

**HEC MONTRÉAL**

**Étude comparative des aménagements fonctionnel et distribué**

**par**

**Marie-Eve Lévesque**

**Sciences de la gestion**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention  
du grade de maîtrise ès sciences  
(M. Sc.)*

Septembre 2012  
© Marie-Eve Lévesque, 2012



## Table des matières

1. Problématique	1
2. Revue de littérature	3
2.1 Introduction	3
2.2 Les types d'aménagement	4
2.2.1 Les aménagements traditionnels	4
2.2.2 L'aménagement cellulaire	9
2.2.3 Les aménagements de nouvelle génération	12
2.3 La construction d'un aménagement	15
2.3.1 La méthode aléatoire	15
2.3.2 La méthode probabiliste	16
2.3.3 La méthode d'optimisation	17
2.4 La construction des routes de production en aménagement distribué	19
2.5 Études similaires	20
2.6 Les paramètres inclus dans les modèles	24
2.7 Conclusion	26
3. Méthodologie	27
3.1 Introduction	27
3.2 La simulation	27
3.3 Le cadre méthodologique	28
3.3.1 La construction des aménagements	28
3.3.2 Le calcul des distances entre deux postes de travail	34
3.3.3 Le nombre d'essais	36
3.4 Conclusion	36

4. Description du simulateur	37
4.1 Introduction	37
4.2 La construction des aménagements	37
4.3 Les contextes de production, le nombre de commandes et l'exécution du programme	39
4.4 Le calcul des distances totales	40
4.5 Conclusion	40
5. Résultats et analyse	41
5.1 Introduction	41
5.2 Présentation des résultats	41
5.2.1 Sommaire des statistiques descriptives	42
5.2.2 Présentation des écarts de distances entre les aménagements fonctionnel et distribué	45
5.2.3 Sommaire de l'influence des paramètres secondaires	46
5.2.4 Résultats statistiquement significatifs	50
5.3 Comparaison avec la littérature	52
5.4 Conclusion	53
6. Conclusion	56
6.1 Sommaire	56
6.2 Contributions de la recherche	58
6.3 Limites de la recherche	60
6.4 Avenues de recherche	62
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>63</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Schéma d'aménagement fixe	5
Tableau 1 : Caractéristiques de l'aménagement fixe	6
Figure 2 : Schéma d'aménagement produit	6
Tableau 2 : Caractéristiques de l'aménagement produit	7
Figure 3 : Schéma d'aménagement fonctionnel	8
Tableau 3 : Caractéristiques de l'aménagement fonctionnel	9
Figure 4 : Schéma d'aménagement cellulaire	10
Tableau 4 : Caractéristiques de l'aménagement cellulaire	11
Figure 5 : Schéma d'aménagement distribué	14
Tableau 5 : Caractéristiques de l'aménagement distribué	14
Figure 6 : Échiquier reproduit de Askin et al. (1999)	16
Figure 7 : Aménagement de Benjaafar et Sheikhzadeh (2000)	18
Tableau 6 : Paramètres relatifs à la demande	25

Tableau 7 : Paramètres relatifs au processus	25
Tableau 8 : Paramètres relatifs aux ressources	25
Tableau 9 : Paramètres relatifs aux départements	26
Figure 8 : Méthode de numérotation des postes de travail	31
Figure 9 : Méthode de répartition des postes de travail pour l'aménagement fonctionnel	31
Figure 10 : Méthode de répartition des postes de travail pour l'aménagement distribué	32
Tableau 10 : Paramètres de la simulation	34
Figure 11 : Calcul des distances entre deux postes de travail	35
Tableau 11 : Résultats pour les aménagements fonctionnel avec tri	42
Tableau 12 : Résultats pour les aménagements fonctionnels sans tri	43
Tableau 13 : Résultats pour les aménagements distribués avec tri	43
Tableau 14 : Résultats pour les aménagements distribués sans tri	43
Tableau 15 : Ampleur des écarts (bruts et relatifs) des distances en contexte d'utilisation du tri	45
Tableau 16 : Ampleur des écarts (bruts et relatifs) des distances en contexte de séquence de tâches aléatoire (sans tri)	46

