabou  |
| Hungerländer et Anjos (2015)      | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Heuristique  |
| Murray et al. (2013)              | -           | -      | -           | X                 | X                               | -                  | -                                | Heuristique  |
| Chung et Tanchoco (2010)          | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | Cinq heuristiques différentes  |
| Amaral (2013)                     | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | CPLEX                            | -  |
| Wang et al. (2015)                | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | Recuit simulé  |
| Hungerländer (2014)               | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | Heuristique  |
| Niroomand et al. (2015)           | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | Métaheuristique des oiseaux migrateurs                                 |
| Izadnia et al. (2014)             | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | GAMS software                    | -  |
| Gupta et Seifoddini (1990)        | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | -  |
| Emami et S. Nookabadi (2013)      | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Algorithme génétique, évolution différentielle, recuit simulé + Pareto |
| Madhusudanan Pillai et al. (2011) | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Recuit simulé  |
| Peng et al. (2018)                | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Algorithme génétique   |
| Kovács (2019)                     | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | -  |
| Garcia-Hernandez et al. (2019)    | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | Métaheuristique des récifs coralliens                                  |
| Friedrich et al. (2018)           | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | Métaheuristique de la recherche à voisinage variable                   |
| Yang et Kuo (2003)                | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Analyse par enveloppement de données                                   |
| Aiello et al. (2006)              | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | Pareto + algorithme génétique  |
| Singh et Ingole (2019)            | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Métaheuristique de la biogéographie + Pareto                           |
| Klausnitzer et Lasch (2019)       | -           | X      | -           | -                 | -                               | -                  | CPLEX                            | -  |
| Guan et al. (2012)                | -           | -      | -           | -                 | X                               | -                  | -                                | Essaim de particules électromagnétiques                                |
| Balakrishnan et al. (2003)        | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Recuit simulé  |
| Kim et Kim (1995)                 | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Heuristique  |
| Jankovits et al. (2011)           | -           | -      | -           | X                 | -                               | -                  | -                                | Algorithme génétique   |
| Welgama et Gibson (1993)          | -           | -      | -           | X                 | X                               | -                  | -                                | Heuristique  |
| Das (1993)                        | -           | -      | -           | X                 | X                               | -                  | -                                | Heuristique ad hoc   |
| Bock et Hoberg (2007)             | -           | -      | -           | X                 | X                               | -                  | -                                | Heuristique  |
| Pourvaziri et Pierreval (2021)    | -           | X      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Algorithme génétique   |
| Pourvaziri et al. (2021)          | -           | X      | X           | X                 | X                               | -                  | CPLEX (Branch and cut algorithm) | -  |
| Latifi et al. (2017)              | -           | -      | X           | -                 | -                               | -                  | -                                | Métaheuristique de la chauve souris                                    |
| Friedrich (2018)                  | -           | -      | -           | -                 | X                               | -                  | -                                | Heuristique  |
| Chiang et Chiang (1998)           | -           | -      | -           | -                 | -                               | -                  | -                                | Recherche Tabou  |
| Travail de thèse                  | X           | -      | X           | -                 | X                               | X                  | -                                | Recuit simulé  |

Tableau 2-3 : tableau de synthèse des publications citées dans le chapitre (3/3)

## 4. Conclusion

Ce chapitre présente un ensemble de travaux de recherches qui traitent des problèmes d'implantation d'atelier. La première partie présente l'ensemble des caractéristiques ayant un impact sur l'implantation des postes de travail dans une usine, dont la variété des produits, leurs volumes, l'approche de planification, la forme et la dimension des postes de travail et l'organisation des lignes de production autour des différents systèmes de transport qui peuvent exister. La seconde partie de ce chapitre se focalise sur les différentes méthodes pour formuler un problème d'implantation d'atelier. Elle aborde notamment la méthode de représentation, les différentes fonctions objectif utilisées, les modélisations mathématiques existantes et les contraintes. Enfin la dernière partie décrit les différentes approches de résolution des problèmes d'implantation d'atelier comme les méthodes pratiques, les approches exactes, stochastiques et approximatives, dont le recuit simulé.

L'état de l'art réalisé dans ce chapitre permet de mettre en exergue quelques limites dans les travaux effectués concernant les prises en compte des orientations et forme des machines. Ainsi aucun auteur n'a utilisé de représentation discrète pour modéliser la forme et les orientations des machines.

À notre connaissance, excepté Guan et al. (2012) personne d'autre n'a modélisé le sujet en utilisant un graphe et en prenant en compte les formes et les orientations en plus du placement des machines lors de la modélisation de ce type de problème. C'est pourquoi nous avons décidé de prendre en compte l'ensemble de ces éléments en plus de ceux évoqués dans le chapitre 1 pour modéliser un système de production configurable.

## Chapitre 3 : méthodologie de résolution du problème d'implantation

Le chapitre précédent a permis de mettre en évidence qu'il existe peu de travaux dans la littérature qui abordent conjointement la planification multi-périodes et les problèmes d'implantation des RMS (Reconfigurable Manufacturing Systems). De plus à notre connaissance les travaux concernant les problèmes d'implantation d'atelier dans les RMS permettant la modélisation conjointe des machines, de leurs orientations ainsi que leurs formes sont peu nombreux. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous prenons en compte l'ensemble de ces aspects via une modélisation discrète et nous présentons une méthode de résolution de ce problème. Nous proposons ainsi de modéliser le réseau de transport de l'atelier à l'aide d'un graphe dans lequel les nœuds encadrent les postes de travail. Le robot mobile autonome (RMA) se déplace en parcourant les arrêtes pouvant être assimilées aux couloirs de circulation. À chaque début de période, une reconfiguration de l'atelier est proposée pour diminuer au maximum la distance parcourue par le RMA pour déplacer les produits de machine en machine. La première partie présente les hypothèses de travail, le problème étudié ainsi que le vocabulaire employé. C'est dans cette partie qu'est présentée la modélisation des machines avec la possibilité de modifier leurs implantation, orientation et forme. La seconde partie présente le modèle mathématique du problème. Les extensions faites au modèle, qui a servi de point de départ, sont la prise en compte de l'orientation et de la forme des machines. La troisième partie détaille la méthode de résolution. Cette méthode est basée sur la métaheuristique du recuit simulé exploitant un codage qui permet de changer plusieurs caractéristiques des machines.

### 1. Présentation du problème d'implantation

#### 1.1. Contexte et hypothèses de travail

Plusieurs demandes de transport sont à satisfaire au sein d'un atelier pour alimenter la production. Ces demandes sont réparties sur plusieurs périodes. Pour chaque période, un ensemble de produits est présent à la sortie des machines et doit être transporté à la machine suivante. Les produits sont déplacés en utilisant un seul RMA. Nous supposons que les machines peuvent être déplacées, à l'aide du RMA, à chaque début d'une nouvelle période de production. Un ensemble d'hypothèses est exprimé pour délimiter globalement le problème :

- le choix est fait de travailler dans un environnement discret. Ainsi, la zone de l'atelier est découpée en rectangles, appelés sites. Chaque machine est placée sur un site. L'association d'une machine sur un site forme un ensemble appelé poste de travail.
- La réimplantation d'une machine représente le déplacement d'une machine d'un site à un autre. Chaque déplacement d'une machine au sein de l'atelier engendre un coût de reconfiguration.
- la demande de transport représente l'ensemble des produits à déplacer au cours d'une période.

Pour définir le cadre de travail, un ensemble d'hypothèses est fixé. Ces hypothèses sont groupées en fonction des trois entités principales qui composent le problème à savoir : les

machines, l'atelier et le robot mobile autonome. Les hypothèses sont numérotées de la façon suivante  $H_i$ ,  $i$  correspondant au numéro de l'hypothèse.

### 1.1.1. Modélisation des machines (H1)

L'une des caractéristiques importantes des RMS est la modularité des machines qui les composent. Cette modularité physique permet d'autoriser des machines changeant de formes. Nous avons donc choisi d'intégrer cette modularité dans la modélisation proposée. Plus précisément, une machine implantée dans l'atelier est représentée par un rectangle sur lequel sont positionnés un point de ramassage et un point de dépôt. Le point de ramassage des produits (c.-à-d. le triangle noté R) représente l'endroit à partir duquel un produit est ramassé pour être transporté par le RMA vers une autre machine. Le point de dépôt (c.-à-d. le triangle noté D) représente le point sur lequel le produit arrivant d'une autre machine par le RMA est déposé. Nous supposons que chaque ne possède qu'un seul point de dépôt et un seul point de ramassage. La Figure 3-23 représente un exemple de machine associée à un couple de points R et D.

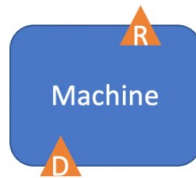


Figure 3-23 : représentation d'une machine

### 1.1.2. Orientation des machines (H2)

Les trois rotations successives à droite de  $90^\circ$  de la machine représentée par la Figure 3-23 génèrent un total de 4 orientations possibles et différentes (Figure 3-24).

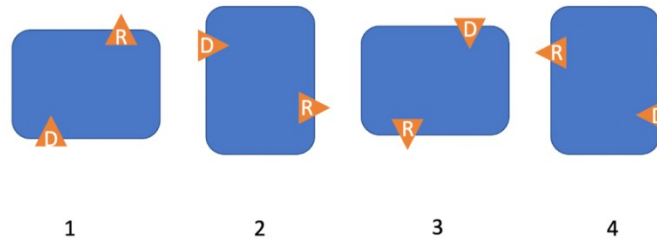


Figure 3-24 : orientations possibles d'une machine

### 1.1.3. Forme des machines (H3)

La disposition des points R et D sur les faces de la machine permet d'obtenir 5 formes différentes décrites ci-après :

- Forme en I : une machine possède une forme en I si les points R et D sont situés sur deux côtés à l'opposé l'un de l'autre. La machine illustrée par la Figure 3-24 avec ses quatre orientations possibles est du type I.
- Forme en L : une machine possède une forme en L si les points R et D sont situés sur deux côtés adjacents avec le point R avant le point D en regardant dans le sens horaire.

L'ensemble des orientations de la Figure 3-25 est obtenu par trois rotations à droite de  $90^\circ$  d'une machine en forme de « L ».

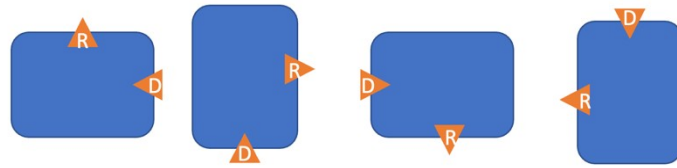


Figure 3-25 : orientations possibles pour une machine avec une forme en L

- Forme en L' : la forme en L' est proche de la forme en L à ceci près que les points R et D sont échangés. Ceci donne par rotation les orientations de la Figure 3-26.

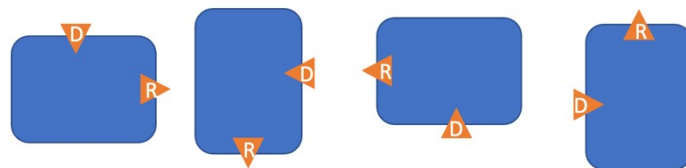


Figure 3-26 : orientations possibles pour une machine avec une forme en L'

- Forme en U : une machine possède une forme en U si les points R et D sont situés sur le même côté avec le point R avant le point D en regardant dans sens horaire. L'ensemble des quatre orientations de la Figure 3-27 est obtenu par des rotations à droite de  $90^\circ$  pour une machine de forme « U ».

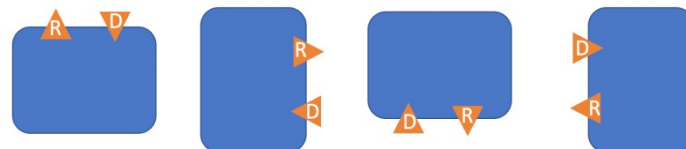


Figure 3-27 : orientations possibles pour une machine avec une forme en U

- Forme en U' : la forme en U' est proche de la forme en U à ceci près que les points R et D sont échangés. Ceci donne les orientations de la Figure 3-28 par application des rotations vers la droite.

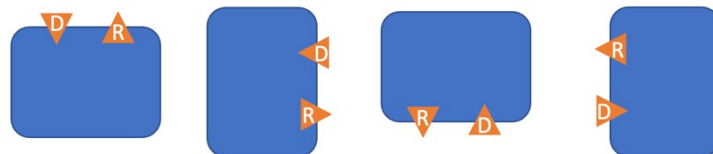


Figure 3-28 : orientations possibles pour une machine avec une forme en U'

#### 1.1.4. Configuration et reconfiguration d'une machine (H4)

Chaque machine est caractérisée par le numéro du site sur lequel elle est implantée, son orientation et sa forme. Cet ensemble s'appelle la configuration. Nous parlons de



reconfiguration d'une machine lors de la modification d'au moins une de ces trois caractéristiques. Concrètement, dans un atelier, la reconfiguration d'une machine se déroule en trois étapes. Par exemple, la reconfiguration de la machine B sur le site i peut se dérouler comme suit : la machine B est tout d'abord implantée sur le site i (Figure 3 -29a&b). Dans un second temps, la machine B est placée dans l'orientation choisie (Figure 3 -29c). Enfin dans un troisième temps, la forme de la machine B est appliquée en modifiant son point de ramassage et/ou son point de dépôt (Figure 3 -29d). Dans le chapitre quatre, nous verrons qu'il existe différents ordres de configuration d'une machine sur un site et qu'il est possible de reconfigurer qu'une seule des trois caractéristiques.

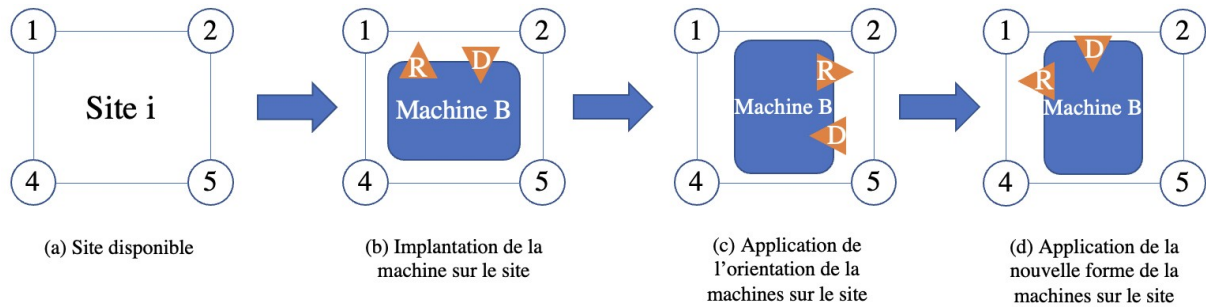


Figure 3-29 : étapes de la reconfiguration d'un site

#### 1.1.5. Atelier (H5-H7)

Dans l'atelier sont présents des sites sur lesquelles sont placées les machines. Nous supposons que le nombre de machines est égal au nombre de sites (H5). Un site ne peut recevoir qu'une seule machine et une machine ne peut être attribuée qu'à un seul site (H6). La configuration de l'atelier (CA) correspond à la configuration de l'ensemble des machines au sein de l'atelier. Une reconfiguration d'atelier correspond au passage d'une CA à une autre. L'atelier est modélisé en utilisant un graphe (H7) décrit dans le paragraphe 1.3.

#### 1.1.6. Robot mobile autonome – RMA (H8-H13)

Le RMA est en charge de l'ensemble des transports des produits et des machines. La capacité du RMA est fixée à un seul produit ou machine par déplacement (H8).

- Deux types de trajets sont possibles lors du déplacement des produits :
  - les trajets dits « en charge » sont les trajets réalisés par le RMA pour transporter un produit d'une machine à une autre. Ce type de trajet se fait toujours d'un point de R vers un point de D (H9).
  - les trajets dits « à vide » sont les trajets réalisés par le RMA sans produit pour se déplacer d'une machine à une autre. Un trajet à vide se fait toujours d'un point de D vers un point de R (H10).
- Comme pour les produits, deux types de trajets sont également pris en compte lors du déplacement des machines :

- les trajets en charge lors du déplacement d'une machine d'un site de départ à un site de destination (H11). La distance prise en compte est comprise entre le centre d'un site de départ et le centre du site de destination.
  - les trajets à vide lorsque le RMA se déplace sans machine (H12).
- La distance parcourue par le RMA pour atteindre sa vitesse de déplacement nominale est supposée nulle (zéro mètre) et sa vitesse est constante tout au long du trajet (H13).

## 1.2. Modélisation de l'atelier

Le graphe permet une modélisation discrète de l'atelier, et des sites sur lequel sont implantées les machines. Les arrêtes représentent de façon simplifiée les couloirs de déplacement entre les machines sur lesquelles le RMA peut se déplacer. Une valeur est associée à chacune des arrêtes. Elle correspond à la distance séparant deux sommets. Les points R et D des machines sont représentés par des sommets positionnés sur les arrêtes.

Ainsi, il est possible de déterminer la distance totale parcourue par le RMA, que nous cherchons à minimiser, en calculant la distance entre un point de ramassage et un point de dépôt (et inversement) par la recherche du chemin le plus court entre les deux sommets correspondants du graphe.

Le graphe est non orienté : cela signifie que le RMA peut se déplacer sur les arrêtes du graphe dans les deux sens possibles. La Figure 3-30 représente un graphe sans machine (à gauche) et un graphe avec quatre machines (à droite). Du point de vue des graphes, le placement d'une machine sur un site se traduit par l'ajout de deux sommets correspondant aux points R et D dans le graphe du réseau de transport. La Figure 3-30 (à droite) est la superposition de deux représentations, celle du graphe et celle des machines. Ainsi la machine n°1 est implantée sur le site n°1, la machine n°2 sur le site n°2 la machine n°3 sur le site n°3 et la machine n°4 sur le site n°4. De plus, les numéros des points de ramassage (représentés par des triangles en orange) et de dépôt (représentés par des triangles en bleu) indiquent le numéro des machines présentes sur les sites. Nous pouvons en déduire que les machines présentes sur les sites un, deux, et trois sont dans l'orientation « 4 » et ont une forme en « L ». La machine présente sur le site quatre est dans l'orientation « 1 » et a une forme en « L' ».

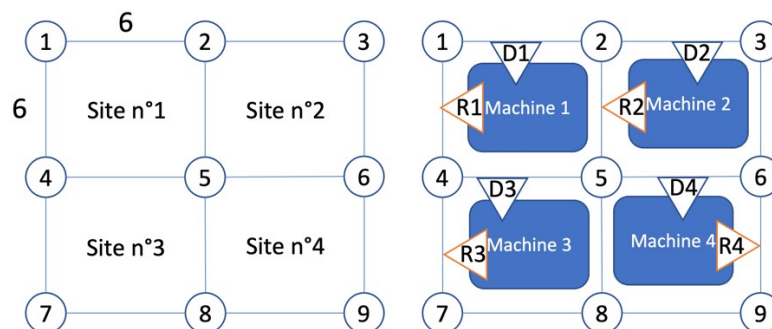


Figure 3-30 : exemple de graphe sans machine (à gauche) et composé de quatre machines (à droite)

À l'état initial des expérimentations proposées dans le chapitre suivant, chaque machine est configurée comme suit dans l'atelier : la machine  $i$  est implantée sur le site  $i$ . L'orientation « 1 » des machines est choisie pour l'ensemble des machines. La forme « L » des machines est également identique pour toutes les machines. L'ensemble est appelé configuration initiale de l'atelier.

### 1.3. Présentation du problème de reconfiguration

La Figure 3-31 illustre le scénario de production qui débute par la configuration initiale de l'atelier. Lors d'une nouvelle demande de transport, marquant le début d'une nouvelle période de planification, une reconfiguration de l'atelier est recherchée en vue d'obtenir une configuration répondant au mieux à la demande de transport de la période. Cette configuration est inchangée jusqu'à ce qu'une nouvelle demande de transport arrive. Ainsi chaque période de planification se compose de deux phases : dans la première l'atelier est reconfiguré et dans la seconde la production se réalise et les produits sont transportés. À chaque configuration, un graphe est reconstruit.

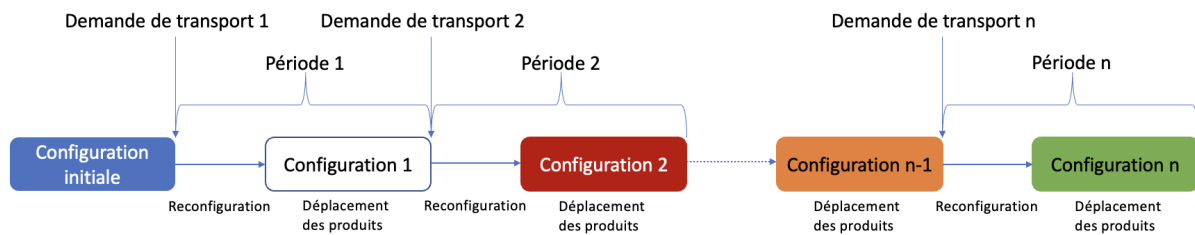


Figure 3-31 : scénario de planification

#### 1.3.1. Reconfiguration de l'atelier

L'objectif est de déterminer la configuration de l'atelier de façon à ce que la distance parcourue par le RMA, pour répondre à la demande de transport, soit la plus faible possible. Pour cela nous prenons en compte dans les calculs deux coûts. Le premier correspond au coût de déplacement des machines d'un site à l'autre : il est lié à la distance requise pour déplacer les machines. Le second, considéré identique pour chacune des machines, correspond au coût de remise en fonctionnement de chaque machine, avec par exemple des branchements en énergie, des réglages de la machine. Ce coût est pris en compte uniquement lors du déplacement de la machine d'un site à un autre. Pour chaque déplacement du robot, une recherche du plus court chemin est réalisée en utilisant l'algorithme de Dijkstra.

#### 1.3.2. Déplacement des produits

Le déplacement des produits est séparé en deux étapes. La première consiste dans le déplacement du RMA avec un produit et la seconde consiste dans le déplacement du RMA sans transporter de produit.

##### 1.3.2.1. Trajets en charge

Les trajets à effectuer en charge (Figure 3-32) font partie des données du problème (demandes de transport). Ces trajets sont à effectuer depuis les points de ramassage  $R_m$  correspondant aux offres  $Off_m$  de produits, jusqu'aux points de dépôt  $D_m$  correspondant aux demandes  $Dem_m$ . Les distances entre les points  $R_m$  et  $D_m$  sont notés  $Dist_{R_mD_m}$ .

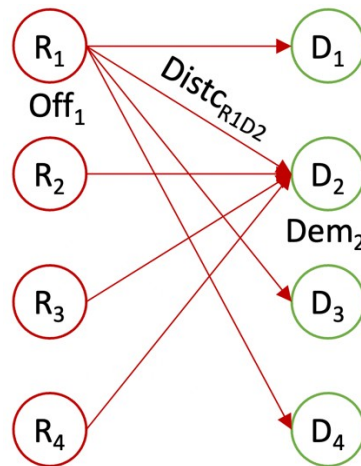


Figure 3-32 : demandes de transport en charge de l'exemple de la Figure 3-30

### 1.3.2.2. Trajets à vide

Les trajets à vide, quant à eux, sont les variables du problème à optimiser afin de parcourir le moins de distance possible. Ce problème correspond à un problème classique de transport dont l'objectif est d'optimiser les quantités transportées entre des entrepôts et des clients. Dans notre cas, les entrepôts sont remplacés par les points de dépôt  $D_m$ , les clients par les points de ramassage  $R_m$  et les coûts sont représentés par les distances (Figure 3-33). Comme nous sommes en présence de trajets à vide, il s'agit d'une vision duale du problème de transport classique (aucun produit n'est déplacé). Ce problème est contraint par les trajets en charge déjà connus :

- En effet, comme le RMA ne peut transporter qu'un seul produit ; à chaque fois qu'il déplace un produit jusqu'au point  $D$  d'une machine, il repart à vide pour aller ramasser un nouveau produit. Par exemple, si le RMA doit déposer 3 produits en  $D_m$ , alors il devra également repartir trois fois de  $D_m$ . Ainsi l'offre de transport à vide du RMA en  $D_m$  correspond à  $Dem_m$ .
- De la même façon, à chaque fois que le RMA part d'un point de ramassage avec un produit, il devra y venir à vide. Ainsi la demande de transport à vide du RMA en  $R_m$  correspond à  $Off_m$ .

Lors d'un déplacement, la distance à parcourir par le RMA correspond à la distance la plus courte entre les points de dépôt et de ramassage concernés ( $Distv_{D_m, R_m}$ ). Ainsi la résolution du problème de transport permet de déterminer les trajets à vide à réaliser et également la distance totale à vide que le robot va parcourir.

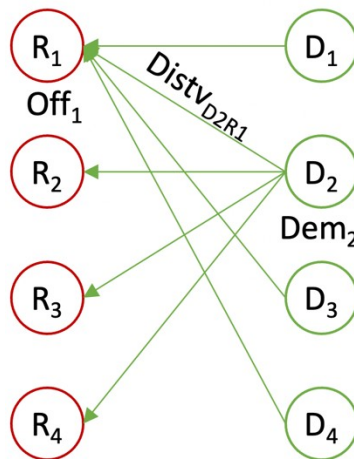


Figure 3-33 : modèle de transport à vide de l'exemple de la Figure 3 -30

## 2. Modélisation mathématique du problème

La présentation du problème étant détaillée dans la précédente partie, nous détaillons à présent la modélisation mathématique du problème. Notre modèle est basé sur la formulation de Guan et al. (2012). Leur modèle prend en compte le déplacement des machines, mais pas le déplacement des points de ramassage et de dépôt qui restent solidaires du site. Dans le modèle de cette thèse, nous avons fait le choix de lier les points R et D aux machines, ils sont donc devenus mobiles. De plus, nous prenons également en compte l'orientation et la forme des machines. Une vision multi-périodes est aussi proposée. Chaque période est associée à une demande de transport. Le modèle d'optimisation est également enrichi par la possibilité de choisir entre un critère d'optimisation sur la distance parcourue, un second sur l'énergie consommée et un troisième sur l'effort de déplacement. Les ensembles et les indices utilisés dans la modélisation sont tout d'abord présentés. Les parties suivantes explicitent les paramètres puis les contraintes liées aux hypothèses. Enfin dans une dernière partie, les différentes fonctions objectif utilisées sont détaillées.