Tableau 17 : Exemple de représentation des distances par tâche pour un aménagement distribué sans utilisation du tri	47
Graphique 1 : Comparaison des aménagements selon le format	48
Tableau 18 : Interprétation des seuils expérimentaux	50
Tableau 19 : Seuils expérimentaux des résultats de la simulation	51

## Remerciements

Un mémoire est un travail individuel qui ne peut se faire seul. Je veux donc exprimer ma gratitude et ma reconnaissance envers les personnes qui ont participé à ce projet.

Merci à ...

... mon amoureux, Alexandre Gagnon, sans qui ce mémoire n'aurait pu voir le jour. Tu as été ma source d'inspiration, de motivation, mon soutien moral, technique et financier. Merci d'avoir cru en moi et souvent plus que moi-même, merci de m'avoir aidé pour la programmation et surtout d'avoir été si patient.

... mon professeur, Monsieur Federico Pasin qui a été un directeur hors-pair. J'ai grandement apprécié votre disponibilité, le partage d'idées, votre patience et votre compréhension.

... mon fils, Maxim, d'avoir intimement participé à ce projet. Tu as été ma source de motivation car maman a ainsi voulu te montrer la persévérance et l'importance d'aller jusqu'au bout.

... mes parents, amis et compagnons d'armes François Chénard, François Lebeuf, Guillaume Vallée et Laurence Beaulieu pour les doutes, la pression et les encouragements à me voir terminer.

À ma fille Elizabeth,  
qui naîtra peu après ce projet

## Chapitre 1

### Problématique

La réalité manufacturière telle que la connue et même conçue Henri Ford avec le modèle T est révolue. Les entreprises ne peuvent plus se permettre de fabriquer un seul produit standard pour une longue période de temps. Les habitudes des consommateurs les poussent désormais à produire une grande variété de produits à renouveler fréquemment. L'augmentation de la cadence dans les successions de cycles de vie des produits forcent également les entreprises à rendre leur développement très rapide (time-to-market).

Ce changement a de nombreuses répercussions sur la variété de produits que doit fabriquer l'entreprise à un instant donné, ce qui est encore plus vrai pour un long horizon de temps. Pour faire face à cette variété, plusieurs entreprises, notamment une majorité de petits fournisseurs de grands donneurs d'ordres, optent traditionnellement pour un aménagement fonctionnel.

Celui-ci se caractérise par un regroupement en atelier des activités de même nature (ex. atelier de coupe, atelier de peinture, atelier de finition, etc.). Cet aménagement offre une flexibilité au niveau des opérations, mais est inefficent du point de vue logistique en raison, notamment, des nombreux déplacements subis par les produits en cours de fabrication. Pour combler cette lacune, les auteurs Benjaafar, Heragu et Irani (2002) ont récemment proposé l'aménagement distribué. Il s'agit d'une désagrégation des ateliers fonctionnels en distribuant les postes identiques dans l'espace global disponible plutôt que de les regrouper ensemble.

Cette façon de faire repose sur la disponibilité d'un système d'information sophistiqué qui permet la génération dynamique des cheminements des produits. Elle a l'avantage, selon les concepteurs de ce type d'aménagement, de diminuer les coûts logistiques (distances parcourues) liés à la fabrication de produits variés tout en préservant la flexibilité. S'il est évident que ce nouveau type d'aménagement offre une flexibilité de même nature à celle d'un aménagement fonctionnel, en effet, il ne s'agit ici que de répartir autrement les différents postes de travail des ateliers fonctionnels en les distribuant dans l'espace plutôt que de les regrouper. Pour l'instant, on en connaît encore peu sur l'ampleur de la réduction des déplacements des produits. La mesure de celle-ci, selon différents contextes (ex. forme de l'aménagement, nombre de tâches à réaliser pour fabriquer un produit, nombre de postes de travail, etc.), est donc l'objectif que nous nous sommes fixés dans la présente étude, laquelle sera basée sur des simulations, une méthodologie bien adaptée à cette question de recherche. Les chapitres suivants comprendront la revue de la littérature et la méthodologie. À ceux-ci suivront la présentation et l'analyse de ces résultats ainsi que la conclusion.