### 2.1. Ensembles et indices

| Ensembles |                                     | Indices       |  |
|-----------|-------------------------------------|---------------|--|
| M         | Ensemble des machines               | $m, m' \in M$ | Indices du numéro de machine                 |
| O         | Ensemble des orientations possibles | $o, o' \in O$ | Indices de l'orientation de machine          |
| F         | Ensemble des formes possibles       | $f, f' \in F$ | Indices de la forme de machine               |
| S         | Ensemble des sites                  | $s, s' \in S$ | Indices de site                              |
| P         | Ensemble des périodes temporelles   | $p \in P$     | Indice de période                            |
| R         | Ensemble des points de ramassage    | $rm \in R$    | Indice du point de ramassage de la machine m |
| D         | Ensemble des points de dépôt        | $dm \in D$    | Indice du point de dépôt de la machine m     |

## 2.2. Paramètres du modèle

### 2.2.1. Pour le calcul de la distance

|                  |  |
|------------------|--|
| $Tc_{mm'p}$      | Demande de transport (i.e trajet en charge) de la machine $m$ à la machine $m'$ , exprimée en nombre de produits à déplacer par le RMA lors de la période de temps $p$ . Notons que la demande de transport notée $Off_m$ dans la première partie introductive de ce chapitre correspond de façon détaillée à la somme suivante $\sum_{m'} Tc_{mm'}$ . |
| $Cimp$           | Coût d'implantation d'une machine.   |
| $DistSite_{s's}$ | Distance du site $s'$ au site $s$ .  |

### 2.2.2. Pour le calcul de l'énergie consommée et de l'effort de déplacement

|  |   |
|--|---|
| $Ma_{RMA}, Ma_{produit}, Ma_{machine}$ | Respectivement masse du RMA, du produit et de la machine. |
| $V$                                    | Vitesse de déplacement du RMA                             |
| $\mu$                                  | Coefficient de roulement                                  |
| $g$                                    | Constante gravitationnelle                                |

## 2.3. Variables

|                |  |
|----------------|--|
| $Tv_{mm'p}$    | Variable entière du nombre de trajets à vide de la machine $m$ à la machine $m'$ , effectués par le RMA lors de la période de temps $p$ .  |
| $M_{mofsp}$    | Variable binaire qui vaut 1 si la machine $m$ est dans l'orientation $o$ , avec la forme $f$ , sur le site $s$ lors de la période de temps $p$ ; 0 sinon.  |
| $Distc_{mm'p}$ | Distance pour un trajet en charge du point de ramassage de la machine $m$ au point de dépôt de la machine $m'$ . Cette variable est évaluée par l'appel de l'algorithme de Dijkstra pour le calcul du plus court chemin. |
| $Distv_{mm'p}$ | Distance pour un trajet à vide du point de dépôt de la machine $m$ jusqu'au point de ramassage de la machine $m'$ . Cette variable est évaluée par l'appel de l'algorithme de Dijkstra.                                  |

## 2.4. Contraintes

Dans cette partie, nous formulons les contraintes du modèle mathématique du problème.

$$\sum_{m,o,f} M_{mofsp} = 1, \forall s, \forall p \quad \text{Équation 3-6}$$

$$\sum_{s,o,f} M_{mofsp} = 1 \forall m, \forall p \quad \text{Équation 3-7}$$

$$\sum_m Tc_{mm'p} = \sum_m Tv_{m'm'p} \forall m', \forall p \quad \text{Équation 3-8}$$

$$\sum_m Tv_{mm'p} = \sum_m Tc_{m'm'p} \forall m', \forall p \quad \text{Équation 3-9}$$

$$Tv_{mm'p} \geq 0, \forall m, \forall m', \forall p \quad \text{Équation 3-10}$$

$$M_{mofsp} \in \{0,1\}, \forall m, \forall o, \forall f, \forall s, \forall p \quad \text{Équation 3-11}$$

Sur chaque période, chaque site ne peut recevoir qu'une seule machine  $m$  de forme  $f$  dans une orientation  $o$  (Équation 3 -6). Pour une période donnée, chaque machine est affectée à un seul site  $s$  avec l'orientation  $o$  et la forme  $f$  (Équation 3 -7). Ces deux premières équations permettent de modéliser l'hypothèse H6 en intégrant par ailleurs les caractéristiques de forme et d'orientation. Pour chaque machine  $m'$  et dans une période donnée  $p$ , la somme du nombre de trajets du RMA en charge arrivant à la machine  $m'$ , est égale à la somme du nombre de trajets du RMA à vide partant de cette même machine  $m'$  (Équation 3 -8). Pour chaque machine  $m'$  et dans une période donnée  $p$ , la somme du nombre des départs du RMA en charge est égale à la somme du nombre d'arrivées à vide sur cette même machine  $m'$  (Équation 3 -9). Ces deux équations (Équation 3 -8 et Équation 3 -9) traduisent le comportement du RMA vu en 1.3.2.2.. Le nombre de trajets à vide est supérieur ou égal à 0 (Équation 3 -10). La variable  $M_{mofsp}$  est binaire (Équation 3 -11) pour toute machine  $m$ , orientation  $o$ , forme  $f$ , site  $s$  et période  $p$ .

## 2.5. Fonctions objectif

Comme dans la plupart des cas vus en littérature, lors de l'étude d'un RMA, l'objectif à minimiser est la distance totale parcourue par ce dernier (Équation 3 -14). La dimension du développement durable a été intégrée avec la prise en compte du coût énergétique engendré par le déplacement du RMA (Équation 3 -18). Cette dimension a été ajoutée parce que c'est une des préoccupations majeures de nos jours. De plus actuellement l'industrie est à l'origine de 18%<sup>5</sup> des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde. Une troisième fonction objectif étudiée est celle de l'effort de déplacement d'une masse, exprimé en tonne-kilomètre ou kilogramme-mètre, qui est calculé en faisant le produit de la masse déplacée par la distance parcourue (Équation 3 -21).

- La distance parcourue et le coût de reconfiguration

Les déplacements en charge et à vide composent la distance parcourue par le RMA pour répondre aux demandes de transport des produits pendant la phase de production. Ce « coût » de déplacement des produits est calculé par la formule suivante :

$$\sum_{p,m,o,f,s,m',o',f',s'} (M_{mofsp} M_{m'o'f's'p} Tc_{mm'p} Dist_{mm'p} + M_{mofsp} M_{m'o'f's'p} Tv_{mm'p} L) \quad \text{Équation 3-12}$$

<sup>5</sup> <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/7-repartition-sectorielle-des-emissions-de>

Lors de la phase de reconfiguration, le RMA est utilisé pour déplacer une machine d'un site de départ vers un site d'arrivée. Il faut donc aussi compter cette distance parcourue par le RMA, ainsi que le coût d'implantation de la machine. Dans l'équation suivante (Équation 3-13), si la machine n'est pas déplacée d'une période à l'autre, alors les variables  $M_{mofsp}$  et  $M_{mofs(p-1)}$  sont identiques. Les deux valeurs, soustraites, s'annulent et le résultat de l'équation est égal à zéro. La présence du  $\frac{1}{2}$  devant l'Équation 3-13 provient du fait qu'un mouvement de machine entre deux sites est comptabilisé à deux reprises : lorsqu'elle quitte son précédent site et lorsqu'elle est placée sur son nouveau site le « coût déplacement machines » vaut :

$$\frac{1}{2} \sum_{p,s,m} \left[ \sum_{o,f} M_{mofsp} - \sum_{o,f} M_{mofs(p-1)} \left( \sum_{s'} \left( \sum_{o,f} M_{mofs'(p-1)} \right) DistSite_{s's} + Cimp \right) \right] \quad \text{Équation 3-13}$$

$$C_{tot} = \text{Coût déplacement produits (Équation 3-12)} + \text{Coût déplacement machines (Équation 3-13)} \quad \text{Équation 3-14}$$

L'objectif est de minimiser  $C_{tot}$  :  $\text{Min}(C_{tot})$ .

- L'énergie consommée

Dans ce cas, le « coût » de déplacement des produits représente la consommation d'énergie engendrée pour déplacer un produit d'une machine de départ vers une machine de destination. Le calcul de la consommation d'énergie prend pour point de départ l'équation de (Choi and Xirouchakis, 2015) qui est exprimée comme suit :

$$E_{ij}^{PHS(AGV)} = \frac{(m_{AGV} + m_p) \left[ (v_{AGV2}^2 - v_{AGV1}^2) + \mu \cdot g \cdot s_2 \right] + (m_{AGV} + m_p - m_c) \left[ (v_{AGV2}^2 - v_{AGV1}^2) + \mu \cdot g \cdot s_2 \right]}{n_{pallet}^{part}} \quad \text{Équation 3-15}$$

Avec :

- $m_p$  est la masse de la palette chargée de pièces (kg)
- $m_c$  est la masse totale de matériau retiré des pièces montées sur la palette (kg)
- $S_2$  est la distance
- $m_{AGV}$  est la masse de l'AGV (s'il est déchargé, ou la masse totale de l'AGV et de la charge transportée s'il est chargé)
- $v_{AGV2}$  est la vitesse finale de l'AGV
- $v_{AGV1}$  est la vitesse initiale de l'AGV (dans la plupart des cas, nous pouvons la supposer nulle)
- $\mu$  est le facteur de résistance des roues
- $g$  constante gravitationnelle
- $n_{pallet}^{part}$  correspond au nombre de produits déplacés par palette

L'équation suivante (Équation 3-16) se compose de deux parties. La première partie calcule l'énergie consommée lors du transport des produits ( $T c_{mm}$ ) d'une machine ( $M_{mofsp}$ ) vers une



autre machine ( $M_{m'of's'p}$ ). Ce coût fait appel à la masse à mettre en mouvement (soit la masse du RMA  $Ma_{RMA}$  et celle du produit  $Ma_{Produit}$ ) pour atteindre la vitesse de déplacement ( $V_{RMA}$ ). Puis est ajoutée la consommation pour maintenir la vitesse sur la distance parcourue ( $\mu * g * Dist_{mm'p}$ ). La seconde partie de l'équation concerne le coût des déplacements à vide. Il est calculé de façon similaire avec une masse à déplacer qui correspond à celle du robot. L'« énergie déplacement produits » est déterminée ainsi :

$$\sum_{p,m,o,f,s,m',o',f',s'} M_{mofsp} M_{m'of's'p} Tc_{mm'p} (Ma_{RMA} + Ma_{Produit}) V_{RMA}^2 + \mu g Dist_{mm'p} \quad \text{Équation 3-16}$$

Le coût de déplacement machine représente la consommation d'énergie engendrée pour déplacer une machine d'un site de départ vers un site d'arrivée. Dans l'équation suivante (Équation 3 -17), si la machine n'est pas déplacée, les variables  $M_{mofsp}$  et  $M_{mofs(p-1)}$  sont identiques. Leur différence vaut donc zéro ce qui annule le résultat de l'équation. Si les deux variables sont différentes alors la consommation d'énergie pour déplacer la machine est calculée. L'« énergie déplacement machines » vaut alors :

$$\frac{1}{2} \sum_{p,m,s} \left[ \sum_{o,f} M_{mofsp} - \sum_{o,f} M_{mofs(p-1)} \right] \left( (Ma_{RMA} + Ma_{machine}) V_{RMA}^2 + \sum_{s'} \left( \sum_{o,f} M_{mofs'(p-1)} \right) \right) \quad \text{Équation 3-17}$$

$$E_{tot} = \text{Energie dépensée pour le déplacement produits (Équation 3 -16)} + \text{Energie dépensée pour le déplacement machines (Équation 3 -17)} \quad \text{Équation 3-18}$$

L'objectif est de minimiser  $E_{tot}$  :  $\text{Min}(E_{tot})$

- L'effort de déplacement

L'effort de déplacement des produits représente la masse du produit multiplié par la distance parcourue pour déplacer un produit d'une machine de départ vers une machine de destination. L'équation suivante (Équation 3 -19) se compose de deux parties. La première partie calcule l'effort de déplacement lors du transport des produits ( $Tc_{mm'p}$ ) d'une machine ( $M_{mofsp}$ ) à une autre machine ( $M_{m'of's'p}$ ). Ce coût fait appel à la masse en déplacement, du RMA ( $i, i$ ) et d'un produit ( $Ma_{Produit}$ ), qui sont additionnées. La seconde partie de l'équation concerne le coût des déplacements à vide. Il reprend la première partie de l'équation excepté la masse des produits qui n'est plus à prendre en compte. L'« effort déplacement produits » est déterminé ainsi :

$$\sum_{p,m,o,f,s,m',o',f',s'} M_{mofs} M_{m'of's} Tc_{mm'p} Dist_{mm'p} (Ma_{RMA} + Ma_{Produit}) + M_{mofs} M_{m'of'} \quad \text{Équation 3-19}$$

L'effort de déplacement des machines est représenté par la masse de la machine multipliée par la distance parcourue d'un site de départ vers un site de destination. Dans l'équation suivante (Équation 3 -20), si la machine n'est pas déplacée les variables  $M_{mofsp}$  et  $M_{mofs(p-1)}$  ont toutes les deux pour valeur 1. Les deux valeurs, soustraites, s'annulent et le résultat de l'équation est égal à zéro. Si les deux valeurs sont différentes, alors l'effort de déplacement pour déplacer la machine est calculé. L'effort de déplacement des machines s'écrit ainsi :

$$\frac{1}{2} \sum_{p,m,s} \left[ \sum_{o,f} M_{mofsp} - \sum_{o,f} M_{mofs(p-1)} \right] (Ma_{RMA} + Ma_{machine}) \sum_{s'} \left( \sum_{o,f} M_{mofs'(p-1)} \right) DistS \quad \text{Équation 3-20}$$

$$Ef_{tot} = \text{Effort déplacement produits (Équation 3-19)} + \text{Effort déplacement machines (Équation 3-20)} \quad \text{Équation 3-21}$$

L'objectif est de minimiser  $Ef_{tot}$  :  $\text{Min}(Ef_{tot})$

### 3. Méthode de résolution et application du recuit simulé

Dans la partie précédente, nous avons présenté le modèle mathématique du problème. Cependant, l'Équation 3-12, notamment, qui multiplie deux variables entre elles ( $M_{mofsp}$  et  $M_{mofs'(p-1)}$ ) introduit une non-linéarité et caractérise un problème d'affectation quadratique qui est un problème d'optimisation de grande complexité. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 (partie 3.2.2), une approche approximative (heuristique ou métaheuristique) est plus appropriée pour des problèmes de ce type lorsque la taille des instances est importante. À titre indicatif un atelier composé de 25 machines, comportant chacune quatre orientations ainsi que cinq formes possibles, génère un total de  $5,5 \cdot 10^{57}$  ( $25! \times 4^{25} \cdot 5^{25}$ ) combinaisons possibles. C'est pourquoi nous utilisons la métaheuristique « recuit simulé » (RS). Le RS a déjà été brièvement abordé dans le chapitre 2. Dans cette partie, son adaptation au cas d'étude est détaillée. Plus d'informations sur le RS telles que par exemple son origine, la condition de Metropolis, les paramètres du RS, pour finir par la recherche de voisin et les critères d'arrêt de l'algorithme sont présentés dans l'annexe Recuit simulé. Le rôle du RS est d'évaluer une nouvelle solution vis-à-vis de la solution courante.

#### 3.1. Paramètres d'entrées

Trois paramètres principaux en entrée du recuit simulé sont utilisés afin d'orienter son fonctionnement.

- La configuration initiale d'atelier : il s'agit de la première solution à évaluer par l'algorithme.
- Le choix de la recherche de voisin : ce paramètre correspond à la possibilité d'utiliser plusieurs méthodes de recherches de voisins différentes, mais également de les combiner.
- Le niveau de la solution à optimiser : ce paramètre identifie le (les) niveau(x) de la solution à optimiser suite au découpage du vecteur de la CA en trois niveaux qui est décrit dans le paragraphe 3.3. .

#### 3.2. Résultats

Après la réception des paramètres en entrée et une fois que l'algorithme du recuit simulé est terminé, ce dernier retourne le meilleur couple trouvé dans la limite de temps fixée : CA et résultat de la fonction objectif.

### 3.3. Codage de la solution

La CA également appelée « solution » est composée de trois niveaux (en bleu sur la Figure 3-34). Chaque niveau donne une information caractéristique sur la machine présente sur le site. La CA est définie par une matrice dans laquelle chaque colonne correspond à un site. En l'occurrence la colonne  $i$  concerne le site  $i$ . Il y a en tout «  $a$  » sites.

- Le premier niveau représente l'implantation de l'ensemble des machines sur les sites. Par exemple sur la Figure 3-34, le niveau 1 « Implantation » place la machine  $m_1$  sur le site 1, la machine  $m_2$  sur le site 2, etc. L'ensemble des données de ce niveau forme le vecteur « site machine » ( $V_{sm}$ ).
- Le second niveau précise l'orientation de chaque machine par site, parmi les 4 orientations possibles. L'ensemble des données de ce niveau forme le vecteur « orientation machine » ( $V_{om}$ ).
- Le troisième et dernier niveau correspond à la forme des machines par site, parmi les 5 formes possibles (« I », « L », « L' », « U » et « U' »). De même, l'ensemble des données de ce dernier niveau correspond au vecteur « forme machine » ( $V_{fm}$ ).

|                         |          | Sites |       |     |       |
|-------------------------|----------|-------|-------|-----|-------|
|                         |          | 1     | 2     | ... | a     |
| Implantation (niveau 1) | $V_{sm}$ | $m_1$ | $m_2$ | ... | $m_a$ |
| Orientation (niveau 2)  | $V_{om}$ | $o_1$ | $o_2$ | ... | $o_3$ |
| Forme (niveau 3)        | $V_{fm}$ | $f_1$ | $f_2$ | ... | $f_3$ |

Figure 3-34 : exemple d'un vecteur d'implantation avec  $a$  machines

### 3.4. Recherche de voisins

Le rôle de la recherche de voisins est de trouver une nouvelle solution, dans le voisinage proche de la solution courante (c.-à-d. solution précédente). Cette nouvelle solution est conservée si elle permet d'améliorer la fonction objectif. Plusieurs méthodes de recherches de voisins différentes existent pour les représentations ordonnées (İLhan, 2021). Par exemple la méthode dite d'« échange » est utilisée dans cette thèse et consiste à échanger la place de deux machines. Deux machines différentes sont choisies au hasard puis sont échangées entre elles. (Figure 3-35).

|              |                  | Sites |   |   |   |
|--------------|------------------|-------|---|---|---|
|              |                  | 1     | 2 | 3 | 4 |
| Implantation | $V_{sm_{avant}}$ | 1     | 2 | 3 | 4 |
|              | $V_{sm_{après}}$ | 1     | 4 | 3 | 2 |

Figure 3-35 : échange de sites des machines 2 et 4

## 4. Conclusion

Pour conclure sur ce chapitre, nous avons présenté une méthodologie permettant de modéliser un atelier via un graphe et d'optimiser la distance à parcourir par un RMA pour répondre à une demande de transport.

Dans une première partie, nous avons présenté le contexte de travail. Cette partie commence par la présentation des machines dans le détail avec leur représentation, les différentes orientations, les formes possibles et leurs étapes de reconfiguration sur un site. Puis le choix de la modélisation de l'atelier est abordé. La partie suivante concerne le déplacement des produits entre les sites avec l'utilisation d'un RMA et de ses caractéristiques. Pour clore cette première partie, le problème est présenté avec le sous-problème des trajets à vide que doit réaliser le RMA. Ce problème est résolu comme un problème classique de transport.

Dans une seconde partie, la modélisation mathématique du problème a été détaillée. Nous avons proposé un modèle mathématique prenant en compte les différents niveaux de configuration d'atelier (implantation, orientation et forme) étendant ainsi un modèle existant. Les extensions prises en compte sont les suivantes.

- L'orientation et la forme des machines qui sont indiquées via le placement des sommets R et D sur le graphe du réseau de transport.
- La possibilité de prendre en compte plusieurs demandes de transport successives, grâce au découpage de l'horizon en périodes.
- La prise en compte de trois fonctions objectif différentes : la distance parcourue, l'énergie consommée et l'effort de déplacement.

Dans une troisième et dernière partie, l'adaptation à notre problème de la méthode de résolution utilisant le RS est détaillée. Puis, l'application du RS au cas d'étude est expliquée avec notamment la prise en compte des paramètres externes au RS, le codage de la solution, la recherche de voisin utilisée (l'échange).

L'intégration de cette méthodologie avec le RS forme une plateforme logicielle permettant de chercher une solution pour une CA tout en étant utilisée de différentes manières. Par exemple, elle permet de lancer une série d'expérimentations avec les mêmes paramètres pour pouvoir évaluer une performance moyenne. Elle permet aussi faire varier certains paramètres comme le choix de l'opérateur de recherche de voisin, ou encore lancer une séquence d'optimisation temporelle (période après période) ou une séquence d'optimisation par niveau (partie de la solution). Cette plateforme est donc exploitable pour appliquer sur différents jeux de données la méthode de résolution proposée dans ce chapitre.

## Chapitre 4 : résultats des expérimentations

Dans le chapitre précédent, l'approche de résolution a été détaillée. Dans ce chapitre, cette approche de résolution est mise en œuvre à travers quatre séries d'expérimentations. L'objectif est de déterminer l'influence des stratégies d'optimisation de la reconfiguration sur les performances du RMA (distance parcourue et énergie consommée). Cela s'appuie sur l'évaluation de plusieurs scénarios de demandes de transport avec un horizon de planification temporel mono ou multi-périodes. Pour cela, trois plans d'expériences<sup>6</sup> composés de groupes d'expérimentations sont testés.

- Dans un premier plan d'expérience, une comparaison est faite avec l'article de référence (Guan et al., 2012) afin de montrer les améliorations de notre approche de résolution. Lors de cette première comparaison, deux stratégies d'optimisation sont testées et comparées : l'optimisation parallèle, qui autorise la modification des trois niveaux de la solution en même temps, et l'optimisation séquentielle qui autorise la modification des trois niveaux de la solution les uns après les autres.
- Dans un second plan d'expérience, la méthode séquentielle est approfondie à travers quatre groupes d'expérimentations. Ces groupes d'expérimentations utilisent un deuxième ensemble d'instances de demande de transport composé de 25 machines. Les deux premiers comparent l'optimisation parallèle et séquentielle. Le troisième groupe utilise l'optimisation parallèle pour améliorer la configuration initiale avant d'utiliser l'optimisation séquentielle. Le quatrième groupe compare tous les ordres possibles d'optimisation séquentielle. L'objectif de cet ensemble d'expérimentations est d'améliorer au maximum le résultat final.
- Le troisième plan d'expérience se compose de deux parties. La première cherche à optimiser la distance parcourue par le robot mobile autonome (RMA) au cours de cinq périodes consécutives (cas multi-périodes). L'objectif de cet ensemble d'expérimentations est d'observer s'il existe une stratégie de reconfiguration meilleure que les autres. Puis trois paramètres (c.-à-d. coût de reconfiguration, taille de lot et distance entre les machines) sont pris en compte à l'aide de trois expérimentations. La seconde partie cherche à optimiser la consommation d'énergie du RMA sur cinq périodes consécutives. Pour cela trois paramètres sont considérés : le poids des machines, la taille de lot, la distance entre les machines ; trois groupes d'expérimentations, un par paramètre, sont testés.

L'ensemble du chapitre est composé de quatre parties. Une première partie introduit le contexte expérimental. Les trois autres parties reprennent les plans d'expériences précédemment cités. Ainsi la seconde partie compare notre approche de résolution avec celle de l'article de référence. La troisième partie vise à approfondir la méthode d'optimisation séquentielle. Enfin la quatrième partie détaille l'optimisation sur plusieurs périodes consécutives en fonction de la distance parcourue ou de l'énergie consommée.

### 1. Contexte expérimental

---

<sup>6</sup> Notre acception du mot « plan d'expérience » ne correspond pas strictement à celle de la théorie des plans d'expérience

Dans ce paragraphe, les éléments composant le contexte expérimental sont présentés. On y trouve ainsi les instances de test et leurs constructions, la configuration initiale de l'atelier, le détail des différentes méthodes d'optimisation et l'indicateur de comparaison des résultats. Enfin les outils matériel et logiciel utilisés sont dévoilés.

### 1.1. Instances de demande de transport (IDT)

Comme vu dans l'introduction du chapitre, ce dernier comporte trois plans d'expériences. Chaque plan d'expérience est composé de multiples expérimentations. Une expérimentation correspond à une ligne dans un plan d'expérience. Chaque plan d'expérience fait appel à un groupe d'IDT. Il est possible que plusieurs IDT soient prises en compte successivement. Dans ce cas-là, nous parlons d'horizon multi-périodes. Un horizon multi-périodes implique une planification du RMS sur l'ensemble des périodes, avec une période correspondant à une IDT. Lorsqu'une seule IDT est prise en compte, nous parlons d'horizon mono-période toujours avec une période correspondant à une IDT.

Une IDT est une matrice d'adjacence dans laquelle l'ensemble des machines sont présentes en ligne et en colonnes. Les valeurs présentes dans la matrice correspondent à la quantité de produits que le RMA doit transporter depuis la machine en colonne vers la machine en ligne. Étant donné que les produits sont transportés un par un, dues à la capacité unitaire de transport du RMA, les valeurs présentes dans la matrice représentent également la quantité de trajets en charge que doit réaliser le RMA. Pour rappel, un trajet en charge correspond au transport d'un produit depuis un point de ramassage (R) d'une machine vers un point de dépôt (D) d'une autre machine.

Afin de réaliser les expérimentations et de mesurer l'influence de divers paramètres, un total de sept IDTs sont créées. Elles sont groupées en deux dans le Tableau 4-4. Le premier groupe, en bleu, est composé de neuf machines et le second, en orange, est composé de 25 machines.

| Caractéristiques                        | Instances de demandes de transport |      |       |        |        |       |       |
|---|------------------------------------|------|-------|--------|--------|-------|-------|
|   | 9_A                                | 9_B  | 25_A  | 25_B   | 25_C   | 25_D  | 25_E  |
| Nombre de machines                      | 9                                  | 9    | 25    | 25     | 25     | 25    | 25    |
| Nombre de trajets en charge             | 375                                | 760  | 8 795 | 10 075 | 10 420 | 8 865 | 8 105 |
| Intervalles de nombre de trajets        | 0-50                               | 0-70 | 0-70  | 0-70   | 0-70   | 0-70  | 0-70  |
| Nombre d'éléments non nul de la matrice | 21                                 | 32   | 244   | 261    | 266    | 245   | 221   |

Tableau 4-4 : ensemble des demandes de transport

Chaque IDT est caractérisée par le nombre de machines, le nombre de trajets en charge à réaliser par le RMA d'une machine à une autre, l'intervalle du nombre de trajets (valeur minimale et valeur maximale) et le nombre d'éléments non nuls. Un exemple d'IDT est illustré par la Figure 4-36. Cette figure décrit l'IDT 9\_A constituée de 9 machines (en bleu), de 375 trajets en charge, de 21 éléments non nuls (en orange). Il convient de noter que le nombre de trajets en charge correspond à la somme de tous les éléments de la matrice et que l'intervalle de variation du nombre de trajets est compris entre 0 et 50.

| 9_A                 |    | Machines d'arrivées |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------|----|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                     |    | D1                  | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 | D9 |
| Machines de départs | R1 | 0                   | 20 | 0  | 30 | 0  | 0  | 50 | 0  | 20 |
|                     | R2 | 0                   | 0  | 10 | 0  | 0  | 5  | 0  | 0  | 5  |
|                     | R3 | 0                   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 10 | 10 |
|                     | R4 | 0                   | 0  | 0  | 0  | 20 | 10 | 0  | 0  | 0  |
|                     | R5 | 0                   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 20 | 30 | 0  |
|                     | R6 | 0                   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 30 | 0  |
|                     | R7 | 0                   | 0  | 0  | 0  | 25 | 15 | 0  | 30 | 0  |
|                     | R8 | 0                   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
|                     | R9 | 0                   | 0  | 10 | 10 | 5  | 10 | 0  | 0  | 0  |

Figure 4-36 : IDT 9\_A

### 1.1.1. Premier groupe : cas à neuf machines

Les IDTs 9\_A et 9\_B utilisant neuf machines forment le premier groupe et sont issues de l'article rédigé par Guan et al. (2012). Ces IDTs servent de référence pour valider notre approche et mesurer les améliorations.

### 1.1.2. Deuxième groupe : intervalles identiques

Le deuxième groupe, en orange dans le Tableau 4-4, est composée de cinq IDTs, 25\_A, 25\_B, 25\_C, 25\_D et 25\_E. Contrairement au groupe d'IDT précédent, 25 machines sont utilisées. Les cinq IDTs de ce groupe sont construites à partir d'une méthode de calcul identique, mais les trajets en charge à réaliser sont répartis différemment d'une IDT à l'autre. La quantité de demandes de transport, entre deux machines, a une probabilité de 60% d'obtenir la valeur de zéro. Par ailleurs une valeur multiple de 5 et comprise entre 5 et 70 est obtenue aléatoirement en suivant une loi uniforme.

## 1.2. Configuration initiale

La configuration initiale représente la configuration de l'atelier définie arbitrairement lors du lancement d'une expérimentation. Dans cette configuration initiale, il y a autant de machines que de sites et l'affectation des machines est définie comme suit : la machine  $i$  est implantée sur le site  $i$ . L'orientation des machines est identique pour l'ensemble des machines ; l'orientation « 1 » est choisie. La forme des machines est également identique pour toutes les machines ; la forme en « L » est choisie. Cette configuration de départ est identique pour l'ensemble des expérimentations.

Le résultat de la fonction objectif issue de la configuration initiale pour répondre à une IDT est appelé « ConfInit ». Cela correspond au « coût » de déplacement du RMA dans le cas où l'atelier n'est pas reconfiguré.

## 1.3. Stratégies d'optimisation

Dans cette partie, les différentes stratégies d'optimisation sont présentées. Pour une meilleure compréhension et présentation de l'ensemble des résultats, un vocabulaire spécifique est employé et comporte les définitions données ci-dessous.