## Chapitre 2

### Revue de littérature

#### 2.1 Introduction

Construire un aménagement consiste à répartir des unités dans un espace géographiquement limité en tenant compte des ressources disponibles et des contraintes en présence. Pour les entreprises, l'aménagement se décline en plusieurs niveaux de décision en partant de la localisation du bâtiment, en passant par la détermination de la géométrie générale des lieux et de celle de chacun des départements et en allant jusqu'au choix de l'emplacement et du design de chacun des postes de travail. Pour notre part, nous nous focalisons ici surtout sur l'avant-dernier aspect. Il est donc question de trouver la meilleure façon de positionner chacun des postes de travail à l'intérieur d'un lieu aux formes définies. Cette meilleure façon dépend en fait des objectifs poursuivis.

Au fil du temps, les changements dans la nature de ces objectifs ont poussé les chercheurs et les gestionnaires à innover pour trouver des aménagements capables de répondre aux nouvelles réalités de l'industrie. Il s'est donc constitué une gamme de types d'aménagement pour répondre à des besoins tout aussi différents. Parmi ces types d'aménagement, on retrouve les aménagements fonctionnel et distribué, lesquels sont au cœur de notre recherche. Toutefois, avant de focaliser sur ceux-ci, nous faisons un pas en arrière dans le souci de donner un portrait général des aménagements. Ainsi, dans le présent chapitre, nous présentons différents types d'aménagement en les divisant en trois catégories soient les aménagements traditionnels, l'aménagement cellulaire et ses dérivés et enfin les

aménagements de nouvelle génération. Ensuite, nous verrons différentes techniques proposées dans la littérature pour construire des aménagements distribués et pour définir les routes permettant la fabrication de produits au sein de ces aménagements. Seront présentées par la suite différentes études qui analysent les impacts des aménagements sur la performance opérationnelle des entreprises. Pour terminer, nous dresserons le portrait des paramètres considérés dans ces diverses recherches liées à l'évaluation de la performance des aménagements.

## **2.2 Les types d'aménagement**

La littérature et la pratique font état de nombreux types d'aménagements dont l'appellation varie souvent d'un auteur à l'autre. Il est toutefois possible de les regrouper afin d'en définir trois grandes catégories. La première se veut être l'héritage laissé par une longue série d'années de production humaine que l'on regroupera sous la typologie des aménagements traditionnels. Les deux autres font état de la volonté des gestionnaires et théoriciens de créer des aménagements représentatifs de l'évolution des pratiques de gestion qui soient capables de répondre aux nouvelles exigences du marché. Ainsi, dans un deuxième temps, nous parlerons de l'aménagement cellulaire pour terminer avec les aménagements de nouvelle génération. Comme leur nom l'indique, ces derniers sont récents et généralement issus de la théorie.

### **2.2.1 Les aménagements traditionnels**

Cette catégorie regroupe trois types d'aménagement : les aménagements fixes, produit et processus. Ces aménagements classiques ont des caractéristiques précises qui visent à offrir une réponse cohérente à des contextes spécifiques (ex. nature du ou des produits à fabriquer, volumes de production et variété de gamme). Les parties qui suivent dressent le portrait de chacun de ces types d'aménagement avec leurs forces et leurs faiblesses respectives.

### Aménagement fixe ou stationnaire

On nomme ce type d'aménagement stationnaire ou fixe puisque l'objet de la production est lui-même immobile en raison de sa taille (avion) ou de sa nature (ex. un bâtiment, un produit fragile ou dangereux à manipuler). Les ressources nécessaires à la production gravitent donc autour du produit afin d'en assurer la fabrication. Il demande un espace de production suffisamment grand (notamment parce que plusieurs ressources seront utilisées à tour de rôle), des ressources mobiles et une excellente coordination des activités (Nollet et al. (1994)). La figure suivante donne une représentation visuelle de ce type d'aménagement et le tableau qui suit fait état des avantages et inconvénients relevés par certains auteurs. On y voit notamment que selon Stevenson et al. (2001), cet aménagement est simple et peut s'adapter à une diversité de produits.

Figure 1 : Schéma d'aménagement fixe

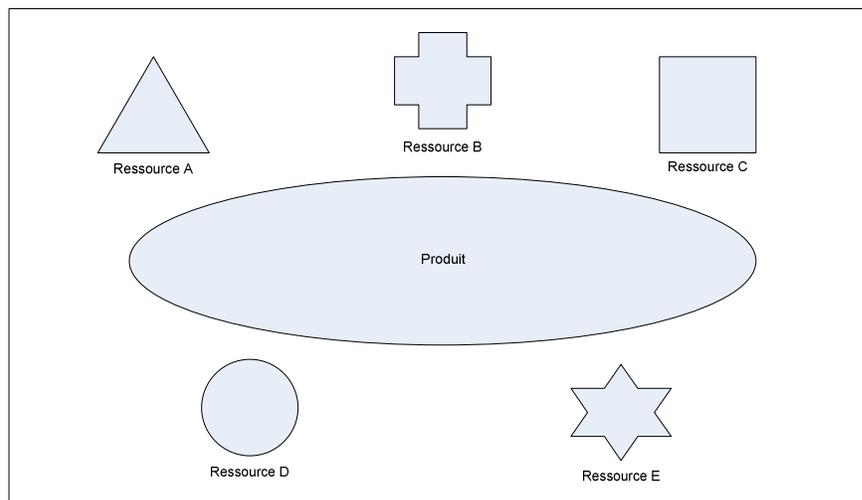


Tableau 1 : Caractéristiques de l'aménagement fixe

<b>Contexte : Production unique d'un produit immobile</b>	
<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aménagement simple et flexible (Stevenson et al. (2001))</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complexité de coordination des opérations (Nollet et al. (1994))</li> <li>- Mobilité des ressources (Nollet et al. (1994))</li> <li>- Beaucoup d'espace nécessaire (Nollet et al. (1994))</li> </ul>

### Aménagement-produit

Ce type d'aménagement est aussi connu sous le nom de chaîne de fabrication ou d'aménagement linéaire puisque les activités de productions sont placées linéairement selon l'ordre séquentiel des opérations de production. Les produits sont donc traités individuellement, sans aucun regroupement ou ségrégation (Montreuil et al. (1993)). L'objectif est de traiter rapidement un grand volume de produit standard. Il en résulte une production rapide et à faible coût puisque les installations et le personnel sont très spécialisés et qu'il y a peu de manutention du matériel. Cet aménagement simplifie les déplacements entre les divers postes de travail, la planification de la production et la gestion des stocks (Stevenson et al. (2001)). Par contre, il n'offre aucune flexibilité (Askin et al. (1999)) et il est très vulnérable à toutes modifications du produit et au rendement des postes de travail en amont et en aval.