- $Opt_{1Per}^{Niv_i}$  avec  $i \in \{I, O, F\}$  : optimisation sur le niveau  $i$  de la configuration pendant une seule période de temps. Le niveau I correspond à l'implantation, le niveau O à l'orientation et le niveau F à la forme des machines.
- $Opt_{1Per}^{3Niv_{par}}$  : optimisation sur les trois niveaux de la configuration en même temps pendant une seule période. Cette méthode d'optimisation est appelée optimisation parallèle.
- $Opt_{1Per}^{3Niv_{seq}}$  : optimisation sur les trois niveaux de la configuration, les uns après les autres, dans un ordre donné sur une seule période. Cette méthode d'optimisation est appelée méthode séquentielle. Par exemple, si l'ordre d'optimisation est donné comme suit : I->O->F, l'optimisation séquentielle commence par l'implantation, enchaîne avec l'orientation et finit par la forme des machines.
- $Opt_{1Per}^{3Niv_{i}}$  : utilisation de l'optimisation parallèle avant l'optimisation séquentielle. Lors de l'optimisation séquentielle, un temps d'optimisation est alloué à chaque niveau. Dans ce cas, le temps alloué au premier niveau est partagé avec l'optimisation parallèle. Cette stratégie est appelée optimisation parallèle-séquentielle.
- $Opt_{5Per_{5Reconf}}^{3Niv_{seq}}$  : optimisation sur les trois niveaux de la configuration dans un ordre donné avec un horizon de cinq périodes. Cette stratégie recherche une seule configuration utilisée pour les cinq périodes. Elle simule le cas où l'atelier n'a pas la possibilité de se reconfigurer à chaque période, mais seulement toutes les 5 périodes.
- $Opt_{5Per_{5Reconf}}^{3Niv_{seq}}$  : cette optimisation utilisée dans un cas comportant cinq périodes, correspond à la stratégie  $Opt_{1Per}^{3Niv_{seq}}$  répétée à cinq reprises (une fois par période) : cinq reconfigurations sont ainsi obtenues.

Complément sur les durées d'optimisation :

- La durée d'optimisation (DO) correspond au temps d'exécution de la plateforme développée dans le chapitre trois.
- La durée totale d'optimisation (DTO) correspond à la durée d'une expérimentation.

La différence entre les deux s'explique par la possibilité d'appeler plusieurs fois l'approche d'optimisation pour une même expérimentation. Les multiples appels de l'approche d'optimisation s'appliquent lors de la stratégie d'optimisation séquentielle. Dans ce cas-là, l'approche d'optimisation est appelée une fois par niveau de reconfiguration soit trois fois en tout. Lors des cas multi-période, la stratégie d'optimisation séquentielle est utilisée pour chaque période. Ainsi pour cinq périodes successives, l'approche d'optimisation est appelée trois fois par période à cinq reprises.

#### 1.4. Indicateur de comparaison de deux résultats

L'indicateur de comparaison est défini comme le taux de variation entre deux résultats. L'indicateur de comparaison de deux expérimentations "E1" et "E2" est calculé via l'Équation 4 -22 avec  $R_{Ei}$  le résultat minimisé de l'expérimentation  $Ei$ .



$$G_{E1-E2} = \frac{R_{E1} - R_{E2}}{R_{E1}} * 100$$

Équation 4-22

Un indicateur positif, dit aussi « gain », correspond à une amélioration de  $R_{E2}$  par rapport à  $R_{E1}$ . Au contraire, un indicateur négatif correspond à une détérioration de  $R_{E2}$  par rapport à  $R_{E1}$ .

### 1.5. Configuration matérielle et logicielle

Les expériences sont réalisées sur un Macbook Pro IntelCore i7 à 2,2 GHz avec 6 cœurs (16 Go de RAM). L'implémentation de la plateforme présentée dans le chapitre trois est faite en utilisant le langage de programmation Julia pour son haut niveau de performance en calcul scientifique (Bezanson et al., 2012). Les paquets suivants sont utilisés : JuMP et GLPK pour la résolution du problème de transport en programmation linéaire ; Simple WeightedGraphs et LightGraphs pour la construction de graphes. Tout au long des expérimentations, les résultats sont **toujours** la moyenne de **cinq expérimentations**.

## 2. Comparaison avec l'article de référence

Dans cette partie, l'horizon est composé d'une seule période. L'objectif est de comparer nos résultats avec ceux de l'article de référence afin de vérifier la pertinence de notre approche de résolution. Le plan d'expérience comporte 12 expérimentations. Les deux premières lignes (E0\_A et E0\_B) du plan d'expérience correspondent aux expérimentations de l'article de référence. Les expérimentations E1 à E6 optimisent un seul niveau à la fois, les expérimentations E7 et E8 portent sur les trois niveaux en parallèle et les expérimentations E9 et E10 optimisent les trois niveaux de manière séquentielle. Pour les expérimentations séquentielles, le choix (arbitraire) est fait d'optimiser dans l'ordre suivant : implantation, orientation et forme. Le Tableau 4-5 présente le plan d'expérience de cette partie.

| Expérimentation<br>s | IDT | Optimisations        |       |       |                           |                           | DO (minutes) |                  |       |       |
|----------------------|-----|----------------------|-------|-------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|-------|-------|
|                      |     | $Opt_{1Per}^{Niv_i}$ |       |       | $Opt_{1Per}^{3Niv_{Seq}}$ | $Opt_{1Per}^{3Niv_{Par}}$ | xNiv         | Niv_I            | Niv_O | Niv_F |
|                      |     | Niv_I                | Niv_O | Niv_F |                           |                           |              |                  |       |       |
| E0_A                 | 9_A | X                    | -     | -     | -                         | -                         | -            | N/A <sup>7</sup> | -     | -     |
| E0_B                 | 9_B | X                    | -     | -     | -                         | -                         | -            | N/A              | -     | -     |
| E1                   | 9_A | X                    | -     | -     | -                         | -                         | -            | 60               | -     | -     |
| E2                   | 9_A | -                    | X     | -     | -                         | -                         | -            | -                | 60    | -     |
| E3                   | 9_A | -                    | -     | X     | -                         | -                         | -            | -                | -     | 60    |
| E4                   | 9_B | X                    | -     | -     | -                         | -                         | -            | 60               | -     | -     |
| E5                   | 9_B | -                    | X     | -     | -                         | -                         | -            | -                | 60    | -     |
| E6                   | 9_B | -                    | -     | X     | -                         | -                         | -            | -                | -     | 60    |
| E7                   | 9_A | -                    | -     | -     | -                         | X                         | 60           | -                | -     | -     |
| E8                   | 9_B | -                    | -     | -     | -                         | X                         | 60           | -                | -     | -     |
| E9                   | 9_A | -                    | -     | -     | X                         | -                         | -            | 20               | 20    | 20    |
| E10                  | 9_B | -                    | -     | -     | X                         | -                         | -            | 20               | 20    | 20    |

Tableau 4-5: plan d'expérience du premier groupe d'IDT

### 2.1. Optimisation sur un seul niveau ( $Opt_{1Per}^{Niv_i}$ )

<sup>7</sup> Non applicable

Dans cette partie, l'approche développée dans le chapitre précédent est comparée à celle de l'article de référence. Dans ces expérimentations, l'optimisation est réalisée sur un seul niveau de configuration. Les trois niveaux sont optimisés les uns indépendamment des autres, avec à chaque fois comme point de départ la configuration initiale. Ainsi, trois expérimentations sont réalisées avec chaque IDT. La DTO des expérimentations est d'une heure. Dans les expérimentations E1 pour l'IDT 9\_A et E4 pour l'IDT 9\_B, seules les machines ont la possibilité d'être déplacées. Dans E2 pour l'IDT 9\_A et E5 pour l'IDT 9\_B, les machines n'ont pas la possibilité d'être déplacées de site en site, mais leur orientation peut être modifiée. Dans les expérimentations E3 pour l'IDT 9\_A et E6 pour l'IDT 9\_B, cette fois seule la forme des machines est autorisée à être modifiée. La Figure 4-37 présente les résultats obtenus.

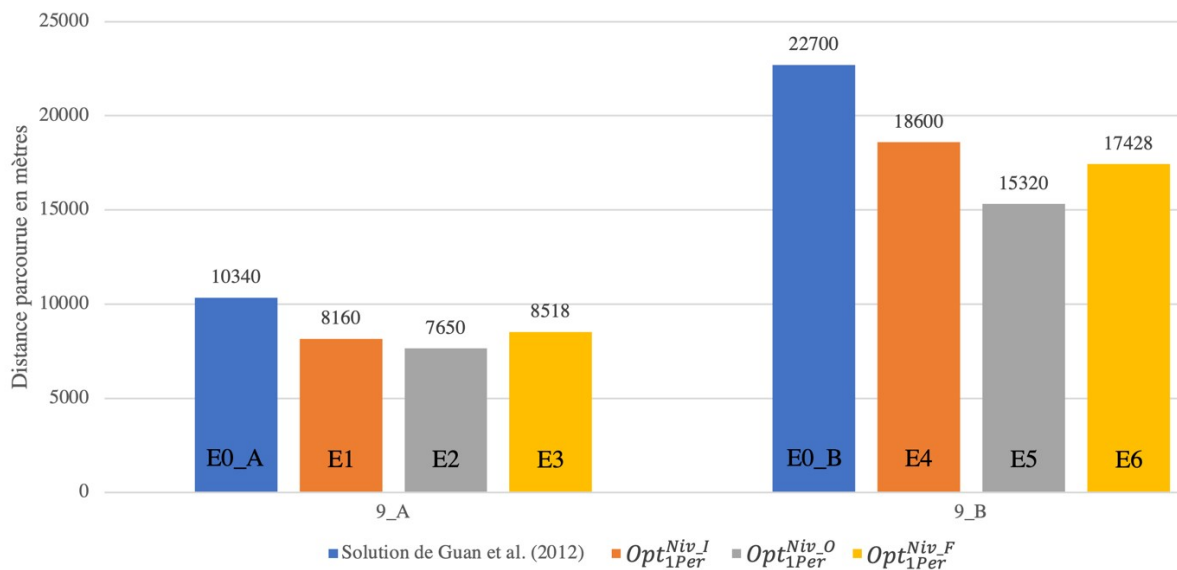


Figure 4-37 : comparaison entre le résultat trouvé par Guan et al. (2012) et la stratégie d'optimisation par niveau

Concernant l'IDT 9\_A, le gain  $G_{E0\_A - E1}$  est de 21%, celui  $G_{E0\_A - E2}$  est de 26% et celui  $G_{E0\_A - E3}$  est de 17,6%. Concernant l'IDT 9\_B, les gains  $G_{E0\_B - E4}$ ,  $G_{E0\_B - E5}$  et  $G_{E0\_B - E6}$  sont respectivement de 18%, 32,5% et 23,2%. Dans le cas de l'IDT 9\_A, l'orientation donne de meilleurs résultats suivis par l'implantation et la forme des machines. Tandis que dans le cas de la demande 9\_B, l'orientation donne de meilleurs résultats suivis par la forme et l'implantation des machines. Dans les deux cas, l'orientation donne le meilleur résultat. Ces gains peuvent s'expliquer par la différence entre notre représentation et celle de l'article de référence. En effet dans notre cas, les points de ramassage R et de dépôt D sont liés à la machine. Ainsi la modification d'un des trois niveaux de la configuration modifie également le positionnement des points R et D. Cela n'est pas le cas dans l'article de référence dans lequel les points R et D sont liés aux sites et ne peuvent donc pas être déplacés.

Pour conclure, notre approche de résolution permet d'améliorer les résultats de manière significative, quel que soit le niveau de configuration optimisé.

De plus, contrairement à la littérature qui cherche souvent à optimiser l'implantation des machines, dans les deux IDT ci-dessus, optimiser simplement l'orientation des machines est plus pertinent que l'optimisation de l'implantation. Et dans un IDT sur 2, l'optimisation de la forme des machines est aussi plus pertinente que l'optimisation de l'implantation. Ce résultat

peut être intéressant pour les entreprises, car un changement de forme ou d'orientation est sans doute moins coûteux qu'un déplacement complet d'une machine.

## 2.2. Optimisation parallèle ( $Opt_{1Per}^{3Niv_{Par}}$ )

Dans cette seconde partie, l'optimisation porte sur la modification des trois niveaux de configuration en même temps (optimisation parallèle). L'objectif de cette partie est de comparer la nouvelle stratégie d'optimisation avec le meilleur résultat obtenu dans la partie précédente. Une expérimentation est réalisée pour chaque IDT : E7 pour l'IDT 9\_A et E8 pour l'IDT 9\_B. La DTO est de 1h afin de pouvoir comparer les résultats obtenus aux précédents. La Figure 4-38 présente les résultats obtenus.

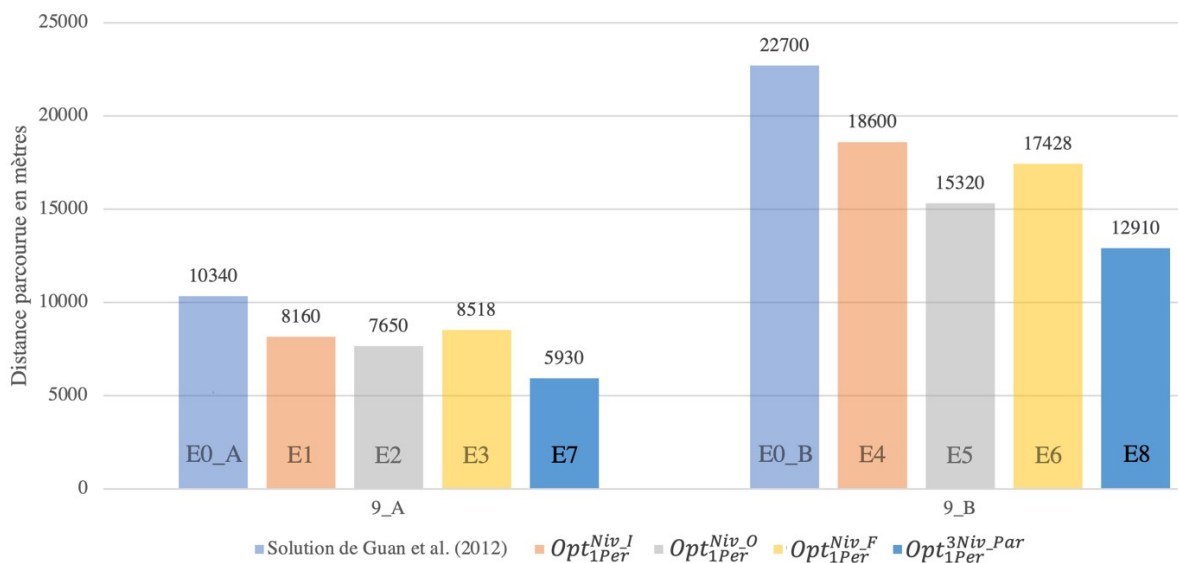


Figure 4-38 : ajout de l'optimisation parallèle

Nous remarquons qu'en prenant en compte les trois niveaux de configuration en même temps, les résultats sont améliorés par rapport aux meilleurs résultats obtenus précédemment avec  $Opt_{1Per}^{Niv_O}$  que ce soit avec l'IDT 9\_A ou 9\_B. Sur l'IDT 9\_A, le gain  $G_{E2-E7}$  est de 22,4%. Concernant l'IDT 9\_B, le gain  $G_{E5-E8}$  est de 15,7%. Par rapport aux résultats de référence, les gains sont de  $G_{E0\_A-E7} = 42,6\%$  et  $G_{E0\_B-E8} = 43,1\%$ .

Nous pouvons en conclure que prendre en compte l'ensemble des niveaux de la configuration permet d'obtenir de meilleurs résultats plutôt que d'en prendre un seul. Les gains obtenus avec cette stratégie sont supérieurs à 40% par rapport aux résultats de référence.

## 2.3. Optimisation séquentielle ( $Opt_{1Per}^{3Niv_{Seq}}$ )

Dans cette troisième partie, une nouvelle optimisation est testée, toujours dans l'objectif d'être comparée avec le meilleur résultat précédemment trouvé. Cette fois-ci, les trois niveaux de configuration sont optimisés les uns après les autres. L'ordre d'optimisation est choisi arbitrairement comme suit : implantation, orientation et forme. Une expérimentation pour chaque IDT (9\_A : E9 et 9\_B : E10) est réalisée. La DTO est d'une heure. Les résultats sont présentés sur la Figure 4-39.

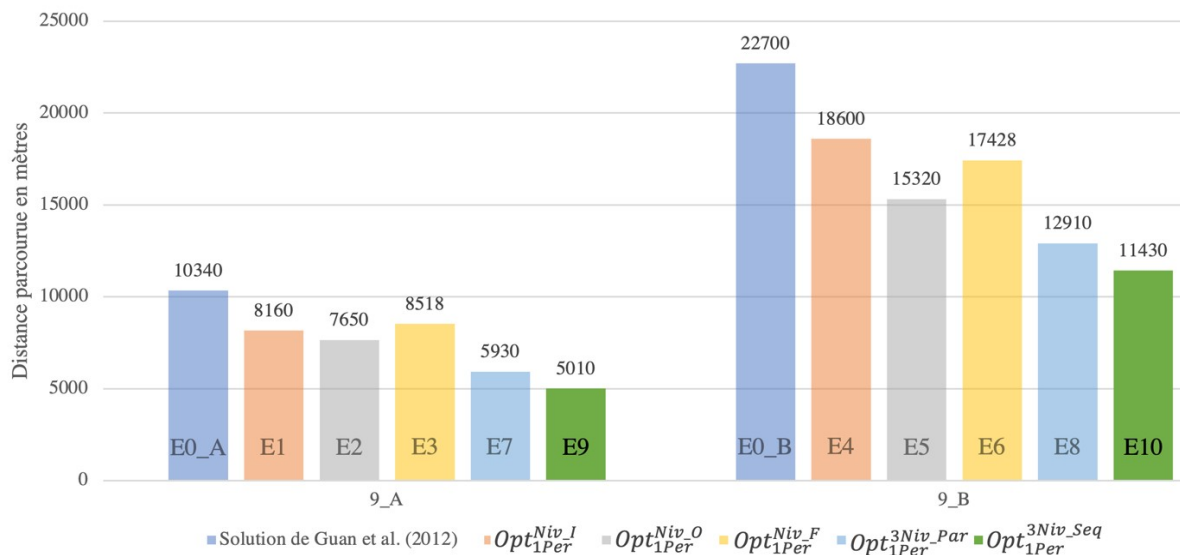


Figure 4-39 : ajout de l'optimisation séquentielle

Nous remarquons qu'en optimisant les trois niveaux les uns après les autres de meilleurs résultats sont obtenus. Sur l'IDT 9\_A, le gain  $G_{E7-E9}$  est de 15,5%. Concernant l'IDT 9\_B, le gain  $G_{E8-E10}$  est de 11,5%. Par rapport aux résultats de référence, les gains sont de  $G_{E0\_A-E9} = 51,5\%$  et  $G_{E0\_B-E10} = 49,6\%$ .

Nous pouvons en conclure que pour ces deux demandes de transport, l'utilisation de l'optimisation séquentielle, avec l'ordre I->O->F permet d'obtenir les meilleurs résultats avec notamment des gains autour de 50% par rapport au modèle de référence.

Au cours de ce groupe d'expérimentations, nous avons montré que notre approche permet d'obtenir de meilleurs résultats par rapport au modèle de référence. Trois méthodes d'optimisation sont également comparées, l'optimisation par niveau, parallèle et séquentielle. D'après la dernière expérimentation, l'optimisation séquentielle est la plus performante. Les résultats de cette partie sont groupés dans le Tableau 4-6.

| Optimisation                            | Amélioration |       |
|---|--------------|-------|
|   | 9_A          | 9_B   |
| IDT                                     | 9_A          | 9_B   |
| Références                              | -            | -     |
| Opt <sup>Niv_I</sup> <sub>1Per</sub>    | 21%          | 18%   |
| Opt <sup>Niv_O</sup> <sub>1Per</sub>    | 26%          | 32,5% |
| Opt <sup>Niv_F</sup> <sub>1Per</sub>    | 17,6%        | 23,2% |
| Opt <sup>3Niv_Par</sup> <sub>1Per</sub> | 42,6%        | 43,1% |
| Opt <sup>3Niv_Seq</sup> <sub>1Per</sub> | 51,5%        | 49,6% |

Tableau 4-6 : tableau des gains en pourcentage par rapport au modèle de référence

### 3. Approfondissement de l'optimisation séquentielle

Dans cette partie, nous considérons un horizon d'une seule période de temps. Un nouveau groupe d'instances est pris en compte, nommé 25\_i avec  $i \in \{A, B, C, D, E\}$  dans l'ensemble

de cette troisième partie. La DTO des expérimentations de cette partie est de trois heures. Trois ensembles d'expérimentations sont réalisés :

- un premier ensemble compare les optimisations parallèle et séquentielle,
- un second ensemble utilise l'optimisation parallèle pour améliorer la configuration initiale en amont du premier niveau d'optimisation séquentielle. Dans ce cas-là, lors de l'optimisation du premier niveau, une partie du temps d'optimisation est dédiée à l'optimisation parallèle et le reste pour l'optimisation séquentielle,
- un troisième ensemble compare tous les ordres des niveaux de configuration de l'optimisation séquentielle.

Le plan d'expérience de cette partie est donné dans le Tableau 4-7.

| Expérimentations   | IDT<br>$i \in \{A, B, C, D, E\}$ | Optimisations             |                           | DO (en heure) |       |       |       |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|-------|-------|-------|
|                    |                                  | $Opt_{1Per}^{3Niv_{Par}}$ | $Opt_{1Per}^{3Niv_{Seq}}$ | xNiv          | Niv_I | Niv_O | Niv_F |
| E11_i <sup>8</sup> | 25_i                             | X                         | -                         | 180           | -     | -     | -     |
| E12_i              | 25_i                             | -                         | I->O->F                   | -             | 60    | 60    | 60    |
| E13                | 25_A                             | X                         | I->O->F                   | 6             | 54    | 60    | 60    |
| E14                | 25_A                             | X                         | I->O->F                   | 9             | 51    | 60    | 60    |
| E15                | 25_A                             | X                         | I->O->F                   | 15            | 45    | 60    | 60    |
| E16                | 25_A                             | X                         | I->O->F                   | 30            | 30    | 60    | 60    |
| E17                | 25_A                             | X                         | I->O->F                   | 45            | 15    | 60    | 60    |
| E18_i              | 25_i                             | -                         | O->F->I                   | -             | 60    | 60    | 60    |
| E19_i              | 25_i                             | -                         | O->I->F                   | -             | 60    | 60    | 60    |
| E20_i              | 25_i                             | -                         | F->I->O                   | -             | 60    | 60    | 60    |
| E21_i              | 25_i                             | -                         | F->O->I                   | -             | 60    | 60    | 60    |
| E22_i              | 25_i                             | -                         | I->F->O                   | -             | 60    | 60    | 60    |

Tableau 4-7 : plan d'expériences du deuxième groupe d'expérimentations

### 3.1. Optimisation parallèle versus séquentielle

Dans cette partie, une seconde comparaison des stratégies d'optimisation parallèle et séquentielle est réalisée (Figure 4-40). L'ordre de l'optimisation séquentielle est implantation, orientation puis forme. Pour chaque IDT (25\_A, 25\_B, 25\_C, 25\_D et 25\_E) deux expérimentations, parallèle et séquentielle respectivement identifiées par les lignes E11\_i et E12\_i sont réalisées ; celles-ci correspondent aux expérimentations détaillées suivantes : E11\_A-E12\_A, E11\_B-E12\_B, E11\_C-E12\_C, E11\_D-E12\_D et E11\_E-E12\_E.

<sup>8</sup> Le « i » prend cinq valeurs différentes (A, B, C, D, E), une pour chaque IDT. Par conséquent, la ligne E11\_i correspond à cinq expérimentations différentes : une pour chaque instance.

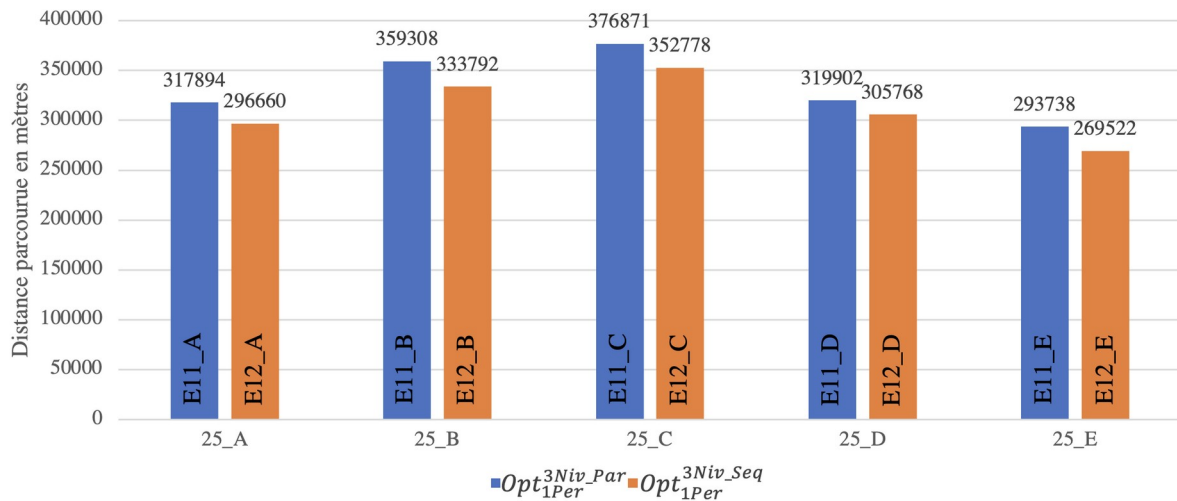


Figure 4-40 : comparaison entre les optimisations parallèle et séquentielle

Pour chacune des expérimentations, le meilleur résultat est obtenu avec l’optimisation séquentielle (I->O->F). Les gains observés par période sont les suivants :  $G_{E11\_A-E12\_A} = 6,7\%$  ;  $G_{E11\_B-E12\_B} = 7,1\%$  ;  $G_{E11\_C-E12\_C} = 6,4\%$  ;  $G_{E11\_D-E12\_D} = 4,4\%$  ;  $G_{E11\_E-E12\_E} = 8,2\%$ .

Les résultats viennent confirmer la précédente conclusion faite avec le groupe d’IDT comportant neuf machines.

Ce résultat peut s’expliquer par le fait que lors d’une optimisation séquentielle, un intervalle plus restreint de configurations est exploré pour chaque niveau de configuration en comparaison de l’optimisation parallèle. Il est alors plus facile pour l’algorithme de trouver une bonne configuration. Pour la suite, les expérimentations E12\_i, optimisation séquentielle avec l’ordre I->O->F serviront de références.

### 3.2. Optimisation parallèle-séquentielle ( $Opt_{1Per}^{3Niv_i}$ )

Un premier levier à notre disposition pour essayer de diminuer la distance parcourue par le RMA est de dédier une partie du temps d’optimisation du premier niveau de configuration à l’amélioration de la configuration initiale en utilisant l’optimisation parallèle. Dans cette partie, toutes les expérimentations font appel à l’IDT 25\_A. L’expérimentation E11\_A est comparée à cinq nouvelles expérimentations, E13 à E17 qui utilisent l’optimisation parallèle-séquentielle. La différence entre ces expérimentations (E13 à E17) est le temps accordé à l’optimisation parallèle. Le Tableau 4-8 récapitule le temps dédié à l’amélioration de la configuration initiale pour chacune des expérimentations. La DTO est de trois heures.

| Expérimentations | DO parallèle (minutes) |
|------------------|------------------------|
| E13              | 6                      |
| E14              | 9                      |
| E15              | 15                     |
| E16              | 30                     |
| E17              | 45                     |

Tableau 4-8 : temps dédié à l’optimisation parallèle en minutes

L’expérimentation reprise (E11\_A) fait appel à l’optimisation séquentielle qui comporte trois étapes, une par niveau de reconfiguration : implantation, orientation et forme. Les cinq

nouvelles expérimentations (E13 à E17) font appel à l'optimisation parallèle-séquentielle qui comporte quatre étapes : l'optimisation parallèle ainsi que les trois optimisations par niveau (implantation, orientation et forme). La Figure 4-41 représente le résultat issu de la configuration initiale ainsi que les résultats après chaque optimisation pour l'ensemble des six expérimentations.