Figure 2 : Schéma d'aménagement produit

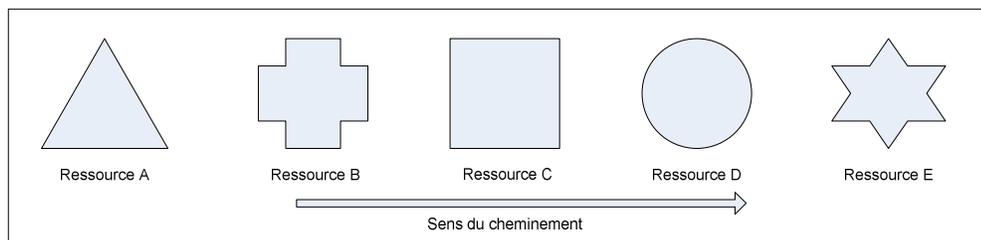


Tableau 2 : Caractéristiques de l'aménagement produit

<b>Contexte : Grand volume et faible variété de produit</b>	
<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- rapidité de production (Nollet et al. (1994))</li> <li>- faibles coûts (Stevenson et al. (2012))</li> <li>- peu de manutention de matériel</li> <li>- déplacements simplifiés (Stevenson et al. (2001))</li> <li>- planification simplifiée (Stevenson et al. (2001))</li> <li>- gestion des stocks simplifiée (Stevenson et al. (2001))</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aucune flexibilité (Askin et al. (1999))</li> <li>- peu d'adaptation aux changements (Stevenson et al. (2012))</li> <li>- interdépendance des postes de travail (Stevenson et al. (2012))</li> </ul>

### **Aménagement fonctionnel**

L'aménagement processus ou fonctionnel se caractérise par des regroupements physiques d'équipements (ou postes de travail) de même nature ou de même fonction. Ainsi, des départements sont créés dans le but d'accomplir un certain type de tâches. Selon les auteurs, on parlera aussi d'aménagement en ateliers spécialisés ou de *job-shop*. Il est tout indiqué pour offrir la flexibilité nécessaire à une production d'une grande variété de produits offerts en petites quantités (Benjaafar et al. (2002)).

La centralisation des activités de même nature en un lieu commun permet de dégager une plus grande expertise et une synergie en raison de la concentration des ressources tant humaines que matérielles (Askin et al. (1999)). Ce type d'aménagement permet une grande flexibilité (Stevenson et al. (2001)). Toutefois, cet aménagement crée des problèmes au niveau des stocks de produits en cours qui s'accumulent entre les départements puisqu'il est difficile de faire un équilibre

adéquat (Montreuil et al. (1993)). La manutention de ces stocks entre les départements est aussi plus importante ce qui la rend inefficace car les distances à parcourir sont plus grandes que celles obtenues avec un aménagement linéaire (Benjaafar et al. (2000)), ce qui augmente aussi les coûts. La polyvalence des postes de travail et des cheminements offre plus de possibilités (notamment pour faire face à la fabrication de nouveaux produits), mais complexifie le travail de planification de la production (Benjaafar et al. (2000)) et de gestion de l'ordonnancement.

Figure 3 : Schéma d'aménagement fonctionnel

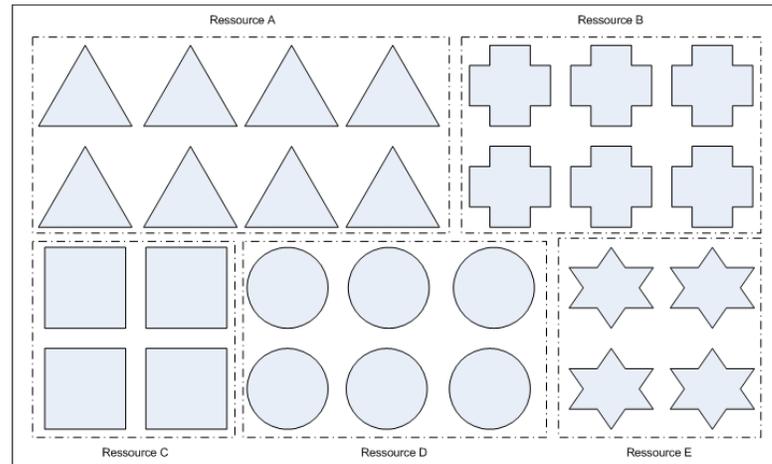


Tableau 3 : Caractéristiques de l'aménagement fonctionnel

<b>Contexte : Petit volume et grande variété de produit</b>	
<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- concentration des ressources (Askin et al. (1999))</li> <li>- effet de synergie (Askin et al. (1999))</li> <li>- regroupement des expertises (Askin et al. (1999))</li> <li>- flexibilité (Stevenson et al. (2001))</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gestion des stocks difficile (équilibre) (Montreuil et al. (1993))</li> <li>- beaucoup de manutention de matériel (Benjaafar et al. (2000))</li> <li>- coûts élevés (Stevenson et al. (2012))</li> <li>- planification complexe (Benjaafar et al. (2000))</li> <li>- gestion de l'ordonnancement complexe (Stevenson et al. (2012))</li> </ul>

### 2.2.2 L'aménagement cellulaire

L'aménagement cellulaire est un dérivé des aménagements traditionnels. En effet, afin d'offrir un compromis entre les deux aménagements traditionnels les plus souvent observés en pratique, les aménagements linéaire et fonctionnel, les chercheurs et gestionnaires ont proposé un aménagement capable de réunir les avantages spécifiques et souvent opposés de ces derniers (Benjaafar et al. (2002)).

L'aménagement cellulaire est souvent présenté de façon imagée comme de petites usines dans l'usine. Certains postes de travail utilisés en séquence lors de la fabrication d'un ensemble de produits semblables (appelé famille de produits) sont regroupés en cellules. On retrouvera donc des postes de travail, de natures différentes mais intervenant les uns après les autres dans un ensemble de

processus, dans une même unité dans le but de fabriquer de façon efficace des biens ayant des caractéristiques spécifiques semblables.

Ce type d'aménagement est généralement utilisé dans un contexte où l'entreprise fabrique un ensemble spécifique de produits ayant une demande stable et un cycle de vie suffisamment long (Benjaafar et al. (2002)). Les cellules de travail ayant une assignation particulière, il n'est pas avantageux de changer fréquemment cette dernière. L'aménagement cellulaire est en effet rigide et demeure inefficace dans le cas d'une variation importante de la demande ou de changements drastiques des produits (Benjaafar et al. (2000)). Une cellule existant pour une famille de produits, elle sera liée à son introduction et à son retrait de la production. Par contre, il simplifie grandement le flux du matériel dans l'usine puisque les déplacements de matières sont concentrés aux limites du secteur qu'occupe la cellule (Benjaafar et al. (2002)). Le regroupement des activités permet également un temps de traitement et de mise en course plus rapide (Stevenson et al. (2001)).

Figure 4 : Schéma d'aménagement cellulaire

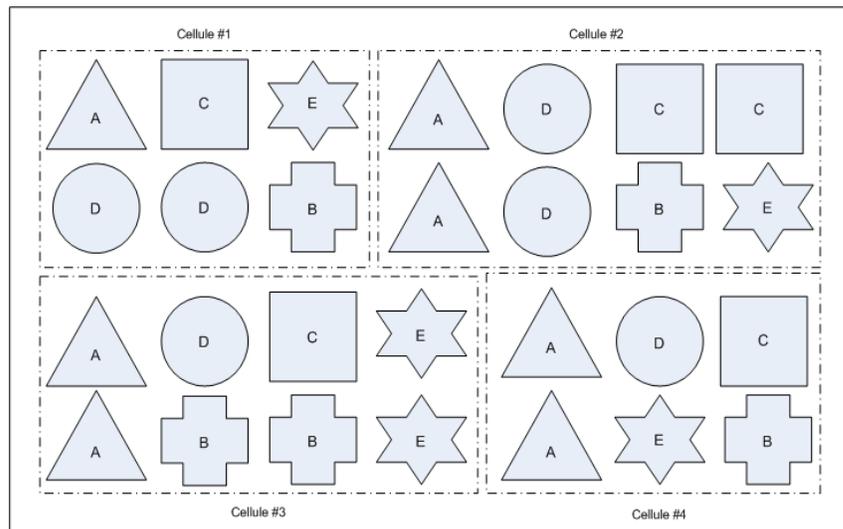


Tableau 4 : Caractéristiques de l'aménagement cellulaire

<b>Contexte :</b>	
<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction de la manutention (Benjaafar et al. (2002))</li> <li>- Simplification du flux de matière (Benjaafar et al. (2002))</li> <li>- Diminution des temps de traitement (Stevenson et al. (2001))</li> <li>- Diminution des temps de mise en course (Stevenson et al. (2001))</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unités de production dédiées (Benjaafar et al. (2000))</li> <li>- Vulnérable aux variations et aux changements importants (Benjaafar et al. (2000))</li> </ul>