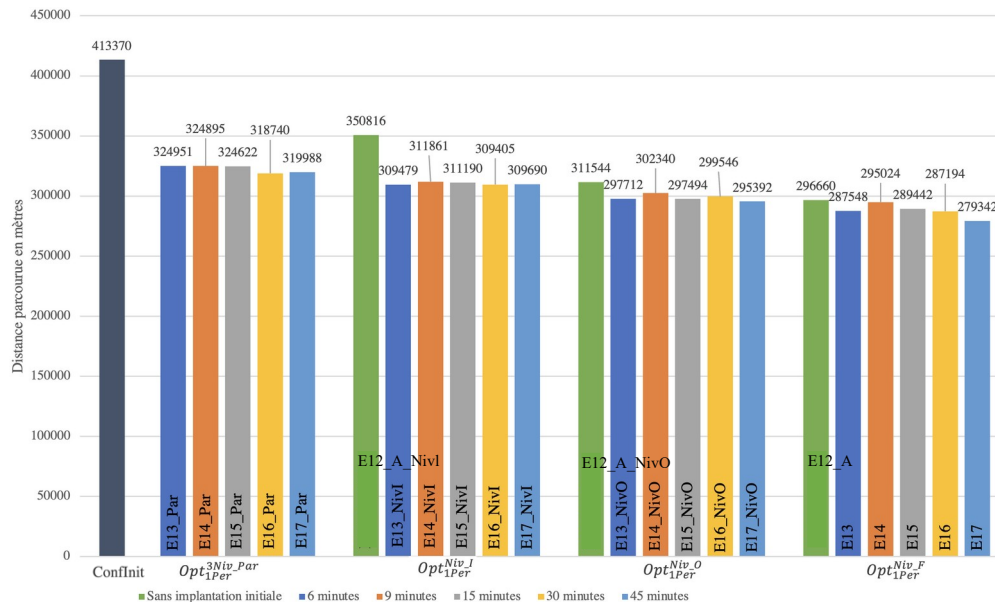


Figure 4-41 : comparaison des durées d'utilisation de l'optimisation parallèle

Deux points sont à discuter. Le premier concerne l'amélioration du résultat, obtenu à l'issue d' $Opt_{1Per}^{Niv_F}$ . Ainsi le gain minimal est de  $G_{E11\_A-E14} = 0,5\%$  et le gain maximal est de  $G_{E11\_A-E17} = 5,8\%$ . Il est également à noter qu'après le premier niveau d'optimisation, le gain est significatif lors de l'utilisation de l'optimisation parallèle avec des valeurs allant de  $G_{E11\_A\_NivI-E14\_NivI} = 11\%$  à  $G_{E11\_A\_NivI-E16\_NivI} = 11,8\%$ . Le second point concerne le temps accordé à l'optimisation parallèle pour améliorer la configuration initiale. Nous remarquons que les résultats issus de l'optimisation parallèle sont très proches les uns des autres avec un écart maximal de  $G_{E13\_Par-E16\_Par} = 1,9\%$ . Néanmoins, cet écart finit par augmenter après l'optimisation du niveau F et la DO parallèle la plus longue donne le meilleur résultat. L'écart maximal entre l'ensemble des expériences est  $G_{E14-E17} = 5,3\%$ .

Pour conclure, l'amélioration de la configuration initiale permet d'obtenir de meilleurs résultats et E17 donne le meilleur résultat à l'issue du quatrième niveau d'optimisation.

### 3.3. Ordre d'optimisation séquentielle

Dans les scénarios précédents, la stratégie d'optimisation séquentielle utilise l'ordre suivant : implantation (I), orientation (O) et forme (F) (I->O->F). Cet ordre a été choisi de manière arbitraire pour le premier groupe d'IDT et ce choix est inchangé depuis. La question posée dans cette partie est donc la suivante : existe-t-il un ordre d'optimisation meilleur que les autres ?

Pour répondre à cette question, le deuxième groupe d'IDT est utilisé et pour chacune, six expérimentations sont réalisées avec un ordre d'optimisation différent (E18\_i à E22\_i). Les résultats des expérimentations E11\_i utilisant l'ordre d'optimisation I->O->F sont conservés.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 4-9. La DTO est de trois heures. Les résultats en gras correspondent aux meilleurs résultats pour une IDT.

| Ordre d'optimisation | IDT            |                |                |                |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | 25_A           | 25_B           | 25_C           | 25_D           | 25_E           |
| I->O->F              | 296 660        | 333 792        | 352 778        | 305 768        | 269 522        |
| I->F->O              | 303 804        | 340 808        | 356 388        | 310 278        | 277 960        |
| O->F->I              | 298 878        | <b>327 250</b> | <b>335 838</b> | 299 304        | 268 710        |
| O->I->F              | 295 258        | 332 530        | 342 458        | <b>295 702</b> | 275 112        |
| F->I->O              | <b>284 458</b> | 336 070        | 354 180        | 303 066        | 272 214        |
| F->O->I              | 289 804        | 328 756        | 352 168        | 297 830        | <b>268 468</b> |

Tableau 4-9 : distances parcourues (mètres) en fonction de l'ordre d'optimisation

Sur l'ensemble des résultats, il est à noter que l'ordre O->F->I donne le meilleur résultat à deux reprises et que les ordres O->I->F, F->I->O et F->O->I donnent le meilleur résultat à une seule reprise.

Ces résultats sont synthétisés dans le Tableau 4-10 dans lequel, chaque ligne correspond à un ordre pour la séquence optimisation. Les cinq colonnes en orange correspondent à une IDT. Pour chaque IDT un classement (de un à six) est donné en fonction du résultat trouvé par l'ordre d'optimisation. Le meilleur résultat se voit attribuer la valeur de un et le plus grand résultat la valeur de six. Une dernière colonne somme les cinq résultats obtenus de chaque ordre d'optimisation pour l'ensemble des instances.

| Ordre d'optimisation | Instances |      |      |      |      | Total     |
|----------------------|-----------|------|------|------|------|-----------|
|                      | 25_A      | 25_B | 25_C | 25_D | 25_E |           |
| I->O->F              | 3         | 5    | 3    | 5    | 3    | 19        |
| I->F->O              | 6         | 6    | 6    | 6    | 6    | 30        |
| O->F->I              | 5         | 1    | 1    | 3    | 2    | <b>12</b> |
| O->I->F              | 4         | 3    | 2    | 1    | 5    | 15        |
| F->I->O              | 1         | 4    | 5    | 4    | 4    | 18        |
| F->O->I              | 2         | 2    | 4    | 2    | 1    | <b>11</b> |

Tableau 4-10 : classement des ordres d'optimisation séquentielle pour les instances 25\_A à 25\_E

La construction du tableau permet de conclure que deux ordres d'optimisation se démarquent des autres en obtenant les notes les plus faibles, proches l'une de l'autre. Le premier, F->O->I (E\_22\_i) et le second O->F->I (E\_20\_i).

Pour conclure cette partie, l'optimisation séquentielle est plus performante que l'optimisation parallèle. Les résultats de l'optimisation séquentielle peuvent être améliorés à l'aide d'un premier levier faisant appel à l'optimisation parallèle pour améliorer la configuration initiale. Un second levier utilisé pour améliorer l'optimisation séquentielle concerne l'ordre d'optimisation des niveaux de reconfiguration. Deux ordres d'optimisation se distinguent et sont les suivants : F->O->I et O->F->I. Les meilleurs résultats obtenus dans cette partie sont résumés dans le Tableau 4-11. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus dans les expérimentations E\_12\_i, optimisation séquentielle avec l'ordre I->O->F.



Une explication possible concerne la taille de l'espace des solutions pour chaque niveau qui est la suivante : implantation :  $25! \approx 1,5 \cdot 10^{25}$ , orientation :  $4^{25} \approx 1,1 \cdot 10^{15}$  et forme :  $5^{25} \approx 3 \cdot 10^{17}$ . Ainsi la quantité de solutions possibles pour l'implantation des machines est nettement plus élevée en comparaison de celles concernant l'orientation et la forme. Par conséquent dans le temps imparti, l'algorithme n'arrive pas à parcourir suffisamment de solutions pour en trouver une pertinente.

| Optimisation                                 |        | Amélioration |      |      |      |      |
|--|--------|--------------|------|------|------|------|
| IDT  |        | 25_A         | 25_B | 25_C | 25_D | 25_E |
| Opt <sub>1Per</sub> <sup>3Niv.Par</sup><br>+ | E17    | 5,8%         | -    | -    | -    | -    |
| Opt <sub>1Per</sub> <sup>3Niv.Seq</sup>      |        |              |      |      |      |      |
| Opt <sub>1Per</sub> <sup>3Niv.Seq</sup>      | E_22_i | 2,3%         | 1,5% | 0,2% | 2,6% | 0,4% |

Tableau 4-11 : résumé des résultats obtenus

#### 4. Optimisation sur plusieurs périodes

Précédemment l'horizon de planification de la reconfiguration était d'une seule période. Dans cette partie, l'horizon du problème est composé de cinq périodes, chacune associée à une des cinq IDTs du deuxième groupe. Nous nous trouvons dans un contexte de planification multi-période avec des IDTs qui varient d'une période à la suivante. Ainsi dans ce cadre, une nouvelle question se pose : est-il pertinent de reconfigurer l'atelier à chaque changement de période ? Pour rappel une reconfiguration est le passage d'une configuration à une autre configuration. Si oui, quels paramètres peuvent influencer cette stratégie ? Pour répondre à cette question, le problème est abordé sous deux angles différents. Dans un premier temps, la fonction objectif étudiée concerne la distance parcourue par le RMA. Dans un second temps, la seconde fonction objectif étudiée concerne la consommation d'énergie du RMA. L'objectif à travers ces deux parties est d'observer si une similitude apparaît, si oui laquelle et sinon quelles sont les différences observées.

##### 4.1. Optimisation de la distance

Dans cette partie, la fonction objectif étudiée exprime la distance parcourue par le RMA au cours de cinq périodes successives. Cette partie est composée de quatre ensembles d'expérimentations :

- un premier ensemble compare trois stratégies de reconfiguration,
- un second ensemble étudie l'influence du coût de reconfiguration des machines,
- un troisième ensemble conserve les différents coûts de reconfiguration précédents et compare plusieurs capacités de transport du RMA,
- un dernier ensemble conserve également les différents coûts de reconfiguration et comporte deux gammes de distance différentes entre les machines.

Le plan d'expérience est détaillé dans le Tableau 4-12.

| Expérimentations | Paramètres              |                 |   |          |     | Optimisations          |                                  |                                  | DTO (en heures) |
|------------------|-------------------------|-----------------|---|----------|-----|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|
|                  | Coût de reconfiguration | Capacité du RMA |   | Distance |     | $Opt_{1Per}^{3NivSeq}$ | $Opt_{5Per_{1Reconf}}^{3NivSeq}$ | $Opt_{5Per_{5Reconf}}^{3NivSeq}$ |                 |
|                  |                         | 1               | 5 | x1       | x10 |                        |                                  |                                  |                 |
| E23              | 0                       | X               | - | X        | -   | X                      | -                                | -                                | 3x5             |
| E24              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |
| E25              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |
| E26              | 100                     | X               | - | X        | -   | -                      | -                                | X                                | 1x3x5           |
| E27              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |
| E28              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |
| E29              | 0                       | -               | X | X        | -   | -                      | -                                | X                                | 1x3x5           |
| E30              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |
| E31              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |
| E32              | 0                       | X               | - | -        | X   | -                      | -                                | X                                | 1x3x5           |
| E33              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |
| E34              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |
| E35              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |
| E36              |                         |                 |   |          |     |                        |                                  |                                  |                 |

Tableau 4-12 : plan d'expériences avec pour fonction objectif la distance

#### 4.1.1. Stratégie de reconfiguration

Dans cette partie, trois stratégies de reconfiguration, dans le cadre d'un problème multi-périodes, sont comparées.

- La première ( $Opt_{1Per}^{3NivSeq}$ ) possède un horizon de cinq périodes et autorise une seule reconfiguration. La configuration est optimisée sur l'IDT de la première période puis conservée sur les quatre périodes suivantes.
- La seconde ( $Opt_{5Per_{1Reconf}}^{3NivSeq}$ ) possède un horizon composé de l'ensemble des cinq périodes et cherche une configuration pouvant répondre le mieux possible à l'ensemble des périodes ; une seule reconfiguration est donc autorisée.
- La troisième ( $Opt_{5Per_{5Reconf}}^{3NivSeq}$ ) possède un horizon d'une seule période (comme la première stratégie), mais cette fois-ci cinq reconfigurations sont autorisées, soit une lors de chaque changement de période.

L'objectif dans cette partie est de comparer les trois stratégies et d'observer laquelle permet au RMA de parcourir le moins de distance totale. La distance totale est la somme de la distance parcourue lors des trajets en charge et à vide. Pour chacune de ces expérimentations, le coût de reconfiguration n'est pas pris en compte (égal à zéro). Une expérimentation par stratégie de reconfiguration est réalisée. Les trois stratégies sont groupées dans le Tableau 4-13. La Figure 4-42 présente les résultats obtenus.

| Stratégie de reconfiguration      | Expérimentation | Horizon | Nombre de reconfigurations autorisées |
|-----------------------------------|-----------------|---------|---------------------------------------|
| $Opt_{1Per}^{3Niv\_Seq}$          | E23             | 5       | 1                                     |
| $Opt_{5Per\_1Reconf}^{3Niv\_Seq}$ | E24             | 5       | 1                                     |
| $Opt_{5Per\_5Reconf}^{3Niv\_Seq}$ | E25             | 5       | 5                                     |

Tableau 4-13 : récapitulatif des trois stratégies de reconfiguration

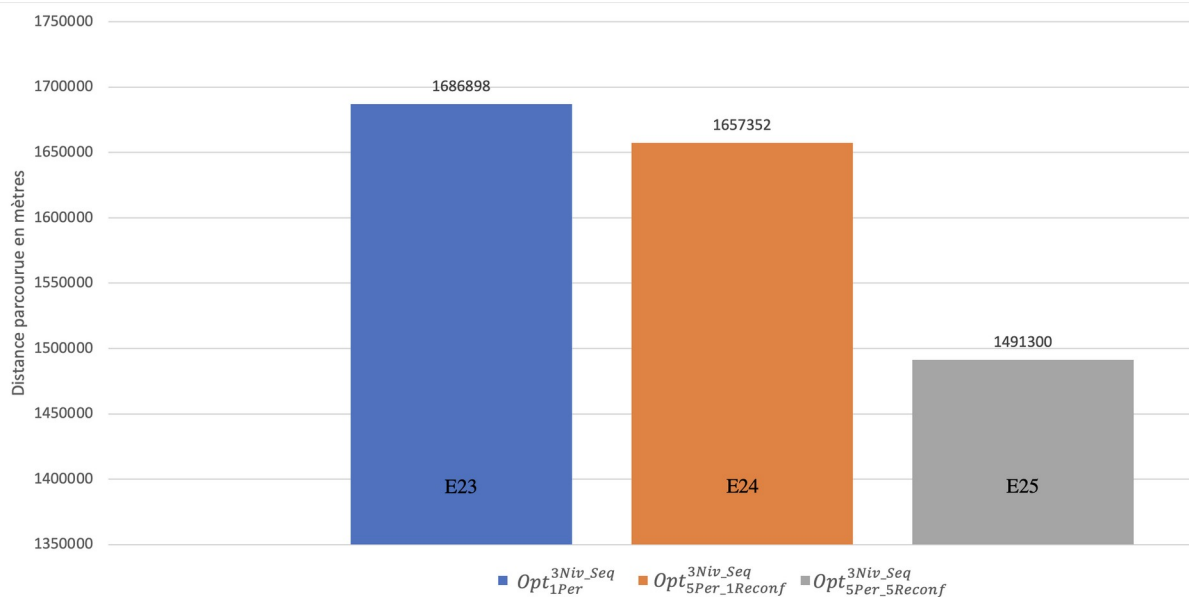


Figure 4-42 : distance parcourue avec une ou plusieurs reconfigurations d'atelier

Nous remarquons que le moins bon résultat est obtenu lorsqu'une seule reconfiguration est autorisée avec un horizon d'une seule période (E23). En conservant une seule reconfiguration d'atelier, mais en autorisant la visibilité sur l'ensemble des périodes (E24), l'algorithme arrive à trouver une configuration d'atelier qui puisse satisfaire l'ensemble des périodes. Ainsi le gain par rapport à la stratégie précédente est de  $G_{E23-E24} = 1,75\%$ . Néanmoins le meilleur résultat est obtenu lorsque la reconfiguration d'atelier est autorisée à chaque période. Ainsi les gains par rapport aux précédentes stratégies sont de  $G_{E23-E25} = 11,6\%$  et  $G_{E24-E25} = 10\%$ .

En conclusion et logiquement, autoriser une reconfiguration de l'atelier à chaque période est la meilleure stratégie trouvée sur cet ensemble d'expérimentations.

#### 4.1.2. Coût de déplacement des machines

Dans cette partie, cette stratégie de reconfiguration à chaque période est conservée et un coût, lors du déplacement d'une machine, est ajouté. Ce coût, intégré dans la fonction objectif, pénalise tous déplacements d'une machine. Dans les expérimentations, différentes valeurs du coût sont échantillonnées du coût est choisi de telle sorte que la valeur la plus faible influe très peu le déplacement des machines tandis que la valeur la plus élevée empêche le déplacement des machines. Ce coût représente le coût pour déplacer une machine d'un site à un autre, mais aussi un ensemble d'éléments permettant de remettre en fonctionnement la machine déplacée (débranchement / branchement des énergies / fluides, extinction / allumage et mise en route de la machine). L'objectif est de mesurer l'influence de ce coût sur la distance totale parcourue

par le RMA et la stratégie de reconfiguration. Cinq coûts de déplacements différents sont pris en compte conduisant à autant d'expérimentations. La première est issue de la partie précédente (E25) avec un coût de déplacement de zéro. Dans les expérimentations E26, E27 et E28, le coût de déplacement des machines vaut respectivement 100, 1 000 et 10 000 par machine. Les résultats sont présentés dans la Figure 4-43.

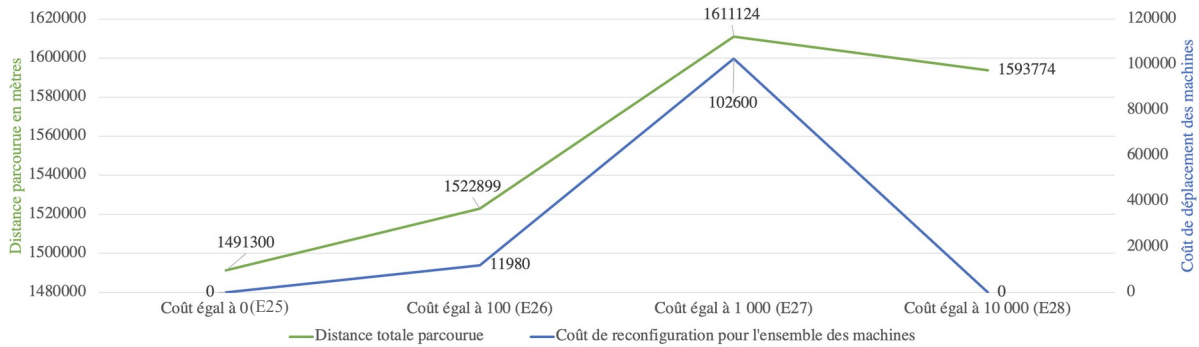


Figure 4-43 : influence du coût de reconfiguration des machines sur la distance parcourue par le RMA

Deux points sont remarquables. Le premier concerne le coût de déplacement des machines et le second concerne la stratégie de reconfiguration. Par rapport au premier élément, nous notons que l'expérimentation E25 fournit la distance totale parcourue la plus petite, suivi par E26 et E27. La dégradation en distance, engendrée par les coûts de déplacement des machines par rapport à cette valeur de référence, est de  $G_{E23-E26} = -2,1\%$  et  $G_{E23-E27} = -8\%$ . Ainsi plus le coût de déplacement des machines est élevé, plus le coût total augmente, en omettant la dernière expérimentation. Le second point concerne cette dernière expérimentation dans laquelle la stratégie de reconfiguration a changé. Dans ce cas-là, le coût de déplacement des machines est si élevé que l'algorithme n'a pas trouvé de meilleure configuration impliquant le déplacement des machines. Pour conclure, plus le coût de déplacement est élevé, moins il est intéressant de déplacer les machines.

#### 4.1.3. Taille de lot

Dans cette partie, un second paramètre est étudié, tout en conservant les différents coûts de déplacement de la partie précédente. En transportant cinq produits identiques en même temps (c.-à-d. taille de lot égale à cinq), l'objectif est d'observer si des résultats similaires à la partie précédente sont obtenus. Étant donné que la capacité du RMA est unitaire, pour représenter une taille de lot comportant cinq produits, les éléments de la demande de transport sont divisés par cinq. Pour cela, trois expérimentations (E29, E30, E31) sont réalisées dont les coûts de reconfiguration sont respectivement de 0, 100 et 1000. Les résultats sont présentés par la Figure 4-44.

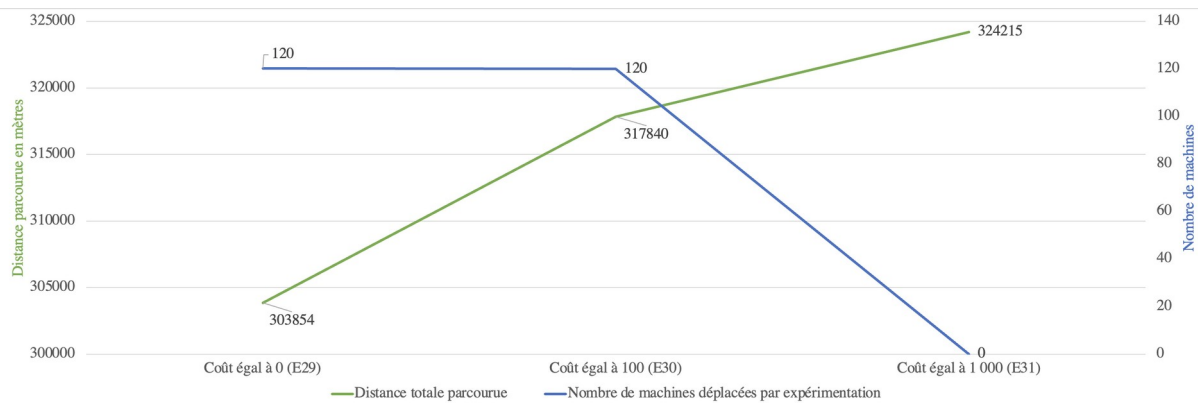


Figure 4-44 : influence du coût de reconfiguration des machines avec une taille de lot égale à cinq sur la distance parcourue

Nous remarquons que les machines sont déplacées seulement dans les deux premières expérimentations (E29 et E30). De façon similaire aux expérimentations du paragraphe précédent, avec un coût de déplacement égal à zéro, le résultat est meilleur. Ainsi la détérioration entre E29 et E30 est la suivante :  $G_{E29-E30} = -4,6\%$ . Par contre, avec un coût de déplacement de 1 000 par machine, l'expérimentation E31 amène un changement de stratégie sans déplacement de machine.

Pour conclure, la taille de lot influe la stratégie de reconfiguration. Ainsi avec une taille de lot de cinq, dès que le coût de déplacement atteint 1 000, plus aucune machine n'est déplacée alors qu'avec une taille de lot unitaire, il faut un coût de déplacement de 10 000. Plus la taille de lot augmente, moins il devient pertinent de déplacer les machines.

#### 4.1.4. Distance entre les machines

Dans cette partie, un troisième paramètre est étudié : la distance entre les machines qui est multipliée par dix. L'objectif dans cette partie est d'observer l'influence de la distance sur la stratégie de reconfiguration des machines. Pour cela, cinq expérimentations sont réalisées (E32 à E36). Les coûts de déplacement des expérimentations précédentes sont conservés et un nouveau niveau de coût est ajouté avec une valeur de 100 000. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4-45.

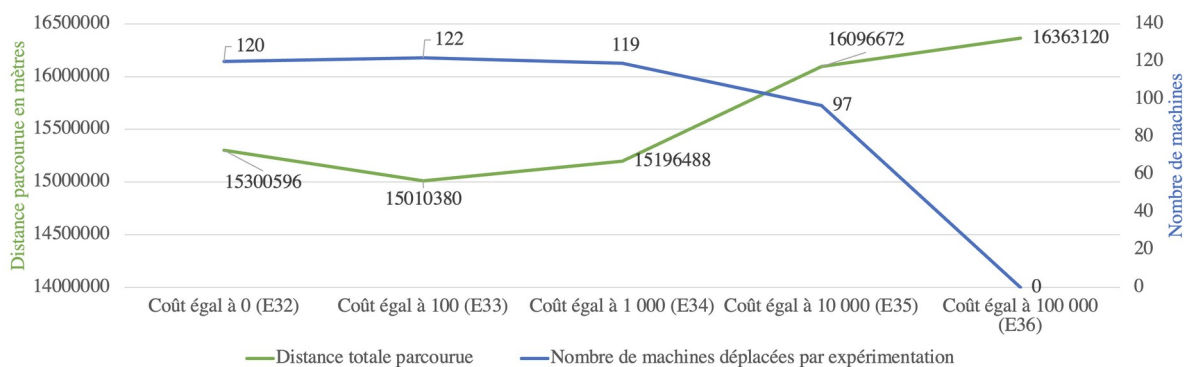


Figure 4-45 : influence du coût de reconfiguration des machines

Nous remarquons que les machines sont déplacées y compris lorsque le coût de déplacement égal à 10 000. Les trois premières expérimentations (E32, E33 et E34) donnent des résultats proches. L'expérimentation E36 donne un résultat plus élevé avec une détérioration du résultat par rapport aux précédentes expérimentations de  $G_{E32-E33} = 5,2\%$ ,  $G_{E32-E34} = 7,2\%$  et

$G_{E32-E35} = -5,6\%$ . Par contre, nous notons un changement de stratégie dès que le coût de déplacement atteint 100 000 par machine (E36) : aucune machine n'est déplacée.

Pour conclure, la distance entre les machines influe la stratégie de reconfiguration. Ainsi avec une distance multipliée par dix, dès que le coût de déplacement atteint 100 000, plus aucune machine n'est déplacée là où avec les distances précédentes, il faut un coût de déplacement de 10 000.

## 4.2. Optimisation de l'énergie

Dans cette partie, une nouvelle fonction objectif, relative à la consommation d'énergie du RMA, est introduite. L'objectif à travers l'utilisation de cette fonction objectif est d'observer si une conclusion différente de celle obtenue en utilisant la distance et d'essayer d'intégrer au sein des RMS les contraintes liées au développement durable. Cette partie est découpée en quatre ensembles d'expérimentations :

- Un premier ensemble compare trois stratégies de reconfiguration,
- Un second ensemble étudie l'influence du poids des machines. Les poids sont choisis arbitrairement,
- Un troisième ensemble évalue l'impact de deux capacités de transport du RMA différentes,
- Un dernier ensemble compare deux distances différentes entre les machines.

Le plan d'expérience est détaillé dans le Tableau 4-14.

| Expérimentation | Paramètres         |       |                 |   |          |     | Optimisation           |                               |                               | DTO (en heures) |
|-----------------|--------------------|-------|-----------------|---|----------|-----|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
|                 | Poids des machines |       | Capacité du RMA |   | Distance |     | $Opt_{1Per}^{3NivSeq}$ | $Opt_{5Per1Reconf}^{3NivSeq}$ | $Opt_{5Per5Reconf}^{3NivSeq}$ |                 |
|                 | 100kg              | 500kg | 1               | 5 | x1       | x10 |                        |                               |                               |                 |
| E37             |                    |       |                 |   |          |     | X                      | -                             | -                             | 3x5             |
| E38             | X                  | -     | X               | - | X        | -   | -                      | X                             | -                             | 3x5             |
| E39             |                    |       |                 |   |          |     | -                      | -                             | X                             | 1x3x5           |
| E40             | -                  | X     | X               | - | X        | -   | -                      | -                             | X                             | 1x3x5           |
| E41             | X                  | -     | X               | - | -        | X   | -                      | -                             | X                             | 1x3x5           |
| E42             | X                  | -     | -               | X | X        | -   | -                      | -                             | X                             | 1x3x5           |

Tableau 4-14 : plan d'expérience pour la fonction objectif de l'énergie

### 4.2.1. Stratégie de reconfiguration

Dans une première partie, les trois stratégies de reconfigurations du paragraphe 4.1.1 sont exploitées. Les stratégies sont récapitulées dans le Tableau 4-15 et les résultats sont présentés par la Figure 4-46.

| Stratégie de reconfiguration  | Expérimentation | Horizon | Nombre de reconfigurations autorisées |
|-------------------------------|-----------------|---------|---------------------------------------|
| $Opt_{1Per}^{3NivSeq}$        | E37             | 1       | 1                                     |
| $Opt_{5Per1Reconf}^{3NivSeq}$ | E38             | 5       | 1                                     |
| $Opt_{5Per5Reconf}^{3NivSeq}$ | E39             | 5       | 5                                     |

Tableau 4-15: récapitulatif des trois stratégies de reconfiguration

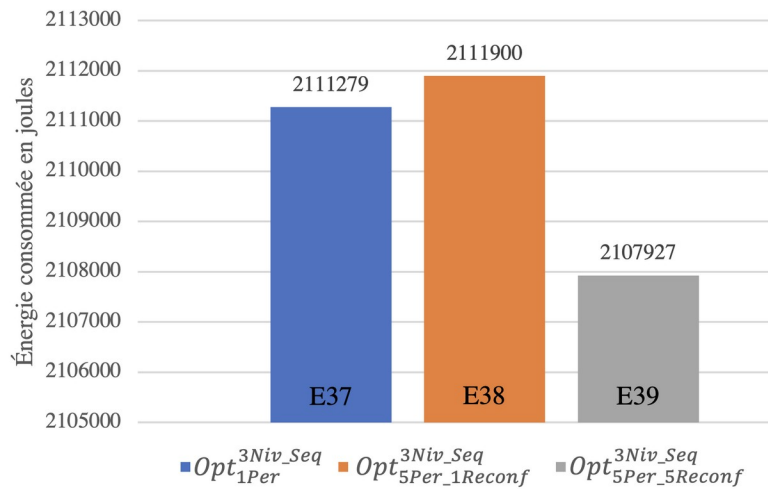


Figure 4-46 : consommation d'énergie sur cinq périodes en fonction de la stratégie de reconfiguration

Nous remarquerons que les résultats des trois expérimentations sont très proches. L'écart maximal est observé entre les expérimentations E38 et E39 avec un gain de cette dernière de  $G_{E38-E39} = 0,2\%$ . Contrairement aux résultats obtenus avec l'optimisation de la distance, l'expérimentation E37 ( $Opt_{1Per}^{3Niv\_Seq}$ ) ne donne pas le moins bon résultat parmi les trois stratégies de reconfigurations. Par contre lorsque la possibilité de reconfigurer l'atelier à chaque période est autorisée, le meilleur résultat est obtenu, ainsi l'expérience E39 donne le meilleur résultat. Ces valeurs très proches peuvent s'expliquer par le fait que dans le calcul de la consommation d'énergie, deux parties sont prises en compte. Une première concernant la mise en mouvement du RMA (seul, avec un produit ou avec une machine) et une seconde concernant la distance que ce dernier va parcourir. Or dans notre cas les distances entre les machines sont de l'ordre de la dizaine de mètres. Par conséquent la consommation d'énergie pour maintenir une vitesse stabilisée sur quelques dizaines de mètres est significativement plus faible que la consommation d'énergie pour la mise en mouvement d'une masse de plusieurs dizaines de kilogrammes.