### **Système de fabrication flexible (FMS)**

Une évolution de l'aménagement cellulaire a permis l'apparition d'un nouveau type d'aménagement : le système de fabrication flexible. Il s'agit d'un processus opérationnel de production qui automatise la production cellulaire (Stevenson et al. (2001)). Comme son nom l'indique, ce système permet à un aménagement donné une plus grande flexibilité dans sa séquence de production. Ce système est rendu possible grâce à l'introduction des technologies de l'information dans les usines (Afentakis et al. (1990)). Le système gère l'utilisation des postes de travail et attribue les tâches en fonction de leur disponibilité. Il est également responsable de la manutention des pièces jusqu'à ces derniers (Nollet et al. (1994)). Il est utilisé dans un contexte se situant entre la production d'une grande quantité de produits d'une petite gamme et la production de petites quantités d'une large gamme de produits (Stevenson et al. (2001)). L'automatisation permet une production flexible tout en diminuant les coûts liés à la main d'œuvre et offrant une qualité plus stable. Par contre, les possibilités qu'il offre dépendent de la

qualité et de la sophistication du système d'information et sont limitées par la capacité totale du système de production.

### 2.2.3 Les aménagements de nouvelle génération

Les travaux de Saif Benjaafar et ses collègues dans le cadre du *National Science Foundation* portent sur l'exploration des nouvelles approches alternatives aux aménagements traditionnels utilisés dans les industries. Notamment, dans l'article « *Next Generation Factory Layouts : Research Challenges and Recent Progress* », le portrait de différents nouveaux aménagements est dressé dont celui de l'aménagement distribué qui retient notre attention pour la présente étude.

#### **Aménagement distribué**

Ce type d'aménagement récent se distingue fondamentalement de ceux présentés précédemment. Les unités de production ne sont pas aménagées en fonction du produit ou du processus de production. L'idée de base ici est d'aller à l'encontre du regroupement de postes semblables et plutôt de les disperser au sein de l'espace disponible. L'emplacement des unités de production peut même être défini tout-à-fait par hasard. L'aménagement qui en résulte est, en quelque sorte, une coquille qui permet la création dynamique d'aménagements virtuels, c'est-à-dire que les unités de production ne sont dédiées que de façon temporaire à un produit donné.

Selon les auteurs, cet aménagement porte différents noms d'après l'image qu'ils en ont, mais reste fondamentalement le même. Qu'il soit question d'aménagement holographique (Montreuil et al. (1993)) ou encore holonique (Askin et al. (1999)), tous font référence au même concept que l'aménagement distribué de Benjaafar et al. Puisque ce sont ces travaux qui sont à la base de la présente étude, nous utiliserons le terme distribué pour parler de cet aménagement.

L'article de Montreuil et al. « *Holographic layout of manufacturing systems operating in highly volatile environments* » publié en 1993 se veut une référence

dans le domaine. Comme l'indique le titre de l'article, il propose cet aménagement comme une solution dans un contexte très volatile voire chaotique. Selon lui, « l'aménagement holographique répartit les stations de travail de chaque procédé à travers le site manufacturier. Il assure la proximité de stations de travail de tous les procédés à partir de toute station de travail [...] ». L'aménagement est alors capable de faire face à une demande instable qui change rapidement, fréquemment et drastiquement et de laquelle un schéma de processus et donc du flux des matières ne peut être défini a priori. Le but est donc de développer une immunité face aux changements.

Montreuil et al. utilisent le terme holographique en référence au concept physique découvert en 1947 par Dennis Gabor. Cette technique consiste à produire un hologramme à partir d'un laser qui est projeté sur un objet. L'image obtenue possède alors les reliefs de l'objet utilisé. Chaque partie de l'hologramme a pour particularité et avantage de pouvoir reproduire à elle seule l'image entière. Par métaphore, les auteurs établissent un lien entre ce concept et cet aménagement puisque chacune des unités de production réunies permet de créer une organisation virtuelle tout comme l'hologramme.