En conclusion la reconfiguration permet d'économiser de l'énergie, mais pas de manière significative.

#### 4.2.2. Impact du poids des machines

Dans cette partie, l'expérimentation E39 est reprise et une seconde expérimentation (E40) est réalisée dans laquelle le poids des machines est augmenté à 500 kg. L'objectif est de déterminer si le poids des machines influe sur la stratégie de reconfiguration de l'atelier. Les résultats sont présentés par la Figure 4-47.

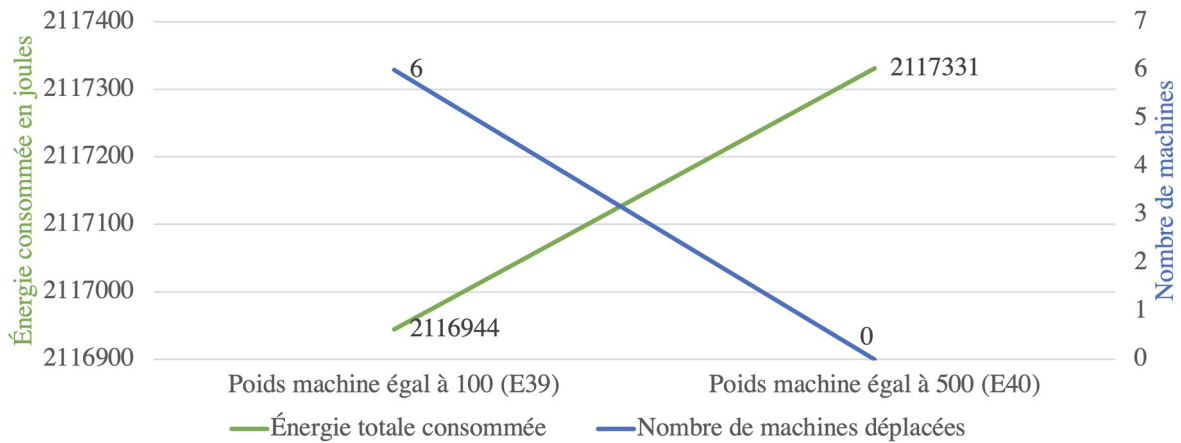


Figure 4-47 : influence du poids des machines sur la reconfiguration de l'atelier

La stratégie de reconfiguration n'est pas la même pour les deux expérimentations. Dans la première (E40), le poids de 500 kg des machines ne permet pas de trouver une configuration plus économe en déplaçant les machines. Dans la seconde, le poids de 100kg des machines permet à l'algorithme de trouver une configuration en déplaçant les machines. Nous remarquons également que malgré le déplacement des machines, le gain en termes d'énergie consommée de l'expérimentation E68 est négligeable :  $G_{E40-E39} = 0,02\%$ .

Nous pouvons en conclure que le poids des machines a une influence sur la reconfiguration de l'atelier. Plus le poids est élevé, plus l'énergie consommée est importante moins leur déplacement est économe.

#### 4.2.3. Impact de la distance

Dans cette partie, l'expérimentation E39 est conservée et une seconde expérimentation est réalisée (E41) dans laquelle les distances entre les machines sont multipliées par 10. L'objectif est d'observer l'influence de l'augmentation des distances parcourues par le RMA. Les résultats sont présentés par la Figure 4-48.

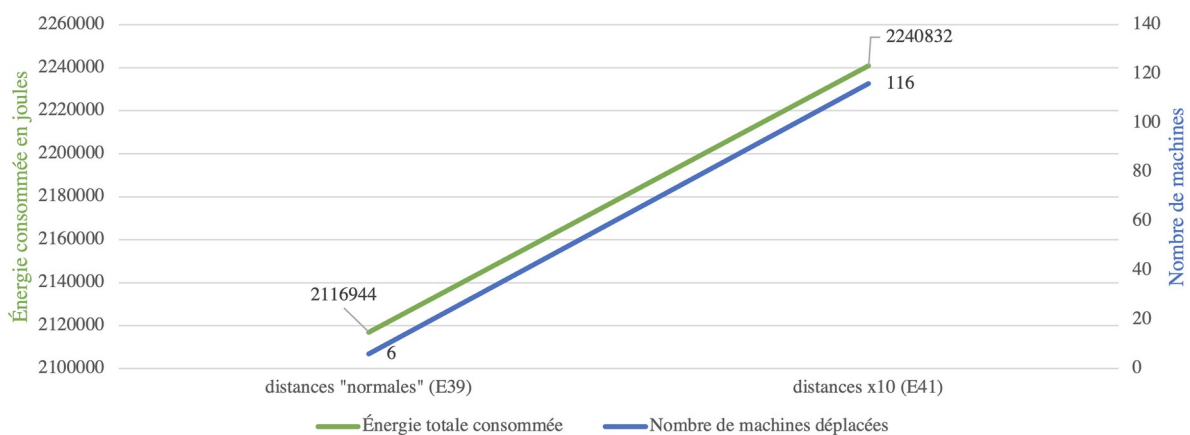


Figure 4-48 : influence de la distance entre les machines sur la consommation d'énergie

La première expérimentation (E39) montre que peu de machines (6) sont déplacées au cours des cinq périodes. Ce n'est pas le cas au cours de la seconde expérimentation (E41) qui compte 116 machines déplacées au cours des cinq périodes soit 19 fois plus par rapport à E39.



Ceci est dû aux distances plus élevées et donc à l'augmentation de l'importance de cette partie de l'équation du calcul de l'énergie.

En conclusion, plus les distances sont élevées plus il devient intéressant de déplacer les machines pour économiser sur l'énergie dépensée par le RMA.

#### 4.2.4. Impact de la taille de lot

Dans cette partie, deux expérimentations sont comparées. La première correspond à l'essai E39, dans lequel la taille de lots est égale à un. Un second essai est réalisé (E42), dans lequel la taille de lots est égale à cinq. Dans ce cas-là, le RMA transporte cinq produits identiques à la fois. Les résultats sont présentés dans la Figure 4-49.

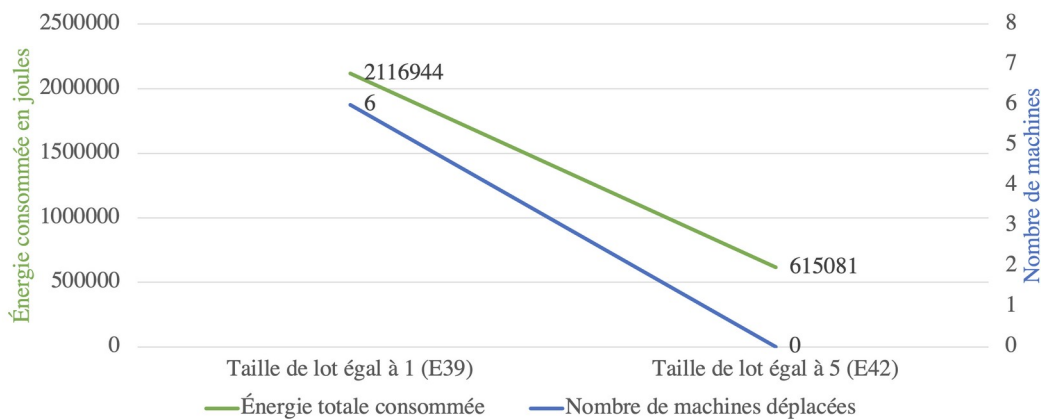


Figure 4-49 : influence de la taille de lot sur le coût en énergie

Dans la seconde expérimentation (E42), le coût total en énergie a diminué  $G_{E39-E42} = 70,1\%$ . Il est divisé par 3,4 par rapport à la première expérimentation. Le coût total n'est pas divisé par cinq parce que plus de produits sont transportés en même temps ce qui augmente la masse à déplacer et donc le coût en énergie pour réaliser le déplacement. Dans la seconde expérimentation, la stratégie de reconfiguration est également différente et aucune machine n'est déplacée. En effet comme une masse plus importante est déplacée lors de chaque trajet, la distance totale parcourue a moins d'influence dans la consommation totale d'énergie.

En conclusion, transporter plus de produits en même temps permet, dans ce cas, d'économiser sur la consommation d'énergie et modifie la stratégie de reconfiguration.

Pour conclure cette partie, les stratégies de reconfiguration basées sur les deux fonctions objectif sont similaires, mais n'ont pas la même influence. Dans le cas de la distance parcourue, les améliorations sont significatives avec un gain d'au moins 10% ; dans celui de l'énergie, de meilleurs résultats sont obtenus, mais avec un gain de 0,2%. Concernant l'ensemble des paramètres étudiés, ils influent la stratégie de reconfiguration dans le même sens quel que soit la fonction objectif. Ainsi la taille de lot et l'augmentation de la distance entre les machines ont la même influence avec les deux fonctions objectif. L'intérêt de déplacer les machines diminue avec l'augmentation de la taille de lot et l'intérêt de déplacer les machines augmente lorsque les distances sont plus importantes entre les machines. Concernant le coût de reconfiguration et le poids des machines, plus ils sont élevés moins il est intéressant de déplacer les machines.

## 5. Conclusion

Pour conclure ce chapitre, trois groupes d'expérimentations ont été réalisés, permettant de mettre en avant l'approche développée, de la comparer avec l'article de référence et d'évaluer différentes stratégies de reconfigurations dans le cas multi-périodes.

Dans une première partie, les instances utilisées dans le chapitre ont été détaillées, suivies par la configuration initiale, puis les différentes stratégies d'optimisation mises en œuvre, l'indicateur de performance utilisée et les outils logiciels utilisés.

La seconde partie commence par une comparaison de nos résultats avec ceux de l'article de référence. À l'issue de cette comparaison, nous pouvons conclure que notre approche permet d'améliorer les résultats de manière significative, quel que soit le niveau (implantation, orientation ou forme) de configuration optimisé. Suite à ces résultats, deux optimisations, parallèle et séquentielle, sont comparées en mettant en évidence de meilleurs résultats avec la seconde.

Dans une troisième partie, une comparaison entre les optimisations séquentielle et parallèle vise à compléter la validation de la stratégie d'optimisation séquentielle sur d'autres instances de données. Suite à cela, deux leviers permettant d'améliorer le résultat de l'optimisation séquentielle sont mis en place. Le premier utilise l'optimisation parallèle sur le premier niveau d'optimisation séquentielle pour améliorer la configuration initiale, avec un gain de près de six pour cent pour l'expérimentation possédant le temps accordé à l'optimisation parallèle le plus important (E17). Le second levier est l'ordre d'optimisation des niveaux de configuration. Ainsi deux ordres d'optimisation se distinguent et sont les suivants : F->O->I et O->F->I.

La quatrième partie de ce chapitre est focalisée sur l'étude de deux fonctions objectifs dans le contexte d'une planification de la reconfiguration sur plusieurs périodes successives. Avec la première minimisant les distances, les résultats montrent que lors de la prise en considération de plusieurs périodes, permettre la reconfiguration à chaque période donne un meilleur résultat. Plusieurs variations de paramètres sont également étudiées :

- Coût de reconfiguration : plus il est élevé lors du passage d'une période à la suivante moins les machines sont déplacées et plus la distance parcourue augmente.
- Taille de lot : elle influe également sur la stratégie de reconfiguration. Ainsi avec une taille de lot de cinq, dès que le coût de reconfiguration atteint 1 000, plus aucune machine n'est déplacée alors qu'avec une taille de lot unitaire, il faut un coût de reconfiguration de 10 000.
- Distance entre les machines : elle influe sur la stratégie de reconfiguration. Ainsi avec une distance multipliée par dix, dès que le coût de reconfiguration atteint 100 000, plus aucune machine n'est déplacée alors qu'avec une taille de lot unitaire, il fallait un coût de reconfiguration de 10 000.

Concernant l'objectif de réduction de l'énergie, permettre une reconfiguration à chaque période influe faiblement sur le résultat, bien qu'il soit légèrement meilleur. Ainsi l'influence des paramètres étudiés est le suivant :

- Poids des machines : il influe fortement sur la consommation d'énergie, car un poids de machines plus faible rend la reconfiguration avantageuse alors qu'elle ne l'était pas avec des poids plus élevés de machines.
- Distance entre les machines : plus elle est importante, plus elle permet également de rendre le déplacement des machines plus avantageux.
- Taille de lot : son augmentation de la taille de lots pénalise la reconfiguration, mais permet une diminution de la consommation d'énergie.

## Chapitre 5 : étude par simulation d'une configuration optimisée

L'objectif de ce chapitre est de simuler une configuration d'atelier résultant de l'utilisation du modèle développé dans le chapitre trois (modèle d'optimisation ou MO) sur une des instances introduites et utilisées au chapitre 4. Dans le MO, plusieurs éléments ne sont pas pris en considération comme :

- le chemin que doit parcourir le robot mobile autonome (RMA),
- le temps mis par le RMA pour reconfigurer l'atelier et déplacer les produits,
- le taux d'utilisation du RMA,
- l'utilisation de plusieurs RMA en même temps.

L'outil de simulation permet de prendre en considération l'ensemble des éléments précédemment cité en permettant de visualiser l'ensemble des agents (RMA, produits et machines) évoluant au cours du temps.

Une première partie présente l'adaptation du modèle d'optimisation, exposée dans le chapitre trois, au modèle de simulation. Dans cette partie, un exemple est suivi dans lequel les trajets sont d'abord réparés puis le chemin du RMA est construit. Dans une seconde partie, les scénarios de simulation sont décrits. Quatre scénarios sont construits : un premier dit théorique, sur la base du modèle d'optimisation ; trois autres dits réalistes : le second prenant en compte le trajet optimal du RMA ; le troisième ne prenant pas en compte le trajet optimal du RMA ; le quatrième dans lequel un deuxième RMA est utilisé pour déplacer les produits. Enfin dans une troisième partie, les résultats obtenus sont étudiés autour d'indicateurs clés de performance qui sont le temps mis pour reconfigurer l'atelier et déplacer les produits ; le taux d'utilisation des RMAs ; la distance parcourue et l'énergie consommée pour déplacer les produits.

### 1. Adaptation du modèle d'optimisation au modèle de simulation

Dans cette partie, les étapes nécessaires pour adapter les résultats du modèle d'optimisation au modèle de simulation sont décrites (Figure 5-50). Le point de départ est l'application du modèle d'optimisation, décrit dans le chapitre 3, dans le bloc « Optimisation » avec en entrée la configuration initiale et les trajets en charge, et en sortie une configuration optimisée et des trajets à vide. Ces deux sorties sont des entrées pour le bloc « Réparation » auxquelles s'ajoutent les trajets en charge. La réparation des trajets à vide consiste en leur réorganisation partielle, si besoin. Ce second bloc produit en sortie des trajets à vide réparés qui passent en entrée du bloc « Organisation » avec les trajets en charge pour donner en sortie le chemin complet réalisable incluant les trajets en charge et à vide du RMA. Le rôle de ce bloc est de déterminer le chemin que doit suivre le RMA pour répondre à la demande de transport. La configuration optimisée, les trajets à vide réparés, le chemin du RMA et les trajets en charge sont passés en entrée du bloc « Simulation ». La sortie de ce bloc donne des indicateurs clés de performance dont certains sont comparés avec les résultats du bloc « Optimisation ».

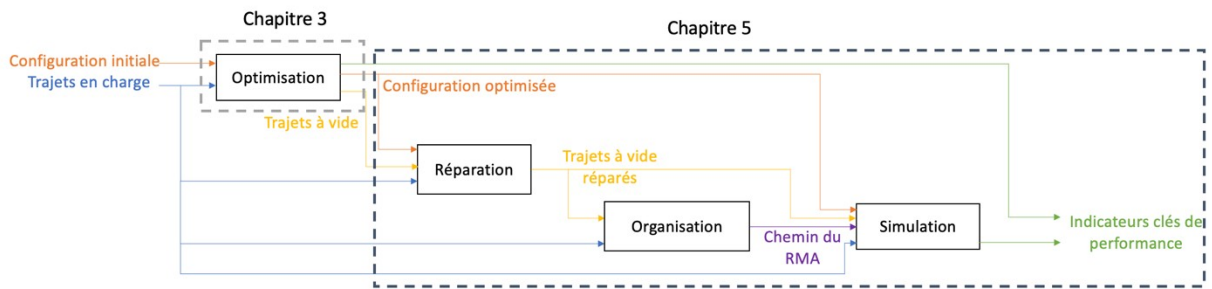


Figure 5-50 : cheminement des données jusqu'à leur entrée dans le bloc « Simulation ».

La Figure 5-51 est un exemple, comportant deux machines, qui est exploité tout au long de la partie 1 de ce chapitre. À gauche de cette figure, sont présents deux tableaux nommés « Trajets en charges » et « Configuration initiale ». Ces deux tableaux sont donnés en entrée du bloc « Optimisation », comme décrit dans la Figure 5-50. Dans cet exemple, l'exécution de ce bloc retourne les deux tableaux de la Figure 5-51 de droites, nommées « Trajets à vide » et « Configuration optimisée ». Pour rappel deux types de trajets existent :

- les trajets dits « en charge » sont les trajets réalisés par le RMA lors du transport d'un produit ou d'une machine. Dans le cas du déplacement d'un produit, le RMA se déplace d'un point de ramassage (R) vers un point de dépôt (D).
- Les trajets dits « à vide » sont les trajets réalisés par le RMA lors d'un déplacement sans produit ou machine. Dans le cas du déplacement d'un produit, le RMA se déplace d'un point D vers un point R.

| Trajets en charges |    |    |
|--------------------|----|----|
| Points             | D1 | D2 |
| R1                 | 0  | 3  |
| R2                 | 3  | 0  |

| Trajets à vide |    |    |
|----------------|----|----|
| Points         | R1 | R2 |
| D1             | 0  | 3  |
| D2             | 3  | 0  |

| Configuration initiale | Sites |    |
|------------------------|-------|----|
|                        | 1     | 2  |
| Implantation           | M1    | M2 |
| Orientation            | 1     | 1  |
| Forme                  | L     | L  |

| Configuration Optimisée | Sites |    |
|-------------------------|-------|----|
|                         | 1     | 2  |
| Implantation            | M1    | M2 |
| Orientation             | 2     | 3  |
| Forme                   | L     | L  |

Figure 5-51 : exemple de paramètres d'entrées (à gauche) et de résultats (à droite) du bloc « Optimisation »

La configuration de l'atelier est représentée sous la forme d'un graphe non orienté appelé graphe d'atelier. La Figure 5-52 représente la configuration initiale de la Figure 5-51, à gauche, et la configuration optimisée associée la Figure 5-51 à droite.



Figure 5-52 : illustration des graphes d'atelier pour la configuration initiale (à gauche) et la configuration optimisée (à droite)

Afin d'obtenir l'ensemble des données nécessaires à la simulation, la partie 1.1. explique les hypothèses qui sont conservées ou modifiées par rapport au modèle d'optimisation développé dans le chapitre 3. Les deux parties suivantes détaillent deux sous-problèmes qui sont la réparation des trajets à vide (partie 1.2.) et la détermination du chemin parcouru par le RMA (partie 1.3.).

### 1.1. Hypothèses de travail

Les hypothèses suivantes du MO sont conservées :

- H1, H2, H3 et H4 concernant respectivement la modélisation, l'orientation, la forme ainsi que la possibilité de reconfigurer les machines.
- H5 et H6 stipulant respectivement qu'il y a autant de machines que de sites et que chaque site ne peut accueillir qu'une seule machine.
- H8 précisant que la capacité de transport du RMA est unitaire (c'est-à-dire un produit ou une machine)
- H9, H10, H11 et H12 relatives aux trajets en charge et à vide qui sont conservés.
- H13 concernant la vitesse maximale du RMA, qui est atteinte instantanément.

L'hypothèse H7, relative à la modélisation de l'atelier et aux possibilités d'implantation demeure, mais est exprimée différemment avec l'outil de simulation.

### 1.2. Réparation des trajets à vide

L'objectif général dans ce chapitre consiste à définir le parcours détaillé du RMA ce qui correspond à la construction d'un chemin admissible dans le graphe d'atelier. Pour cela, il est nécessaire que le graphe composé des trajets en charge et à vide (graphe orienté des trajets) soit fortement connexe. Cette partie vise à vérifier cette propriété et corrige les trajets à vide le cas échéant.

Dans cette partie, scindée en deux, le problème de connexité du graphe des trajets est abordé de manière générale, dans un premier temps ; puis un exemple est utilisé pour illustrer la résolution du problème, dans un second temps.

#### 1.2.1. Problème général

Pour rappel, la fonction objectif fait appel à la résolution d'un problème de transport (chapitre trois, partie 1.3.2.2) pour déterminer les trajets à vide. Dans le MO, la question de la connexité du graphe des trajets n'est pas posée. Ainsi, bien que d'un point de vue mathématique, les trajets à vide déterminés soient juste, la simulation du chemin complet du RMA (à vide et en charge) n'est pas toujours possible à cause de non-connexités potentielles. Le graphe des trajets est construit. Si des sommets ne sont reliés à aucun arc, cela signifie qu'aucun trajet n'est au départ ou à l'arrivée de ces sommets. Ces sommets « isolés » sont retirés du graphe des trajets. Deux possibilités existent :

- le graphe des trajets résiduel est connexe. Alors, l'ensemble des trajets peut être simulé.

- le graphe des trajets résiduel est non connexe et par conséquent, il existe au moins deux composantes fortement connexes différentes comportant des arcs. Dans ce cas, l'ensemble des trajets ne peut pas être simulé, car le RMA ne pourra pas « circuler » d'une composante fortement connexe à une autre : il faut rendre le graphe connexe. Pour résoudre ce problème, les composantes fortement connexes doivent être reliées les unes aux autres. La méthode adoptée consiste à choisir un couple de sommets R et D voisins (avec un trajet en charge et à vide les reliant) dans deux composantes du graphe. Dans chaque couple, un arc correspondant à un trajet à vide est choisi et voit sa destination modifiée et dirigée vers le sommet R de l'autre couple de sommets de la seconde composante fortement connexe. Si le graphe résiduel ainsi modifié est toujours non connexe, la méthode est répétée jusqu'à constituer un graphe des trajets fortement connexe.

### 1.2.2. Exemple illustratif

Dans la partie précédente, nous avons introduit le problème général. Dans cette partie, l'exemple de la Figure 5-51 est repris. Dans une première partie de l'exemple, la connexité du graphe des trajets est vérifiée. Dans la seconde partie, la réparation des trajets à vide est détaillée.

#### 1.2.2.1. Connexité du graphe des trajets

La Figure 5-53 représente le graphe des trajets. Ce graphe est composé des points de ramassages (en rouge) et de dépôt (en vert) des machines ainsi que des arcs correspondant aux trajets en charge (flèches rouges) et à vide (flèches vertes). Un poids est également donné aux arcs, ce poids correspond au nombre de trajets à effectuer. Deux composantes fortement connexes sont présentes : la première composée des sommets R1 et D2 et la seconde composée des sommets D1 et R2. Ainsi dans ce cas, le graphe des trajets est non connexe. Il convient de noter qu'un enchaînement de trajets définit un chemin parcouru par le RMA.

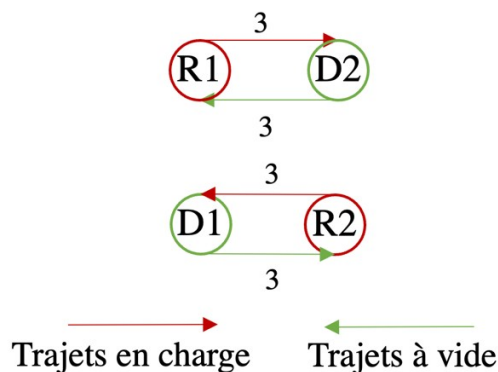


Figure 5-53 : graphe des trajets non connexe

#### 1.2.2.2. Correction des trajets à vide

Les composantes fortement connexes des trajets sont connectées entre elles afin d'obtenir un graphe des trajets fortement connexe. Dans notre exemple, chaque composante fortement connexe est composée d'un couple de points R et D avec au moins un arc correspondant à un

trajet à vide et un arc correspondant à un trajet en charge. Pour connecter deux composantes fortement connexes des trajets ensemble, un arc, choisi aléatoirement correspondant à un trajet à vide de la première composante fortement connexe (R1-D2), est réorienté vers un autre point de ramassage de la seconde composante fortement connexe (D1-R2). Puis un arc correspondant à un trajet à vide de la seconde composante fortement connexe (D1-R2) est réorienté vers un autre point de ramassage de la première composante fortement connexe (R1-D2). Cette réparation permet d'obtenir un graphe des trajets fortement connexe (Figure 5 - 54).

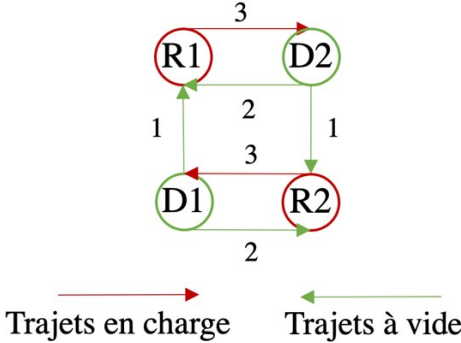


Figure 5-54 : graphe des trajets fortement connexe

1.3. Chemin parcouru par le RMA

Le chemin parcouru par le RMA correspond à la succession des trajets en charge et à vide que doit exécuter le RMA. Cette partie est scindée en deux. Dans un premier temps, le problème est abordé de manière générale, puis dans un second temps un exemple est utilisé pour illustrer le problème précédemment présenté.

1.3.1. Problème général

Le problème consiste à trouver un chemin eulérien (CE) dans le graphe orienté des trajets constitués des trajets en charge et à vide réparés. Pour rappel, un CE dans un graphe est un chemin qui passe une fois et une seul tous les arcs du graphe. Dans notre cas, ce chemin doit également former un circuit eulérien : CE fermé (retour au sommet de départ). Ce chemin eulérien correspond au chemin du RMA. Pour effectuer la recherche d'un CE dans le graphe des trajets, les arcs pondérés sont dupliqués autant de fois que la valeur de la pondération (Figure 5 -55) c.-à-d. les pondérations sont alors unitaires. Pour rappel cette pondération représente le nombre de trajets (en charge ou à vide) que doit réaliser le RMA.

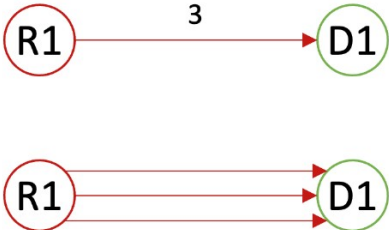


Figure 5-55 : duplication d'un arc d'une pondération de trois



Le graphe des trajets unitaires est nommé  $G = (S, A)$ . Il est biparti et orienté. L'ensemble  $S$  des sommets est composé de deux ensembles disjoints  $R_i$  et  $D_j$ . L'ensemble  $R_i$  est associé aux points de ramassage, identifiés par l'indice  $i$  avec  $i \in \{1 \text{ à } n\}$ ,  $n$  correspondant au nombre total de points de ramassage / dépôt. Les sommets correspondant aux points de dépôt ( $D_j$ ) sont identifiés par l'indice  $j$  avec  $j \in \{1 \text{ à } n\}$ . L'ensemble des arcs,  $A$ , est composée des trajets en charge et des trajets à vide. Pour résoudre ce problème, nous proposons une méthode heuristique constructive qui permet de trouver une solution admissible.

La construction du CE suit les étapes suivantes :

- Le sommet de départ est choisi aléatoirement parmi l'ensemble  $R_i$ .
- Pour l'ajout d'un trajet dans le CE, l'arc choisi doit avoir son point de départ correspondant au dernier sommet du chemin courant. Pour le sommet d'arrivée de cet arc, la règle de sélection (arbitraire) consiste à choisir le sommet dont l'indice ( $i$  ou  $j$ ) est le plus petit. Une fois l'arc ajouté au CE, ce dernier devient non disponible.
- Lorsqu'il n'y a pas d'arc disponible au départ du dernier sommet du CE et que tous les arcs n'ont pas été parcourus, un retour en arrière est effectué et l'arc précédemment retiré est rendu à nouveau disponible. Il convient alors de choisir un arc différent du précédent. Le choix de l'arc respecte la même règle de sélection que l'étape précédente, mais l'arc précédemment choisi est exclu du choix.
- La construction du chemin s'arrête lorsque l'ensemble des arcs disponibles est vide.

### 1.3.2. Exemple de construction du CE

Afin d'illustrer le problème général de construction du CE, nous considérons comme point de départ l'exemple défini par le tableau des trajets en charge (Figure 5-51) et à vide réparés correspondant au graphe représenté par la Figure 5-54. Le graphe des trajets (Figure 5-56-A) est transformé en graphe des trajets unitaires (GTU) (Figure 5-56-B).

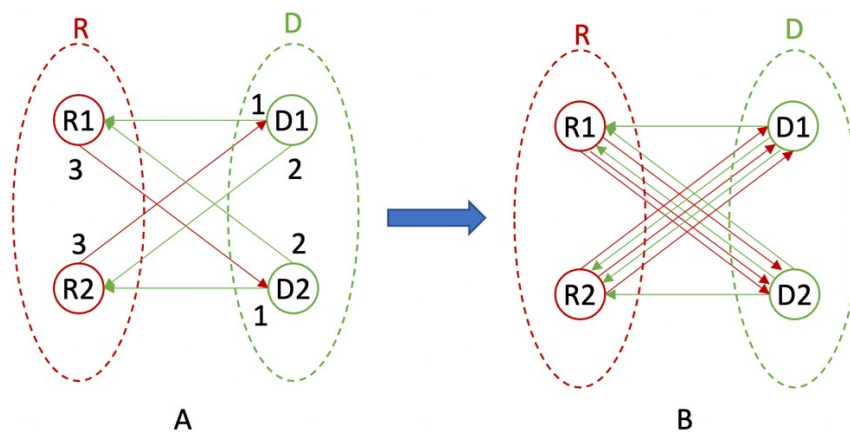
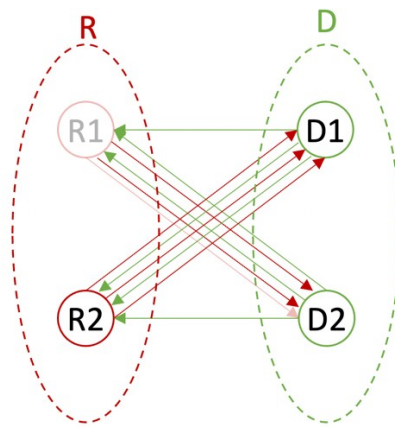


Figure 5-56 : transformation du graphe des trajets en GTU (de gauche à droite)

Dans cet exemple, le sommet de départ du CE est fixé aléatoirement au sommet R1. Pour atteindre le sommet D2, l'arc reliant R1 à D2 est choisi parmi les trois arcs possibles par application de la règle de sélection. Dans la Figure 5-57 le sommet et l'arc sélectionnés, devenus indisponibles, sont grisés.



**Chemin eulérien**  
R1-D2

Figure 5-57 : Début de construction du chemin eulérien

Après le choix successif d'autres arcs pour construire le chemin eulérien, la Figure 5-58-A est un exemple dans lequel il n'existe pas d'arc sortant pour le sommet courant R1. Un retour en arrière est opéré conduisant au chemin de la Figure 5-58-B, basé sur le choix de l'arc D1-R2 au lieu de D1-R1. Ce faisant, la construction du chemin peut se poursuivre.

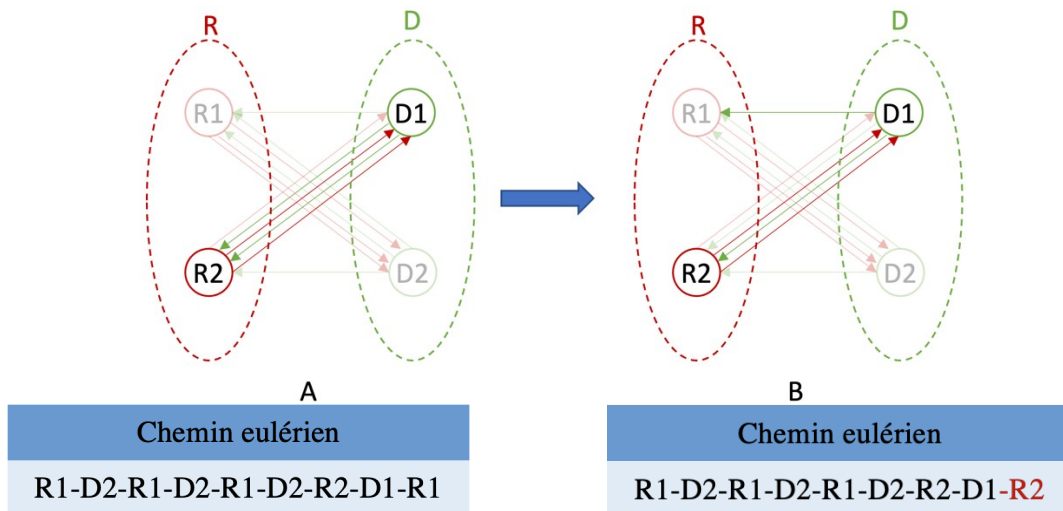


Figure 5-58 : correction du chemin eulérien

Une fois la construction du CE terminé, ce dernier correspond au chemin du RMA. Toutes les données sont alors disponibles pour établir des scénarios de simulation. La Figure 5-59 regroupe l'ensemble des données en entrée du bloc « Simulation ». Pour rappel les trajets à vide finaux sont obtenus lors de la réparation des trajets à vide décrit dans la partie 1.2. La configuration optimisée quant à elle est le résultat du MO.

| Chemin eulérien                        |  |
|--|--|
| R1-D2-R1-D2-R1-D2-R2-D1-R2-D1-R2-D1-R1 |  |

| Trajets en charges |    |    | Trajets à vide finaux |    |    |
|--------------------|----|----|-----------------------|----|----|
| Points             | D1 | D2 | Points                | R1 | R2 |
| R1                 | 0  | 3  | D1                    | 1  | 2  |
| R2                 | 3  | 0  | D2                    | 2  | 1  |

| Configuration optimisée | Sites |    |
|-------------------------|-------|----|
|                         | 1     | 2  |
| Implantation            | M1    | M2 |
| Orientation             | 2     | 3  |
| Forme                   | L     | L  |

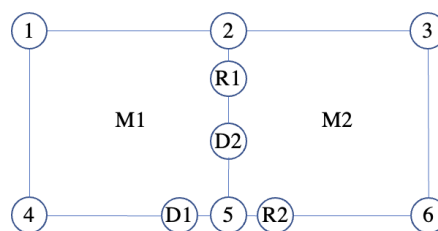


Figure 5-59 : données du scénario de simulation

## 2. Description des scénarios de simulation

Les scénarios sont construits avec le logiciel de simulation AnyLogic<sup>9</sup>. Nous avons choisi ce logiciel parce qu'il permet de réaliser des simulations mélangeant les modélisations par agent, par événements discrets et de dynamique de système. Même si dans notre cas seulement les deux premières sont utilisées. Dans une première partie, les hypothèses sont présentées, suivies par les données et valeurs dans une seconde partie. La troisième partie détaille la modélisation de la batterie. Une quatrième partie explique le déroulement de la simulation. Puis dans une cinquième partie, le socle commun aux simulations est présenté. Pour finir, les spécificités des simulations sont détaillées dans la sixième partie.

### 2.1. Hypothèses de simulation

Plusieurs hypothèses de travail relatives au RMA et aux machines sont fixées pour cadrer les scénarios de simulation.

- RMA
  - Chargement / déchargement
    - Machine : lors du déplacement d'une machine, une durée de chargement et de déchargement de la machine sur le RMA est prise en compte. Pour modéliser ces durées, nous choisissons une seule et même loi triangulaire (LT), car il s'agit d'une loi aléatoire encadrée

<sup>9</sup> <https://www.anylogic.fr>

par une valeur minimale et maximale dont les valeurs tendent vers une moyenne fixée.

- Produits : pour chaque déplacement d'un produit, une durée de chargement et de déchargement est prise en compte. Dans notre cas d'étude, un produit est moins encombrant qu'une machine. Par conséquent la durée de chargement et de déchargement d'un produit est plus courte que celle d'une machine. Les durées de déchargement des produits sont identiques aux durées de chargements.

Lors du chargement et du déchargement du RMA, aucune aide extérieure n'est nécessaire. Ainsi le RMA se charge et se décharge seul. Il y a un total de 8795 produits à déplacer.

- Collisions : lors du déplacement du RMA, la gestion des collisions n'est pas prise en compte, avec les produits ou avec les machines.
- Machines : le RMA se contente de déplacer la machine ; cette dernière se met dans la bonne orientation et forme sans intervention extérieure. Les collisions entre machines ne sont pas prises en compte.
- Autre : il n'y a pas d'arrêts réglementaires imposés dans une journée de travail.

## 2.2. Données et valeurs

Les valeurs liées aux hypothèses précédemment citées sont groupées dans le Tableau 5-16

| Données   | Valeurs                 |
|---|-------------------------|
| Vitesse du RMA                                      | 1 m/s                   |
| Temps de chargement /<br>déchargement d'une machine | (2,4; 4,8; 7,2) minutes |
| Temps de chargement /<br>déchargement d'un produit  | (0,5; 1; 1,5) minutes   |
| Unité temporelle                                    | Minute                  |
| Nombre de machines                                  | 25                      |
| Nombre de produits à déplacer                       | 8795                    |

Tableau 5-16 : valeurs numériques communes aux scénarios de simulations « réalistes »

## 2.3. Modélisation de l'usage de la batterie pour la simulation

Lors du démarrage de la simulation, la batterie du RMA est chargée à 100 %. Concernant les contraintes plus spécifiques à la simulation, les conseils d'utilisation de batterie lithium-ions préconisent l'utilisation de la batterie entre 20-80%<sup>10</sup> de sa capacité. C'est pourquoi nous avons limité la plage d'utilisation de la batterie à cet intervalle. Les valeurs numériques sont regroupées dans le Tableau 5-17. La loi de déchargement de la batterie reprend l'équation 3-10 ( $E_{tot}$ ) de la consommation d'énergie du chapitre 3 et la convertie en watt/heure (JWh = 0.000278) pour être soustraite à la capacité restante de la batterie du RMA :

<sup>10</sup> (Redondo-Iglesias, n.d.)

$$Capacité_i - JWh \times E_{tot}$$

Équation 5-23

| Données de la batterie                       | Valeurs     |
|--|-------------|
| Plage d'utilisation de la capacité           | 20 % à 80 % |
| Temps de chargement (20 % à 80 %)            | 2,9 h       |
| Durée de fonctionnement du RMA (80 % à 20 %) | 8,13 h      |

Tableau 5-17 : valeurs numériques liées à l'utilisation de la batterie des RMA

#### 2.4. Déroulement de la simulation

Le déroulement d'une simulation correspond à une période de production incluant la reconfiguration de l'atelier et le transport de tous les produits (Figure 5-60). Lors du lancement de la simulation, la configuration initiale, décrite dans le chapitre quatre partie 1.2 est mise en place. Pour rappel dans cette configuration, chaque machine  $i$  est implantée sur le site  $i$ . L'ensemble des machines est dans l'orientation « 1 » et avec une forme en « L ». Ensuite le RMA déplace les machines en fonction du résultat trouvé avec le modèle d'optimisation (MO) présenté dans le chapitre 3. Lorsque cette reconfiguration d'atelier est terminée, l'ensemble des produits arrivent sur les zones de ramassage des machines. Finalement, le RMA doit déplacer les produits depuis leurs zones de ramassage vers leurs zones de dépôt correspondantes. La simulation se termine lorsque tous les produits sont déplacés.

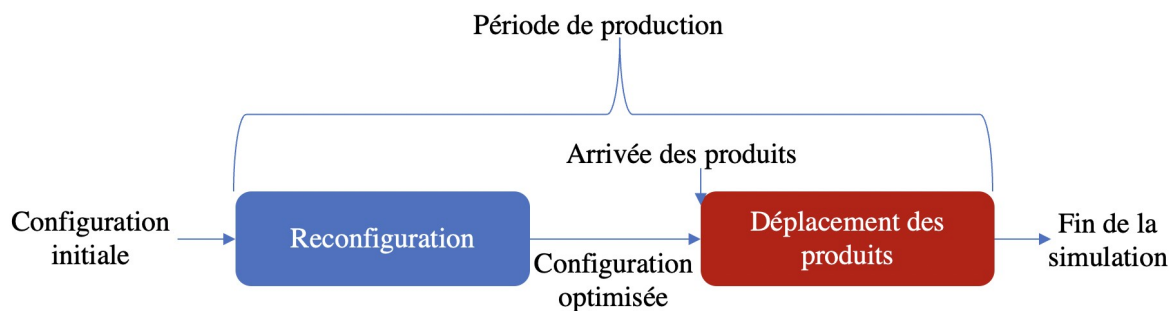


Figure 5-60 : déroulement de la simulation

#### 2.5. Socle commun aux scénarios de simulation

L'ensemble des scénarios de simulation construits possède un socle commun décrit dans cette partie. Les simulations sont composées de trois populations d'agents :

- les RMA,
- les produits,
- les machines.

Ces trois populations d'agents évoluent dans un environnement de simulation commun. Une population d'agents comporte un ou plusieurs agents identiques (RMA, machine ou produit).

- L'environnement de simulation est composé de deux parties. La première partie contient le plan de l'atelier (Plan de l'atelier). C'est dans cet espace que l'ensemble des agents évoluent au cours de la simulation. Dans une seconde partie, l'ensemble des éléments (agents, blocs, variables, fonctions) regroupant la modélisation par événements discrets de la simulation sont présentés (Vue des processus logique). Ces éléments sont issus des bibliothèques sectorielles d'AnyLogic et permettent le déroulement de la simulation.
- Robot mobile autonome : l'agent RMA correspond au moyen de transport utilisé dans la simulation pour réaliser l'ensemble des transports (machines et produits). Il est représenté par un rectangle de couleur (rose ou vert) avec RMA inscrit à l'intérieur (Plan de l'atelier).
- Les machines sont représentées par des rectangles gris (Plan de l'atelier) avec en périphérie deux carrés correspondant à la zone de ramassage (en bleu) et de dépôt (en jaune). Au centre de chaque machine est inscrit un numéro qui sert également d'identifiant.
- Les produits : l'agent produit est représenté par un carré violet.

## 2.6. Scénarios de simulation

Les scénarios de simulation sont construits autour de cinq paramètres qui sont :

- Position des points R et D : soit les points de ramassage (R) et de dépôt (D) sont placés sur le couloir de circulation du RMA (comme dans le modèle d'optimisation MO), dans ce cas-là, la solution est proche du modèle théorique. Soit les points sont placés à l'intérieur des sites, auprès des machines, ce qui rend la simulation plus réaliste.
- Durée de chargement / déchargement : soit les durées sont prises en compte pour que le scénario de simulation soit plus représentatif de la réalité, soit les durées ne sont pas prises en compte comme c'est le cas du MO présenté dans le chapitre 3.
- Capacité de la batterie : comme pour les durées de chargement / déchargement, pour que le scénario soit plus réaliste la capacité de la batterie est prise en compte. Pour que le scénario soit plus proche du MO, la capacité de la batterie est infinie.
- Chemin parcouru par le RMA optimal : nous parlons de chemin, parcouru par le RMA, optimal lorsque les trajets à vide, issus du modèle d'optimisation (MO), sont pris en considération et éventuellement réparés avec les trajets en charge afin déterminer le chemin optimal du RMA pour répondre à la demande de transport tel que décrit dans la partie 1 de ce chapitre. Lorsque le chemin n'est pas optimal, les trajets à vide issus du MO ne sont pas pris en compte. Dans ce scénario-là, le RMA commence par déplacer tous les produits depuis la machine n°1, puis passe à la machine n°2, et ainsi de suite jusqu'à la machine 25.
- Nombre de RMA : les scénarios comportent un ou deux RMA.

Quatre scénarios ont été construits à partir de ces paramètres et sont détaillés dans les paragraphes suivants. Parmi ces quatre scénarios, un scénario est dit théorique, dans le sens où il reprend le modèle d'optimisation présenté dans le chapitre trois. Les trois autres scénarios sont dits réalistes parce qu'ils prennent en compte les temps de chargement / déchargement des machines et produits, la capacité de la batterie du RMA ainsi que le placement des points

de ramassage et de dépôt à l'intérieur des sites, auprès des machines et non plus sur les couloirs de circulation du RMA.

### 2.6.1. Scénario de simulation théorique (ST)

Le premier scénario de simulation (Figure 5 -61) est similaire à celui du modèle d'optimisation (MO) présenté dans le chapitre 3. Ainsi les points de ramassage et de dépôt sont positionnés sur les couloirs de circulation du RMA (pointillés bleus sur la Figure 5 -61) et un seul RMA est utilisé. Aucune durée de chargement n'est prise en compte (égale à zéro) et la batterie a une capacité infinie, c'est-à-dire qu'aucune recharge du RMA n'est nécessaire. L'objectif est d'obtenir un modèle de simulation dont le comportement est similaire au MO afin de le valider.

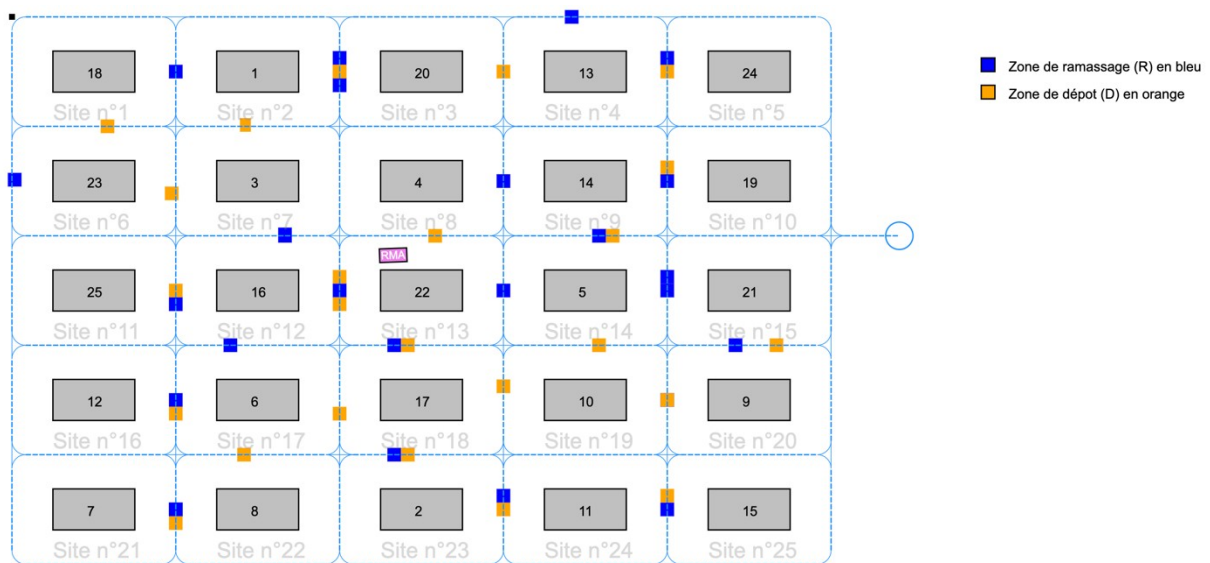


Figure 5-61 : Configuration optimisée du scénario de simulation théorique (ST)

### 2.6.2. Scénarios de simulation « réalistes »

Les zones de ramassage et de dépôt des machines ne sont plus situées sur les couloirs de circulation du RMA, mais à l'intérieur des sites, auprès des machines (Plan de l'atelier). De plus le RMA n'a plus d'autonomie infinie et les durées de chargement / déchargement sont prises en compte. Avec ces nouvelles conditions, trois scénarios plus réalistes sont construits :

- Scénario de simulation avec chemin optimal du RMA (SACO) : dans ce scénario, le chemin du RMA est réparé puis déterminé tel que décrit dans la partie 1 de ce chapitre.
- Scénario de simulation avec chemin non optimisé du RMA, optimal (SSCO : Simulation Sans Chemin Optimal) : dans ce scénario, le RMA commence par déplacer tous les produits depuis la machine n°1, puis passe à la machine n°2, et ainsi de suite.
- Scénario de simulation avec deux RMA (S2RMA) : ce scénario de simulation reprend le scénario SACO et un second RMA est ajouté pour augmenter la ressource de transport dans le déplacement des produits uniquement. Ainsi, le second RMA n'est pas affecté au déplacement des machines lors de la reconfiguration de l'atelier.

Le chemin optimisé du scénario SACO est conservé et utilisé. Cependant, comme deux RMAs sont utilisés au lieu d'un seul pour parcourir le chemin complet, le problème du partage du chemin entre les RMAs se pose. Le choix est fait de diviser le chemin optimisé en deux moitiés égales ou presque égales de couples de points Ri-Dj. Chaque RMA parcourt l'une des deux moitiés. La Figure 5-62 illustre le chemin optimisé eulérien présenté en Figure 5-59. Dans ce cas-là, le RMA n°1 parcourt la première moitié (en bleu) et le RMA n°2 parcourt la seconde moitié (en rouge) du chemin optimisé.

| Cas    | RMA     | Chemin optimisé                        |
|--------|---------|--|
| 1 RMA  | RMA n°1 | R1-D2-R1-D2-R1-D2-R2-D1-R2-D1-R2-D1-R1 |
| 2 RMAs | RMA n°1 | R1-D2-R1-D2-R1-D2                      |
|        | RMA n°2 | R2-D1-R2-D1-R2-D1-R1                   |

Figure 5-62 : exemple de division de chemin optimisé pour deux RMAs

Le Tableau 5-18 récapitule l'ensemble des scénarios de simulation avec leurs spécificités.

|   | ST      | SACO    | SSCO    | S2RMA   |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Points R et D sur les couloirs de circulation | Oui     | Non     | Non     | Non     |
| Durées Chargement / Déchargement              | Nulles  | LT      | LT      | LT      |
| Capacité batterie                             | Infinie | Limitée | Limitée | Limitée |
| Chemin parcouru par le RMA optimal            | Oui     | Oui     | Non     | Oui     |
| Nombre de RMA                                 | 1       | 1       | 1       | 2       |

Tableau 5-18 : spécificité des scénarios de simulation

### 3. Analyse des résultats de simulation

Dans cette troisième partie, les indicateurs clés de performance (ICPs) sont détaillés dans un premier temps. Dans un second temps, les résultats du modèle d'optimisation (MO) sont comparés aux résultats du scénario théorique (ST). Dans un troisième temps, les résultats des trois scénarios « réalistes » sont comparés, avec les scénarios SACO et SSCO entre eux puis les scénarios SACO et S2RMA entre eux.

#### 3.1. Indicateurs clés de performances (ICP)

Afin de pouvoir comparer les scénarios de simulation, les ICPs sont définis. Ces ICPs sont groupés en trois catégories : le transport des produits, la durée de la simulation et le taux d'utilisation du RMA.

- Les six ICPs concernant le transport des produits sont les suivants :

| Sigles | Libellés  |
|--------|---|
| DCP    | Distance parcourue par le RMA pour déplacer les produits.               |
| DVP    | Distance parcourue par le RMA lors des trajets à vide.                  |
| DTP    | DCP + DVP   |
| CCP    | Consommation d'énergie lors du déplacement des produits.                |
| CVP    | Consommation d'énergie lors des trajets à vide réalisés par le RMA pour |



|     |                                      |
|-----|--------------------------------------|
|     | répondre à la demande de production. |
| CTP | CCP + CTP                            |

Pour le calcul des ICPs concernant le transport des machines et produits, la base de temps utilisée est la seconde. Toutes les secondes, la distance parcourue par le RMA est relevée pour calculer et mettre à jour les six ICPs.

- La durée totale de déplacement (**DTD**) : elle représente la durée mise par le RMA pour déplacer les machines ainsi que l'ensemble des produits.
- Le taux d'utilisation (**TU**) des RMAs : il correspond au degré d'occupation des RMAs. L'occupation des RMAs inclut les déplacements en charge et à vide pour les déplacements des machines et des produits et aussi les temps de chargement et de déchargement des machines et des produits. Plus un RMA est occupé, plus ce taux tend vers 1. Le taux est calculé par l'Équation 5-24.

$$\text{taux d'utilisation} = \frac{\text{temps d'occupation du RMA}}{\text{durée totale de simulation}} \quad \text{Équation 5-24}$$

### 3.2. Analyse et comparaisons des résultats

Pour la comparaison de deux indicateurs clés de performance (ICPs), l'indicateur de comparaison défini dans le chapitre quatre partie 1.4. (équation 4-1) est réutilisée.

Chaque simulation est exécutée cinq fois et la moyenne des résultats est reportée dans les Tableau 5-19, Tableau 5-20 et Tableau 5-21. Le temps (**DTD**) est exprimé en minutes. En premier le modèle d'optimisation est comparé au scénario théorique. En second les indicateurs clés de performance (ICP) des scénarios de simulation avec et sans chemin optimal sont comparés. Pour finir les ICPs des scénarios de simulation avec chemin optimal et avec deux RMA sont comparés.

#### 3.2.1. Modèle d'optimisation et scénario de simulation théorique

Dans cette partie, les résultats du modèle d'optimisation (MO) sont comparés aux résultats du scénario de simulation théorique (ST). Les résultats sont présentés dans le Tableau 5-19. Pour rappel, lorsqu'un écart est négatif, cela signifie que la valeur de référence n'est pas améliorée (plus petite). L'objectif étant de minimiser chaque indicateur clé de performance (ICP), excepté le **TU**. Les résultats du MO sont les valeurs de référence pour la partie 3.2.1..

|   | MO      | ST      | écarts |
|---|---------|---------|--------|
| DTD (min)                                 | -       | 5 099   | -      |
| TU  | -       | 0,99    | -      |
| Distances parcourues par le(s) RMA(s) (m) |         |         |        |
| DVP                                       | 59 665  | 66 786  | -12 %  |
| DCP                                       | 246 265 | 250 126 | -1,6 % |
| DTP                                       | 305 930 | 316 913 | -3,6 % |
| Energies consommées par le(s) RMA(s) (J)  |         |         |        |
| CVP                                       | 181 167 | 181 796 | -0,4 % |
| CCP                                       | 242 048 | 244 958 | -1,2 % |
| CTP                                       | 417 948 | 421 875 | -0,9 % |

Tableau 5-19 : résultats du modèle d'optimisation et du scénario de simulation théorique

Comme le MO ne prend pas en considération le temps, les indicateurs clés de performance (ICP) concernant la durée totale de déplacement (DTD) et le taux d'utilisation du RMA (TU) n'ont pas de signification. L'analyse des résultats se concentre sur les six ICP relatifs aux distances parcourues et la consommation d'énergie. Pour le scénario ST, comme le chargement / déchargement des machines et produits n'est pas pris en compte, tout comme la capacité de la batterie, le taux d'utilisation du RMA est proche de 1.

Nous constatons que pour chaque indicateur clé de performance (ICP), la valeur du scénario de simulation théorique (ST) est supérieure à celle du modèle d'optimisation (MO). Mais seul le DVP engendre un écart important : 12 %. Cela peut être expliqué par le rayon de braquage du RMA. Même s'il est réglé à 0 dans les paramètres d'AnyLogic, n'est pas de zéro mètre dans la simulation. Ainsi lorsque les points R et D sont très proches, le RMA ne peut pas simplement faire marche arrière, mais doit faire une boucle pour faire demi-tour. Le RMA parcourt ainsi une distance plus élevée que la théorie. Ainsi dans l'exemple de la Figure 5-63, au lieu de parcourir une distance de 1 mètre, le RMA parcourt 1,4 mètre. Soit une augmentation de 40 % de la distance parcourue. Les trajets en charge étant imposés, il est plus difficile de se retrouver dans une telle situation. C'est pourquoi ces derniers n'augmentent que de 1,6 % dans la simulation. Par contre les trajets à vide sont optimisés, à l'aide de la résolution d'un problème de transport en plus des modifications potentielles apportées pour rendre le chemin parcouru par le RMA réalisable (trajets à vide réparés). C'est pourquoi la distance parcourue à vide est supérieure dans le scénario de simulation théorique par rapport au modèle d'optimisation.

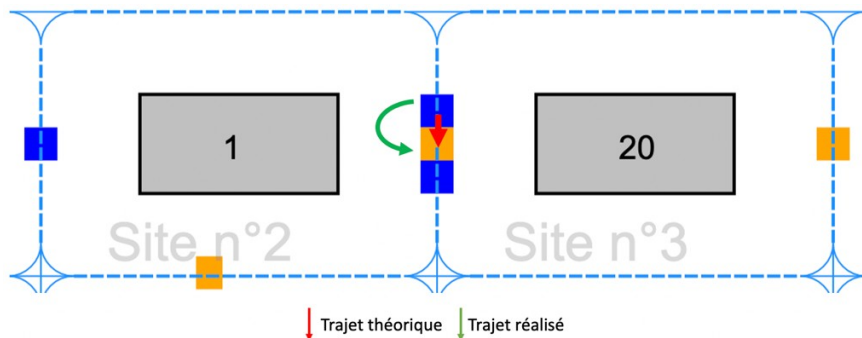


Figure 5-63 : illustration d'un trajet théorique versus un trajet réalisé

Concernant les consommations d'énergie, les hausses constatées sont dues aux mêmes raisons que pour la distance parcourue. Mais comme la part liée à la distance parcourue est moins influente dans l'équation, les augmentations sont plus faibles.

### 3.2.2. Modèles « réalistes »

Pour chaque tableau de résultat qui suit, lorsqu'un écart est négatif, cela signifie que la valeur de référence n'est pas améliorée (plus petite). Les valeurs de référence sont les résultats des indicateurs clés de performance du scénario de simulation avec chemin optimal (SACO).

#### 3.2.2.1. Scénario de simulation avec chemin, parcouru par le RMA, optimal (SACO) versus sans chemin optimal (SSCO)

Pour rappel, dans ces scénarios de simulation, les points de ramassage et de dépôt ne sont plus situés sur les couloirs de déplacement du RMA, mais à l'intérieur des sites, auprès des machines. De plus les temps de chargement et de déchargement des machines et produits sont pris en compte ainsi que la capacité de la batterie du RMA.

L'unique différence entre les deux scénarios de simulation réside dans le chemin, parcouru par le RMA qui est optimal dans le scénario SACO tel que décrit dans la partie 1 de ce chapitre et qui n'est pas optimal dans le scénario SSCO.

Les résultats obtenus pour les huit indicateurs clé de performance sont groupés dans le Tableau 5-20.

|   | SACO    | SSCO    | écarts   |
|---|---------|---------|----------|
| DTD (min)                                 | 32 297  | 35 183  | -8,9 %   |
| TU  | 0,73    | 0,73    | 0 %      |
| Distances parcourues par le(s) RMA(s) (m) |         |         |          |
| DVP                                       | 77 352  | 261 510 | -238,1 % |
| DCP                                       | 260 136 | 261 799 | -0,6 %   |
| DTP                                       | 337 488 | 523 310 | -55,1 %  |
| Energies consommées par le(s) RMA(s) (J)  |         |         |          |
| CVP                                       | 183 024 | 199 488 | -9 %     |
| CCP                                       | 245 632 | 245 989 | -0,2 %   |
| CTP                                       | 428 656 | 445 478 | -3,9 %   |

Tableau 5-20 : résultats des scénarios SACO et SSCO

L'analyse suivante se concentre sur quatre indicateurs.

- La durée totale de déplacement (**DTD**) : l'excédent induit par la non-optimisation du chemin du RMA est d'environ 9 %.
- Le taux d'utilisation du RMA (**TU**) : ce dernier est de 0,73. Ainsi le RMA passe un peu plus d'un quart de son temps à se recharger dans les deux cas.
- La distance parcourue à vide (**DVP**) : la hausse s'explique par la non-optimisation du chemin du RMA. En effet, dans le cas du SSCO, le RMA traite les demandes de déplacement de produits de la machine 1, puis de la machine 2, ... Cette façon de faire est clairement non optimale. Ainsi la distance parcourue est multipliée par 3,2.
- La consommation d'énergie des trajets à vide. Les résultats obtenus dans la partie 4.2.1 du chapitre 4, montraient que la stratégie de reconfiguration à chaque période donnait un meilleur résultat par rapport à la stratégie permettant une seule reconfiguration avec la prise en compte de la première période ou à la stratégie permettant une seule reconfiguration avec la prise en compte des cinq périodes, mais que le gain était seulement de 0,2 %. Or, ici, les résultats montrent un gain significatif de plus de 9 % sur la consommation d'énergie des trajets à vide dans le SACO par rapport au SSCO. Ainsi les trajets à vide du RMA ne sont pas à négliger du point de vue de la consommation d'énergie.

### 3.2.2.2. Scénario de simulation avec un seul RMA (SACO) versus deux RMAs (S2RMA)

Pour rappel dans le scénario de simulation avec deux RMAs, un seul est utilisé dans la reconfiguration de l'atelier (le déplacement des machines) et les deux sont actifs pour le déplacement des produits. Les coûts liés à la mise en place d'un second RMA ne sont pas pris en compte dans cette étude. Les résultats sont groupés dans le Tableau 5-21.

|   | SACO    | S2RMA      | écarts  |
|---|---------|------------|---------|
| DTD (min)                                 | 32 297  | 16 033     | 50,4 %  |
| TU  | 0,73    | 0,73; 0,73 | -       |
| Distances parcourues par le(s) RMA(s) (m) |         |            |         |
| DVP                                       | 77 352  | 76 371     | 1,3 %   |
| DCP                                       | 260 136 | 260 053    | 0,03 %  |
| DTP                                       | 337 488 | 336 426    | 0,3 %   |
| Energies consommées par le(s) RMA(s) (J)  |         |            |         |
| CVP                                       | 183 024 | 183 013    | 0,006 % |
| CCP                                       | 245 632 | 245 834    | -0,08 % |
| CTP                                       | 428 656 | 428 847    | -0,04 % |

Tableau 5-21 : résultats des scénarios SACO et S2RMA

L'ajout d'un second RMA pour déplacer les produits est efficace. En effet avec deux RMAs, l'ensemble des produits est déplacé en moitié moins de temps qu'avec un seul. Cela montre également l'efficacité de notre méthode d'attribution des produits à déplacer entre les deux RMAs. Concernant les autres indicateurs clés de performance, ils sont équivalents.

#### 4. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de simuler différents scénarios dont les données (configuration initiale, trajets en charge et trajets à vide) résultent du modèle d'optimisation présenté dans le chapitre trois. Pour cela, nous mettons en exergue, dans une première partie, les limites des résultats fournis par le modèle d'optimisation (MO) développé dans le chapitre 3. Pour cela le MO est adapté en deux étapes. La première consiste à réparer les trajets à vide si nécessaire. La seconde consiste à déterminer à l'aide d'une heuristique le chemin optimal à réaliser par le RMA.

Dans une seconde partie, les quatre scénarios de simulation sont présentés :

- le scénario de simulation théorique (ST) : ce scénario exploite les résultats du modèle d'optimisation (MO). L'objectif est de retrouver les mêmes valeurs des indicateurs clés de performance (ICP).
- Par la suite, deux scénarios plus réalistes sont construits. Dans ces scénarios, les points de ramassage et de dépôt des machines sont situés à l'intérieur des sites, auprès des machines et non plus sur les couloirs de déplacement du RMA. De plus les temps de chargement et de déchargement des machines et produits sont pris en compte, tout comme la capacité de la batterie du RMA. Il en découle deux scénarios qui sont le scénario de simulation avec chemin, parcouru par le RMA, optimal (SACO) et sans chemin, parcouru par le RMA, optimal (SSCO).
- Un dernier scénario, appelé scénario de simulation avec deux RMAs (S2RMA), est créé. Dans ce scénario, un second RMA est affecté au déplacement des produits en définissant une règle élémentaire de partage des tâches. Il convient de noter qu'un seul des deux robots est affecté au déplacement des machines.

Dans une troisième partie, ces quatre scénarios plus le modèle d'optimisation sont comparés :

- Modèle d'optimisation (MO) et scénario de simulation théorique (ST) : d'après les indicateurs clés de performance, hormis la particularité liée au rayon de braquage du RMA impliquant un écart de 12 % pour la distance parcourue à vide, nous parvenons à retrouver des valeurs similaires avec des écarts inférieurs ou égaux à 1,6%. Ces résultats proches permettent de calibrer le scénario de simulation théorique pour que l'ensemble des autres scénarios aient le même comportement que le modèle d'optimisation.
- Scénarios de simulation avec (SACO) et sans (SSCO) chemin optimal : la comparaison met en évidence les pertes apportées par l'absence d'optimisation du chemin du RMA que ce soit dans la durée totale des déplacements : -8,9 % ; la distance parcourue à vide : -238,1 % ou encore la consommation d'énergie pour les trajets à vide : -9 %.
- Scénarios de simulation avec un RMA (SACO) et avec deux RMAs (S2RMA) : d'après les résultats obtenus, seul le temps, divisé par deux, est impacté par cette modification. Cela montre l'intérêt de l'utilisation d'un second RMA en plus de l'efficacité de notre méthode d'attribution des produits à déplacer.

## Conclusion générale et perspectives

Dans cette thèse, nous avons étudié la problématique de l'implantation (placement) des machines, dans un atelier, dans le contexte d'un système de production reconfigurable, avec un objectif de réduction des distances parcourues, pour le transport des produits et des machines. La contribution du travail de thèse est l'élaboration d'une méthode basée sur la métaheuristique du recuit simulé pour répondre à la problématique. La première partie de cette conclusion synthétise l'ensemble du travail réalisé. La seconde partie présente les perspectives de poursuite de travaux.

### 1. Conclusion générale

Le premier chapitre passe en revue les axes de recherche du domaine des systèmes de production reconfigurables (RMS). Il vise à déterminer les avantages des RMS et leur mise en œuvre dans un atelier. Le chapitre est divisé en cinq parties et présente successivement l'évolution des différents systèmes de production, les caractéristiques des RMS, leurs niveaux de structuration, l'analyse de leurs performances et les champs d'application des RMS.

À la suite de cette étude bibliographique relative au contexte des travaux de thèse, une première limite observée est le nombre réduit de publications associant les RMS et leur implantation ou réimplantation. Une seconde limite concerne, à notre connaissance, l'absence de modification physique de la forme des machines en relation avec la caractéristique de modularité des RMS.

Dans le second chapitre, nous présentons un état de l'art sur les problèmes d'implantation d'atelier. Une première partie introduit le paradigme de l'implantation d'atelier. Une seconde partie caractérise les problèmes d'implantation d'atelier. Pour finir une troisième partie, expose les méthodes de modélisation et d'optimisation des problèmes d'implantation d'atelier impliquant, ou non, des RMS.

À la suite de cet état de l'art, il apparaît qu'à notre connaissance la modélisation de l'implantation de machines, enrichie par leur forme et orientation, n'a pas fait l'objet d'études approfondies associant RMS et problème d'implantation d'atelier.

Dans le troisième chapitre, la méthodologie présentée permet de représenter de manière discrète un atelier de type RMS, constitué de  $N$  sites et  $N$  machines, dont l'implantation, l'orientation et la forme peuvent être modifiées. Ces trois caractéristiques définissent l'étendue des reconfigurations possibles afférentes à notre étude. Le problème d'implantation que nous cherchons à résoudre, est d'abord détaillé, puis modélisé. Il en résulte un modèle mathématique permettant de minimiser la distance parcourue ou l'énergie consommée en fonction de la configuration d'un atelier. Deux extensions sont faites, par rapport au modèle d'origine, issu de la littérature (Guan et al., 2012) et portent sur la prise en compte de l'orientation et de la forme des machines. Enfin, nous détaillons la méthode de résolution qui fait appel au recuit simulé que nous avons adapté au problème d'implantation.

Cette méthodologie utilise les caractéristiques de modularité des RMS pour pouvoir modifier la forme physique des machines ainsi que la mobilité pour pouvoir déplacer les machines. La solution représentant une configuration d'atelier est codée sur trois niveaux qui sont l'implantation, l'orientation et la forme des machines. Cela permet d'optimiser la configuration d'atelier soit sur un seul des trois niveaux, soit sur les trois niveaux les uns après les autres (optimisation séquentielle), soit encore sur les trois niveaux en simultanément.

(optimisation parallèle). L'ensemble du problème de configuration d'atelier peut être planifié sur plusieurs périodes en prenant en compte l'implantation des machines, leurs orientations et leurs formes.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats obtenus. Ainsi, après la présentation du contexte expérimental, les résultats de la méthode de résolution sont comparés avec ceux de l'article de référence. Ensuite, la méthode d'optimisation séquentielle est approfondie. Enfin, la planification sur plusieurs périodes consécutives est réalisée avec le modèle mathématiques jouant avec deux fonctions objectifs à minimiser : la distance parcourue et l'énergie consommée.

Concrètement, l'approche proposée permet d'améliorer les résultats de l'article de référence de manière significative, quel que soit le niveau (implantation, orientation ou forme) de configuration optimisé. Deux méthodes d'optimisation, parallèle et séquentielle, sont comparées et mettent en évidence les meilleurs résultats obtenus avec l'optimisation séquentielle et des gains allant de 4,4% à 8,2%. Ceci est particulièrement singulier, car l'optimisation globale (parallèle) fournit habituellement de meilleurs résultats. Quant à la planification sur plusieurs périodes, trois stratégies de reconfiguration d'atelier sont comparées. La première autorise une seule reconfiguration d'atelier et l'optimisation est faite en fonction de la demande de transport sur la première période de temps uniquement. La seconde autorise une seule reconfiguration d'atelier et l'optimisation prend en compte les demandes de transport sur les 5 périodes de temps. La troisième autorise cinq reconfigurations, une lors de chaque période de temps. La troisième stratégie permet de réduire la distance parcourue, avec un gain de 10% par rapport à la seconde stratégie et 11,6% par rapport à la première stratégie. Avec l'objectif de minimiser l'énergie consommée, les résultats de la troisième stratégie sont toujours meilleurs, mais le gain est négligeable (0,2%) par rapport aux deux premières stratégies de reconfiguration d'atelier.

Le cinquième chapitre présente une étude par simulation d'une configuration optimisée. Cela a permis de valider le modèle mathématique et de réaliser des analyses temporelles plus précises avec, notamment le calcul du taux d'utilisation du RMA. La simulation permet également de se rapprocher de la réalité et de tester d'autres hypothèses. Pour cela, les résultats du modèle mathématique d'optimisation (MO) du chapitre trois sont peaufinés en réparant les trajets à vide si nécessaire et en déterminant à l'aide d'une heuristique le chemin optimal à réaliser par le RMA. Quatre scénarios de simulation sont détaillés puis appliqués avec cette méthodologie, et comparés :

- Comparaison entre modèle d'optimisation (MO) et scénario de simulation théorique (ST) : hormis la particularité liée au rayon de braquage du RMA impliquant un écart de 12 % pour la distance parcourue à vide, nous parvenons à retrouver des valeurs similaires avec des écarts inférieurs ou égaux à 1,6%. Ces résultats proches permettent de calibrer le scénario de simulation théorique pour assurer la validité des autres scénarios.
- Comparaison entre scénarios de simulation avec (SACO) et sans (SSCO) chemin optimal, parcouru par le RMA. Ces deux simulations sont plus proches de la réalité de part la prise en compte des durées de chargement / déchargement des produits et machines, ainsi que la prise en compte de l'autonomie du RMA. La comparaison met en évidence les pertes apportées par l'absence d'optimisation du chemin du RMA que



ce soit dans la durée totale des déplacements (-8,9 %) ; la distance parcourue à vide (238,1 %) ou encore la consommation d'énergie pour les trajets à vide (-9 %).

- Comparaison entre scénarios de simulation avec un RMA (SACO) et avec deux RMAs (S2RMA). Une nouvelle hypothèse testée est la prise en compte de deux RMAs dans le scénario S2RMA. D'après les résultats obtenus, seul le temps total de simulation, divisé par deux, est impacté par cette modification. Cela montre l'intérêt de l'utilisation d'un second RMA en plus de l'efficacité de notre méthode d'attribution des produits à déplacer.

## 2. Perspectives

Pour poursuivre ce travail de thèse, trois axes peuvent être développés en rapport avec la modélisation du problème, l'approche de résolution ou l'approche par simulation.

Concernant le premier axe, la modélisation du problème, d'autres hypothèses peuvent être prises en compte comme :

- La capacité de transport du RMA. Dans notre travail, le RMA ne peut transporter qu'un seul produit. Permettre au RMA de transporter plusieurs produits apporte plus de possibilités dans la planification des trajets et le routage du RMA. Dans notre travail, le RMA alterne entre trajet en charge et trajet à vide. Dans le cas du transport de plusieurs produits, cette alternance dans les trajets peut être revue ce qui conduit à étudier le problème du routage du RMA.
- La dimension des machines. Dans notre travail les machines ont des dimensions identiques, par conséquent, n'importe quelle machine peut être placée sur n'importe quel site. Dans un cas où les machines ont des dimensions différentes, le placement des machines sur les sites se complexifie avec des machines ne pouvant pas être placées sur certains sites.
- L'impossibilité de déplacer certaines machines. Dans certains cas, le coût et le temps nécessaire pour le déplacement de certaines machines sont tellement élevés que ces machines sont réputées immobiles.

Concernant le second axe, l'approche de résolution, en conservant le recuit simulé, différentes recherches de voisins peuvent être essayées ou la combinaison de plusieurs recherches de voisin en fonction de l'amélioration ou non du résultat courant. Le codage pourrait être fortement amélioré de manière à prendre en compte les symétries dans les implantations des machines sur les problèmes de type « matriciels » des instances traitées. Une autre métaheuristique peut être utilisée pour la recherche de la solution initiale.

Concernant le troisième axe relatif à la simulation, l'intelligence artificielle pourrait être utilisée de deux manières différentes, ensemble ou séparément. La première concerne le déplacement du RMA. Ainsi lorsque le RMA rencontre un obstacle l'empêchant de parcourir le plus court chemin entre un point de départ et un point d'arrivée, l'IA permettrait au RMA de contourner l'obstacle, dégradant la distance parcourue, mais permettant de répondre à la demande de transport. La seconde manière consiste dans le placement des machines dans l'atelier. Cela remplacerait le travail de la thèse réalisé avec le Recuit Simulé.

Dans le travail de thèse, la stratégie de recharge de la batterie consiste à laisser le RMA se recharger dès que sa batterie descend sous les 20% de capacité restante, puis dès que les 80% de capacité sont dépassés, le RMA reprend le déplacement des produits. D'autres stratégies de déplacement peuvent être envisagées :

- Placement de la zone de recharge : actuellement elle est située sur la droite de l'atelier, mais un placement au milieu ou plusieurs stations de recharge pourraient donner de meilleurs résultats. Un placement différent permettrait de minimiser la distance parcourue par le RMA pour aller se recharger.
- Stratégie de recharge du RMA : déplacer l'intervalle d'utilisation de la batterie ou alors changer la batterie du RMA au lieu d'attendre sa recharge pourrait permettre d'améliorer les résultats. La stratégie de recharge du RMA pourrait également être améliorée pour minimiser les temps d'arrêt et maximiser son taux d'utilisation.

## Bibliographie

- Aiello, G., Enea, M., Galante, G., 2006. A multi-objective approach to facility layout problem by genetic search algorithm and Electre method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22, 447–455. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.11.002>
- Ali, M., Omar, A.R., Saman, A.M., Othman, I., Halim, I., Rahim, A.H., 2010. QUEST® SIMULATION ANALYSIS FOR FACILITY LAYOUT REDESIGN OF HANDWORK AREA 7.
- Aljuneidi, T., Bulgak, A.A., 2016. A mathematical model for designing reconfigurable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing systems. *Int J Adv Manuf Technol* 87, 1585–1596. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9141-z>
- Amaral, A.R.S., 2013. A parallel ordering problem in facilities layout. *Computers & Operations Research* 40, 2930–2939. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.07.003>
- Ashraf, M., Hasan, F., 2018. Configuration selection for a reconfigurable manufacturing flow line involving part production with operation constraints. *Int J Adv Manuf Technol* 98, 2137–2156. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2361-7>
- Balaji, M., Dinesh, S.N., Raja, S., Subbiah, R., Manoj Kumar, P., 2021. Lead time reduction and process enhancement for a low volume product. *Materials Today: Proceedings* S2214785321079700. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.240>
- Balakrishnan, J., Cheng, C.-H., Wong, K.-F., 2003. FACOPT: a user friendly FACility layout OPTimization system. *Computers & Operations Research* 30, 1625–1641. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00096-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00096-5)
- Battaïa, O., Benyoucef, L., Delorme, X., Dolgui, A., Thevenin, S., 2020. Sustainable and Energy Efficient Reconfigurable Manufacturing Systems, in: Benyoucef, L. (Ed.), *Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation*, Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer International Publishing, Cham, pp. 179–191. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5_9)
- Bazaraa, M.S., 1975. Computerized Layout Design: A Branch and Bound Approach. *A I I E Transactions* 7, 432–438. <https://doi.org/10.1080/05695557508975028>
- Benderbal, H.H., 2018. Développement d'une nouvelle famille d'indicateurs de performance pour la conception d'un système manufacturier reconfigurable (RMS): approches évolutionnaires multicritères 167.
- Bennett, D., 2015. Production Flow Analysis, in: Cooper, C.L. (Ed.), *Wiley Encyclopedia of Management*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1002/9781118785317.weom100062>
- Bezanson, J., Karpinski, S., Shah, V.B., Edelman, A., 2012. Julia: A Fast Dynamic Language for Technical Computing. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1209.5145>
- Birbil, Ş.İ., Fang, S.-C., 2003. An Electromagnetism-like Mechanism for Global Optimization. *Journal of Global Optimization* 25, 263–282. <https://doi.org/10.1023/A:1022452626305>
- Bock, S., Hoberg, K., 2007. Detailed layout planning for irregularly-shaped machines with transportation path design. *European Journal of Operational Research* 177, 693–718. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.11.011>
- Boothroyd, G., Knight, W.A., 1932. *Fundamentals of machining and machine tools*, 3rd ed. ed, Mechanical engineering. Taylor and Francis, Boca Raton.
- Borenstein, D., 1998. ExpertFlex: A knowledge-based system for flexible manufacturing system design. *Production Planning & Control* 9, 598–610. <https://doi.org/10.1080/095372898233858>
- Bortolini, M., Galizia, F.G., Mora, C., 2018. Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend. *Journal of Manufacturing Systems* 49, 93–106.

- <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.005>
- Capawa Fotsoh, E., Mebarki, N., Castagna, P., Berruet, P., 2020. A Classification for Reconfigurable Manufacturing Systems, in: Benyoucef, L. (Ed.), *Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation*, Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer International Publishing, Cham, pp. 11–28. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5_2)
- Carlo, H.J., Patrick Spicer, J., Rivera-Silva, A., 2012. Simultaneous Consideration of Scalable- Reconfigurable Manufacturing System Investment and Operating Costs. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 134, 011003. <https://doi.org/10.1115/1.4005305>
- Chen \*, C.-W., Sha, D.Y., 2005. Heuristic approach for solving the multi-objective facility layout problem. *International Journal of Production Research* 43, 4493–4507. <https://doi.org/10.1080/00207540500056383>
- Chiang, W.-C., Chiang, C., 1998. Intelligent local search strategies for solving facility layout problems with the quadratic assignment problem formulation. *European Journal of Operational Research* 106, 457–488. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00285-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00285-3)
- Choi, Y.-C., Xirouchakis, P., 2015. A holistic production planning approach in a reconfigurable manufacturing system with energy consumption and environmental effects. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 28, 379–394. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.902106>
- Chung, J., Tanchoco, J.M.A., 2010. The double row layout problem. *International Journal of Production Research* 48, 709–727. <https://doi.org/10.1080/00207540802192126>
- Chwif, L., Barretto, M.R.P., Moscato, L.A., 1998. A solution to the facility layout problem using simulated annealing. *Computers in Industry* 36, 125–132. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(97\)00106-1](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(97)00106-1)
- Das, S.K., 1993. A facility layout method for flexible manufacturing systems\*. *International Journal of Production Research* 31, 279–297. <https://doi.org/10.1080/00207549308956725>
- Dilworth, J.B., 1996. *Operations management*, 2nd ed. ed, McGraw-Hill series in management. McGraw-Hill Co, New York.
- Doh, H.-H., Yu, J.-M., Kwon, Y.-J., Lee, D.-H., Suh, M.-S., 2016. Priority Scheduling for a Flexible Job Shop with a Reconfigurable Manufacturing Cell. *Industrial Engineering and Management Systems* 15, 11–18. <https://doi.org/10.7232/iems.2016.15.1.011>
- Dolgui, A., Proth, Jean-Marie, 2010. *Supply Chain Engineering Useful Methods and Techniques*. Springer, London.
- Drira, A., Pierreval, H., Hajri-Gabouj, S., 2013. Design of a robust layout with information uncertainty increasing over time: A fuzzy evolutionary approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 26, 1052–1060. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.12.007>
- Drira, A., Pierreval, H., Hajri-Gabouj, S., 2007. Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control* 31, 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.04.001>
- Dweiri†, F., Meier, F.A., 1996. Application of fuzzy decision-making in facilities layout planning. *International Journal of Production Research* 34, 3207–3225. <https://doi.org/10.1080/00207549608905085>
- ElMaraghy, H.A. (Ed.), 2009. *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer London, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-067-8>
- Emami, S., S. Nookabadi, A., 2013. Managing a new multi-objective model for the dynamic facility layout problem. *Int J Adv Manuf Technol* 68, 2215–2228. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4820-5>

- Fragapane, G., de Koster, R., Sgarbossa, F., Strandhagen, J.O., 2021. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research* S0377221721000217. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019>
- Friedrich, C., 2018. Integrated slicing tree approach for solving the facility layout problem with input and output locations based on contour distance. *European Journal of Operational Research* 15.
- Friedrich, C., Klausnitzer, A., Lasch, R., 2018. Integrated slicing tree approach for solving the facility layout problem with input and output locations based on contour distance. *European Journal of Operational Research* 270, 837–851. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.001>
- Gadalla, M., Xue, D., 2017. Recent advances in research on reconfigurable machine tools: a literature review. *International Journal of Production Research* 55, 1440–1454. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1237795>
- Garcia-Hernandez, L., Salas-Morera, L., Garcia-Hernandez, J.A., Salcedo-Sanz, S., Valente de Oliveira, J., 2019. Applying the coral reefs optimization algorithm for solving unequal area facility layout problems. *Expert Systems with Applications* 138, 112819. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.07.036>
- Ghanei, S., AlGeddawy, T., 2016. A New Model for Sustainable Changeability and Production Planning. *Procedia CIRP* 57, 522–526. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.090>
- Glover, F., 1986. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research* 13, 533–549. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1)
- Groumpos, P.P., 2021. A Critical Historical and Scientific Overview of all Industrial Revolutions. *IFAC-PapersOnLine* 54, 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.492>
- Guan, X., Dai, X., Qiu, B., Li, J., 2012. A revised electromagnetism-like mechanism for layout design of reconfigurable manufacturing system. *Computers & Industrial Engineering* 63, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.01.016>
- Gupta, T., Seifoddini, H.I., 1990. Production data based similarity coefficient for machine-component grouping decisions in the design of a cellular manufacturing system. *International Journal of Production Research* 28, 1247–1269. <https://doi.org/10.1080/00207549008942791>
- Hees, A., Reinhart, G., 2015. Approach for Production Planning in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 33, 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.014>
- Heragu, S.S., 2016. Facilities design.
- Holland, J.H., 1962. Outline for a Logical Theory of Adaptive Systems. *J. ACM* 9, 297–314. <https://doi.org/10.1145/321127.321128>
- Hosseini-Nasab, H., Fereidouni, S., Fatemi Ghomi, S.M.T., Fakhrzad, M.B., 2018. Classification of facility layout problems: a review study. *Int J Adv Manuf Technol* 94, 957–977. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0895-8>
- Hu, S.J., 2013. Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization. *Procedia CIRP* 7, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.002>
- Hungerländer, P., Anjos, M.F., 2015. A semidefinite optimization-based approach for global optimization of multi-row facility layout. *European Journal of Operational Research* 245, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.02.049>
- Hüttemann, G., Buckhorst, A.F., Schmitt, R.H., 2019. Modelling and Assessing Line-less

- Mobile Assembly Systems. *Procedia CIRP* 81, 724–729.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.184>
- İlhan, İ., 2021. An improved simulated annealing algorithm with crossover operator for capacitated vehicle routing problem. *Swarm and Evolutionary Computation* 64, 100911. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100911>
- Izadinia, N., Eshghi, K., Salmani, M.H., 2014. A robust model for multi-floor layout problem. *Computers & Industrial Engineering* 78, 127–134.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.09.023>
- Jankovits, I., Luo, C., Anjos, M.F., Vannelli, A., 2011. A convex optimisation framework for the unequal-areas facility layout problem. *European Journal of Operational Research* 214, 199–215. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.04.013>
- Ketfi, A., n.d. Une Approche Générique pour la Reconfiguration Dynamique des Applications à base de Composants Logiciels 206.
- Kim, J.-G., Kim, Y.-D., 2000. Layout planning for facilities with fixed shapes and input and output points. *International Journal of Production Research* 38, 4635–4653.  
<https://doi.org/10.1080/00207540050205550>
- Kim, J.-Y., Kim, Y.-D., 1995. Graph theoretic heuristics for unequal-sized facility layout problems. *Omega* 23, 391–401. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(95\)00016-H](https://doi.org/10.1016/0305-0483(95)00016-H)
- Kim, M., Chae, J., 2021. A monarch butterfly optimization for an unequal area facility layout problem. *Soft Comput* 25, 14933–14953. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06076-7>
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., 1983. Optimization by Simulated Annealing. *Science* 220, 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Klausnitzer, A., Lasch, R., 2019. Optimal facility layout and material handling network design. *Computers & Operations Research* 103, 237–251.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.11.002>
- Koopmans, T.C., Beckmann, M., 1957. Assignment Problems and the Location of Economic Activities. *Econometrica* 25, 53. <https://doi.org/10.2307/1907742>
- Koren, Y., 2010. The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems, Wiley series in systems engineering and management. Wiley, Hoboken, N.J.
- Koren, Y., 1983. Computer control of manufacturing systems. McGraw-Hill, New York.
- Koren, Y., Gu, X., Guo, W., 2018. Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Front. Mech. Eng.* 13, 121–136. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>
- Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G., Van Brussel, H., 1999. Reconfigurable Manufacturing Systems. *CIRP Annals* 48, 527–540.  
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63232-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63232-6)
- Koren, Y., Shpitalni, M., 2010. Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 29, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.01.001>
- Koren, Y., Wang, W., Gu, X., 2017. Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 55, 1227–1242. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1145821>
- Kothari, R., Diptesh Ghosh, 2013. Tabu search for the single row facility layout problem using exhaustive 2-opt and insertion neighborhoods. *European Journal of Operational Research* 8.
- Kovács, G., 2019. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. <https://doi.org/10.24425/BPASTS.2019.129653>
- Kulturel-Konak, S., Konak, A., 2015. A large-scale hybrid simulated annealing algorithm for cyclic facility layout problems. *Engineering Optimization* 47, 963–978.  
<https://doi.org/10.1080/0305215X.2014.933825>

- Kumar, P.M., Anandkumar, R., Sudarvizhi, D., Prakash, K.B., Mylsamy, K., 2019. Experimental investigations on thermal management and performance improvement of solar PV panel using a phase change material. Presented at the INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS, MANUFACTURING AND MACHINING 2019, Tamilnadu, India, p. 020023. <https://doi.org/10.1063/1.5117935>
- Kusiak, A., Heragu, S.S., 1987. The facility layout problem. *European Journal of Operational Research* 29, 229–251. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(87\)90238-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(87)90238-4)
- Lameche, K., Najid, N.M., Castagna, P., Kouiss, K., 2017. Modularity in the design of reconfigurable manufacturing systems. *IFAC-PapersOnLine* 50, 3511–3516. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.939>
- Latifi, S.E., Mohammadi, E., Khakzad, N., 2017. Process plant layout optimization with uncertainty and considering risk. *Computers & Chemical Engineering* 106, 224–242. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.022>
- Lawler, E.L., 1963. The Quadratic Assignment Problem. *Management Science* 9, 586–599. <https://doi.org/10.1287/mnsc.9.4.586>
- Le-Anh, T., De Koster, M.B.M., 2006. A review of design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research* 171, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.036>
- Lee, G.-C., Kim, Y.-D., 2000. Algorithms for adjusting shapes of departments in block layouts on the grid-based plane 12.
- Lee, K.-H., Lee, J.Y., Kim, K.-Y., Noh, S.-D., Kang, S.-J., Lee, D.-M., 2017. An Integrated Framework for Simulation and Analysis of Manual Assembly Process, in: Ríos, J., Bernard, A., Bouras, A., Fofou, S. (Eds.), *Product Lifecycle Management and the Industry of the Future*, IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer International Publishing, Cham, pp. 162–173. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72905-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72905-3_15)
- Liu, M., An, L., Zhang, J., Chu, F., Chu, C., 2019. Energy-oriented bi-objective optimisation for a multi-module reconfigurable manufacturing system. *International Journal of Production Research* 57, 5974–5995. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1556413>
- Madhusudanan Pillai, V., Hunagund, I.B., Krishnan, K.K., 2011. Design of robust layout for Dynamic Plant Layout Problems. *Computers & Industrial Engineering* 61, 813–823. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.05.014>
- Maganha, I., Silva, C., Ferreira, L.M.D.F., 2018. Understanding reconfigurability of manufacturing systems: An empirical analysis. *Journal of Manufacturing Systems* 48, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.07.004>
- Manoj Kumar, P., Anandkumar, R., Sudarvizhi, D., Mylsamy, K., Nithish, M., 2020a. Experimental and Theoretical Investigations on Thermal Conductivity of the Paraffin Wax using CuO Nanoparticles. *Materials Today: Proceedings* 22, 1987–1993. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.164>
- Manoj Kumar, P., Mylsamy, K., 2019. Experimental investigation of solar water heater integrated with a nanocomposite phase change material: Energetic and exergetic approach. *J Therm Anal Calorim* 136, 121–132. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7937-9>
- Manoj Kumar, P., Mylsamy, K., Prakash, K.B., Nithish, M., Anandkumar, R., 2021. Investigating thermal properties of Nanoparticle Dispersed Paraffin (NDP) as phase change material for thermal energy storage. *Materials Today: Proceedings* 45, 745–750. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.800>
- Manoj Kumar, P., Mylsamy, K., Saravanakumar, P.T., 2020b. Experimental investigations on thermal properties of nano-SiO<sub>2</sub>/paraffin phase change material (PCM) for solar thermal energy storage applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization,*

- and Environmental Effects 42, 2420–2433.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607942>
- Masmoudi, O., Delorme, X., Gianessi, P., 2019. Job-shop scheduling problem with energy consideration. *International Journal of Production Economics* 216, 12–22.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.021>
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., Teller, E., 1953. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics* 21, 1087–1092. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
- Moseley, L., 1963. A rational design theory for planning buildings based on the analysis and solution of circulation problems. *The Architects' Journal*, 11 September, 525± 537.
- Moslemipour, G., Lee, T.S., Loong, Y.T., 2017. Performance Analysis of Intelligent Robust Facility Layout Design. *Chin. J. Mech. Eng.* 30, 407–418.  
<https://doi.org/10.1007/s10033-017-0073-9>
- Moslemipour, G., Lee, T.S., Rilling, D., 2012. A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems. *Int J Adv Manuf Technol* 60, 11–27. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3614-x>
- Murray, C.C., Smith, A.E., Zhang, Z., 2013. An efficient local search heuristic for the double row layout problem with asymmetric material flow. *International Journal of Production Research* 51, 6129–6139. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.803168>
- Niroomand, S., Hadi-Vencheh, A., Şahin, R., Vizvári, B., 2015. Modified migrating birds optimization algorithm for closed loop layout with exact distances in flexible manufacturing systems. *Expert Systems with Applications* 42, 6586–6597.  
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.040>
- Palubeckis, G., 2017. A variable neighborhood search and simulated annealing hybrid for the profile minimization problem. *Computers & Operations Research* 87, 83–97.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.002>
- Palubeckis, G., 2015. Fast local search for single row facility layout. *European Journal of Operational Research* 15.
- Peng, Y., Zeng, T., Fan, L., Han, Y., Xia, B., 2018. An Improved Genetic Algorithm Based Robust Approach for Stochastic Dynamic Facility Layout Problem. *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2018, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2018/1529058>
- Pérez-Gosende, P., Mula, J., Díaz-Madroño, M., 2021. Facility layout planning. An extended literature review. *International Journal of Production Research* 59, 3777–3816.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1897176>
- Pérez-Gosende, P., Mula, J., Díaz-Madroño, M., 2020. Overview of Dynamic Facility Layout Planning as a Sustainability Strategy. *Sustainability* 12, 8277.  
<https://doi.org/10.3390/su12198277>
- Pourvaziri, H., Pierreval, H., 2021. Combining metaheuristic search and simulation to deal with capacitated aisles in facility layout. *Neurocomputing* 452, 443–449.  
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.05.116>
- Pourvaziri, H., Pierreval, H., Marian, H., 2021. Integrating facility layout design and aisle structure in manufacturing systems: Formulation and exact solution. *European Journal of Operational Research* 290, 499–513. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.012>
- Proth, J.-M., 1992. *Conception et gestion des systèmes de production, Gestion*. Presses universitaires de France, Paris.
- Rai, R.S., Jayswal, S., 2018. Design and Optimization of Loop Layout in Flexible Manufacturing System using Particle Swarm Optimization 9, 5.
- Redondo-Iglesias, E., n.d. Étude du vieillissement des batteries lithium-ion dans les applications “véhicule électrique”: Combinaison des effets de vieillissement calendaire et de cyclage.



- Sahni, S., Gonzalez, T., 1976. P-Complete Approximation Problems. *J. ACM* 23, 555–565. <https://doi.org/10.1145/321958.321975>
- Samarghandi, H., Eshghi, K., 2010. An efficient tabu algorithm for the single row facility layout problem. *European Journal of Operational Research* 8.
- Schönemann, M., Herrmann, C., Greschke, P., Thiede, S., 2015. Simulation of matrix-structured manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 37, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.09.002>
- Shayan \*, E., Chittilappilly, A., 2004. Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure. *International Journal of Production Research* 42, 4055–4067. <https://doi.org/10.1080/00207540410001716471>
- Singh, D., Ingole, S., 2019. Multi-objective facility layout problems using BBO, NSBBO and NSGA-II metaheuristic algorithms. *10.5267/j.ijiec* 239–262. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2018.6.006>
- Spena, P.R., Holzner, P., Rauch, E., Vidoni, R., Matt, D.T., 2016. Requirements for the Design of Flexible and Changeable Manufacturing and Assembly Systems: A SME-survey. *Procedia CIRP* 41, 207–212. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.018>
- Suhadak, N.S., Amit, N., Ali, M.N., 2015. Facility Layout for SME Food Industry via Value Stream Mapping and Simulation. *Procedia Economics and Finance* 31, 797–802. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01169-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01169-7)
- Tompkins, J.A. (Ed.), 2010. *Facilities planning*, 4th ed. ed. J. Wiley, Hoboken, NJ.
- Vasanthaseelan, S., Manoj Kumar, P., Anandkumar, R., Hari Ram, K., Subbiah, R., Suresh, V., Abishek, A.S., Anith, R., Aravinth, P., Balaji, S.V., 2021. Investigation on solar water heater with different types of turbulators. *Materials Today: Proceedings* 47, 5203–5208. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.530>
- Wang, S., Zuo, X., Liu, X., Zhao, X., Li, J., 2015. Solving dynamic double row layout problem via combining simulated annealing and mathematical programming. *Applied Soft Computing* 37, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.08.023>
- Welgama, P.S., Gibson, P.R., 1993. A construction algorithm for the machine layout problem with fixed pick-up and drop-off points. *International Journal of Production Research* 31, 2575–2589. <https://doi.org/10.1080/00207549308956884>
- Wemmerlov, U., Johnson, D.J., 1997. Cellular manufacturing at 46 user plants: Implementation experiences and performance improvements. *International Journal of Production Research* 35, 29–49. <https://doi.org/10.1080/002075497195966>
- Yang, T., Kuo, C., 2003. A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem. *European Journal of Operational Research* 147, 128–136. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00251-5)
- Yelles-Chaouche, A.R., Gurevsky, E., Brahimi, N., Dolgui, A., 2020. Reconfigurable manufacturing systems from an optimisation perspective: a focused review of literature. *International Journal of Production Research* 1–19. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1813913>
- Yu, J.-M., Doh, H.-H., Kim, H.-W., Kim, J.-S., Lee, D.-H., Nam, S.-H., 2012. Iterative algorithms for part grouping and loading in cellular reconfigurable manufacturing systems. *Journal of the Operational Research Society* 63, 1635–1644. <https://doi.org/10.1057/jors.2012.9>
- Zhang, J., Khalgui, M., Boussahel, W.M., Frey, G., Hon, C., Wu, N., Li, Z., 2015. Modeling and Verification of Reconfigurable and Energy-Efficient Manufacturing Systems. *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2015, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2015/813476>
- Zhao, Y., 2011. Optimal operation of panel furniture reconfigurable manufacturing system based on TCPN and GA, in: *Proceedings of 2011 International Conference on*

Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Presented at the Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), IEEE, Harbin, Heilongjiang, China, pp. 2179–2182. <https://doi.org/10.1109/EMEIT.2011.6023471>

# Annexes

## Projet PORTAGE

Cette annexe présente succinctement le projet PORTAGE dont a fait partie l'équipe productive composée des membres de la thèse (doctorant et encadrants). Dans une première partie l'entreprise EZ-Wheel est présentée. Dans une seconde partie, le projet PORTAGE est présenté. Dans une troisième partie, une portion du travail réalisée par l'équipe productive est présenté. Pour finir, le résultat produit par le projet est présenté.

### *1. EZ-Wheel*

EZ-Wheel SAS<sup>11</sup> est une entreprise de technologie innovante fondée en 2009. Localisée à Angoulême en Nouvelle-Aquitaine (France), la société développe une gamme industrielle de solutions de traction électrique (roues) dédiées aux engins de manutention et de mobilité douce.

### *2. Projet PORTAGE*

Le projet PORTAGE est un consortium de 3 entreprises (AKKA, IDRE et EZ-Wheel) et de 2 équipes du laboratoire de l'IMS (cognitive et productive) dont l'objectif est le développement d'un robot mobile autonome à destination de l'industrie. Le rôle d'un robot mobile autonome est de déplacer des objets d'un point à un autre sans intervention humaine.

### *3. Rôle de l'équipe productive*

L'équipe productive est impliquée dans deux sous-projets. L'objectif du premier sous-projet était de réaliser une analyse de flux du site industriel choisi par le consortium. Cependant, compte tenu de la situation sanitaire au cours des années 2020 et 2021, cette analyse n'a pas pu être réalisée. Le second sous-projet concerne l'évaluation et l'impact de la mise en place de la solution développée dans le cadre du projet PORTAGE. Dans ce sous-projet, 2 tâches étaient à réaliser :

- la première consistait à réaliser une démonstration sur le site industriel,
- la seconde consistait à réaliser l'évaluation et l'étude d'impact de la solution développée.

Concernant la première tâche, compte tenu du contexte sanitaire, la démonstration n'a pas pu être faite sur le site industriel, mais dans les locaux d'Ez-Wheel en décembre 2021.

Concernant la seconde tâche, l'équipe productive n'ayant pas pu réaliser d'analyse de flux. Deux scénarios fictifs ont été créés : le premier ne comportant pas de RMA et le second comportant un RMA. La comparaison de ces deux scénarios met en avant l'intérêt de l'utilisation d'un robot mobile que ce soit dans l'économie de distance parcourue par les opérateurs ou la hausse de la productivité.

---

<sup>11</sup> <https://www.ez-wheel.com/fr>

#### 4. Résultat

Le résultat du projet PORTAGE est la création d'un kit de développement pour AGV et AMR commercialisé par EZ-Wheel<sup>12</sup> (Figure 0-64).

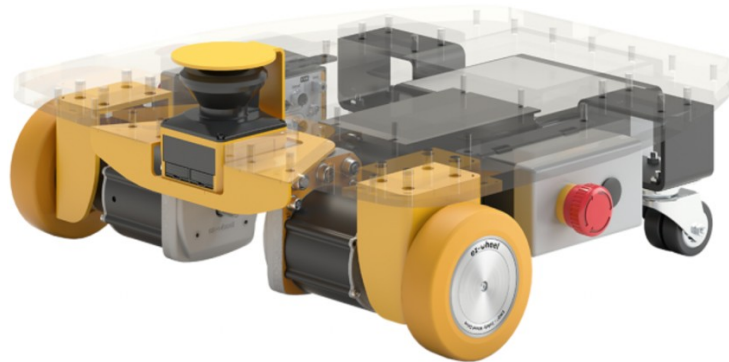


Figure 0-64 : illustration du kit de développement

---

<sup>12</sup> <https://www.ez-wheel.com/fr/kit-de-developpement-pour-agvamr>

## Recuit simulé

Le RS a été introduit au début des années 80 par Kirkpatrick et al., 1983. Ce concept a été inspiré par une analogie entre le processus de recuit physique des solides et la résolution de grands problèmes d'optimisation combinatoire. En physique de la matière condensée, le recuit est connu comme un processus thermique permettant d'obtenir des états de basse énergie d'un solide dans un bain de chaleur. Le processus se compose des deux étapes suivantes (Kirkpatrick et al., 1983) :

- augmenter la température du bain de chaleur jusqu'à une valeur maximale à laquelle le solide fond ;
- diminuer progressivement la température du bain de chaleur jusqu'à ce que les particules se disposent dans l'état fondamental du solide.

Dans la phase liquide, toutes les particules se disposent de manière aléatoire, alors que dans l'état fondamental du solide, les particules sont disposées en un réseau hautement structuré, pour lequel l'énergie correspondante est minimale. L'état fondamental du solide n'est obtenu que si la valeur maximale de la température est suffisamment élevée et si le refroidissement est suffisamment lent. Dans le cas contraire, le solide sera gelé dans un état métastable plutôt que dans le véritable état fondamental. Plus la température baisse, plus le solide se fige dans une structure finale.

### 1. Condition de Metropolis

Metropolis et al. (1953) ont introduit un algorithme simple pour simuler l'évolution d'un solide dans un bain de chaleur vers l'équilibre thermique. L'algorithme est basé sur les techniques de Monte-Carlo (Binder, 1978) et génère une séquence d'états du solide de la manière suivante. Étant donné un état courant  $i$  du solide avec une énergie  $E_i$ , un état suivant  $j$  est généré en appliquant un mécanisme de perturbation qui transforme l'état courant en un état suivant, par exemple par le déplacement d'une particule. L'énergie de l'état suivant est  $E_j$ . Si la différence d'énergie,  $E_j - E_i$ , est inférieure ou égale à zéro, l'état  $j$  est accepté comme état actuel. Si la différence d'énergie est supérieure à zéro, alors l'état  $j$  est accepté avec une probabilité donnée par l'équation suivante (Équation 0-25).

$$\text{aléa}(0;1) < \exp\left(\frac{E_i - E_j}{k_B T}\right) \quad \text{Équation 0-25}$$

Où  $T$  désigne la température du bain de chaleur et  $k_B$  est une constante physique appelée constante de Boltzmann. La règle d'acceptation décrite ci-dessus est connue sous le nom de critère de Métropolis et l'algorithme qui l'accompagne est connu sous le nom d'algorithme de Métropolis.

### 2. Paramètres du RS et pseudocode

L'algorithme du RS possède 5 paramètres qui sont : la température ( $T$ ), le nombre d'itérations à température constante ( $N$ ), le nombre d'itérations total ( $n$ ), le temps de simulation ( $t$ ), le coefficient d'évolution de la température ( $r$ ).

La Figure 0-65 représente le pseudocode du RS. La signification des quatre fonctions incluses dans la procédure du recuit est la suivante : la fonction « Initialisation\_des\_paramètres » initialise la température de départ (T), le nombre d'itérations pour chaque température (N), le coefficient de baisse de la température (r).

La fonction « Recherche\_de\_voisin » sélectionne une solution dans le voisinage de la solution courante.

La fonction « f » calcule une valeur pour une solution donnée.

La fonction « criteres\_d\_arrets » décide si l'algorithme poursuit la recherche de solution ou non.

La fonction « Afficher » affiche le meilleur couple CA (x) et résultat de la fonction objectif (f(x)) trouvé par le RS.

Dans le code présenté ci-dessous, le fait de minimiser la solution se traduit par le fait de conserver la solution si celle-ci est inférieure à la solution précédemment conservée sinon la solution doit vérifier la condition de Metropolis pour décider de sa conservation.

```

Debut recuit simule
  Initialisation_des_parametres(T, N, r)
  meilleur_x = x
  meilleur_f = fx
  Tant que Criteres_d_arrets() est faux
    Pour i allant de 1 a N par pas de 1 faire
      x' = Recherche_de_voisin(x)
      fx' = f(x')
      df = fx' - fx
      Si (df < 0 ou alea(0; 1) < e-df/kBT)
        x = x'
        fx = fx'
      fin si
      Si (fx' < meilleur_f)
        meilleur_x = x'
        meilleur_f = fx'
      fin si
    Fin pour
    T = T * r
  Fin tant que
  Afficher (meilleur_x, meilleur_f)
Fin recuit simule

```

Figure 0-65 : pseudocode du recuit simulé

Comme déjà mentionnée, une caractéristique essentielle du recuit simulé est que, tout en recherchant des améliorations du coût des solutions, il accepte également temporairement des détériorations en fonction de la température. Initialement, pour de grandes valeurs de la température (T), beaucoup de détériorations sont acceptées ; au fur et à mesure que la température diminue, les détériorations seront acceptées avec une probabilité de plus en plus faible et, finalement, lorsque la valeur de la température s'approche de 0, aucune détérioration ne sera acceptée. Ceci permet à l'algorithme de ne pas s'enfermer trop rapidement dans un optimum local. Cette caractéristique signifie que le recuit simulé, contrairement à l'amélioration itérative, peut échapper aux minima locaux tout en présentant les caractéristiques favorables de l'amélioration itérative, c'est-à-dire la simplicité et l'applicabilité générale.

La probabilité d'accepter les détériorations est mise en œuvre par l'Équation 0-25 avec un nombre aléatoire généré à partir d'une distribution uniforme sur l'intervalle [0,1]. En outre, il convient de préciser que la vitesse de convergence de l'algorithme est déterminée par le choix des paramètres T, N, r.

### *3. Recherche de voisins et critères d'arrêts*

Pour une température donnée, à chaque itération, l'algorithme cherche un nouveau voisin (une nouvelle solution) pour le comparer à la valeur de la solution courante. Il est également important dans le choix du nouveau voisin de faire appel au hasard afin de s'assurer de ne pas tomber dans des suites de solutions qui se répètent.

Différents critères d'arrêts peuvent être utilisés dans l'algorithme du RS basé sur les différents paramètres :

- nombre maximal d'itérations,
- temps de calcul maximal,
- nombre d'itérations sans améliorer la solution ou alors lorsque l'amélioration est inférieure à un seuil décidé à l'avance,
- valeur de la température.

## Plan de l'atelier (AnyLogic)

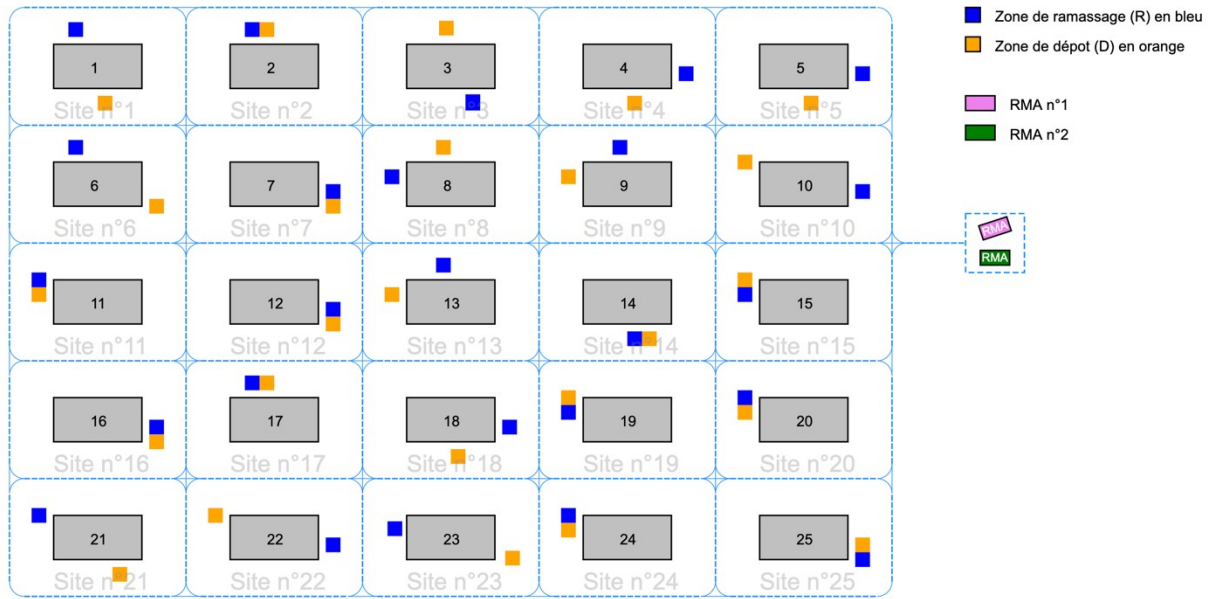


Figure 0-66 : plan de l'atelier (simulation avec deux RMA)

## Vue des processus logiques (AnyLogic)

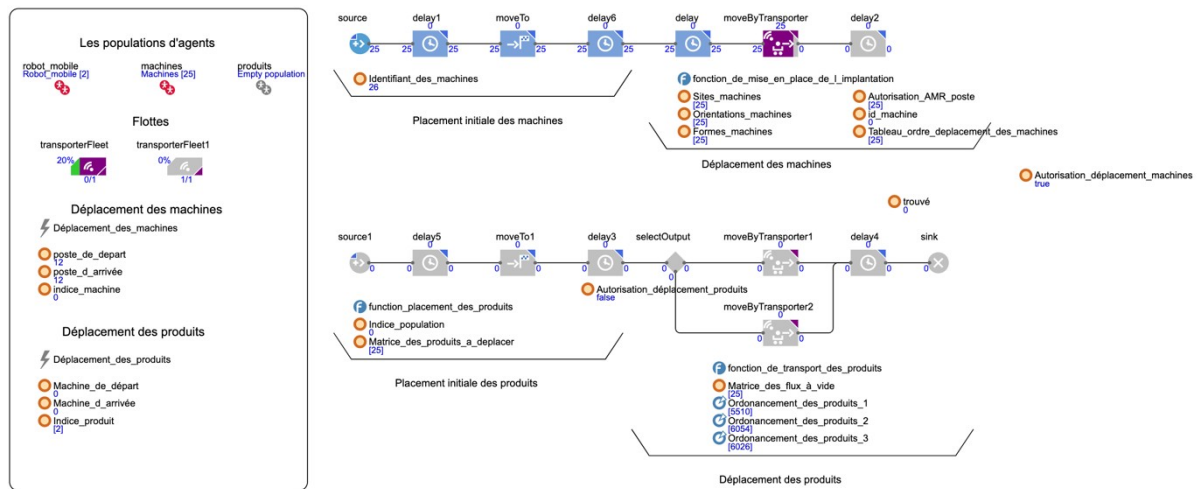


Figure 0-67: vue de la modélisation par événements discrets (simulation avec deux RMA)