Askin et al. (1999) parlent d'aménagement holonique. Ils mentionnent que dans ce type d'aménagement chacune des machines doit être traitée comme une entité autonome qui sera placée aléatoirement à travers l'usine. Ils tirent ce concept du grecque *holons* réunissant les mots *holos* et *on* et qui signifient respectivement l'entier et la partie. Le philosophe hongrois Arthur Koestler de qui origine le concept l'utilise pour décrire une unité de base d'une organisation ou d'un système qui est défini comme étant une partie identifiable et autonome.

En raison de la répartition des unités de production, l'aménagement distribué aurait pour principales caractéristiques de permettre une flexibilité absolue en plus de diminuer la distance qui sépare les différentes unités de productions pour une séquence de production. Ceci sans avoir besoin de reconfigurer l'aménagement

pour répondre à des variations de la demande. Toutefois, cette instabilité de la production entraîne des contraintes au niveau de la planification de la production et de la gestion de la capacité de l'usine (Benjaafar et al. (2002)).

Figure 5 : Schéma d'aménagement distribué

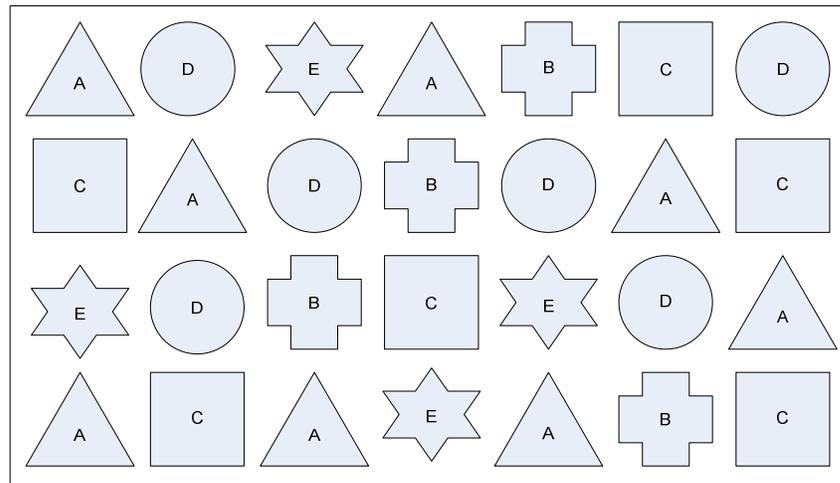


Tableau 5 : Caractéristiques de l'aménagement distribué

<b>Contexte : Fluctuation grande et fréquence de la demande</b>	
<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande flexibilité (Benjaafar et Al. (2002))</li> <li>- Diminution des distances de déplacement (Benjaafar et al. (2002))</li> <li>- Aucun coût de reconfiguration (Benjaafar et al. (2002))</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulté à gérer la capacité (Benjaafar et al. (2002))</li> <li>- Instabilité de la planification (Benjaafar et al. (2002))</li> </ul>

### **2.3 La construction d'un aménagement**

Dans cette section, nous traiterons des différentes méthodes proposées dans la littérature pour définir la position de regroupements de postes de travail ou de postes individuels d'un aménagement. En effet, que l'on fonctionne à un niveau macro (placer des blocs d'équipements) ou micro (placer des équipements), le problème est fondamentalement d'une nature très semblable. Les chercheurs étudiant les aménagements fonctionnels se sont surtout intéressés à la première question tandis que ceux s'intéressant aux aménagements distribués se sont intéressés à la deuxième.

De façon formelle, l'aménagement distribué ne répond à aucune règle précise quant à sa construction. Le chercheur ou le gestionnaire est donc libre d'utiliser les règles qui lui conviennent et qui respectent les contraintes de l'environnement de l'entreprise et du produit pour y parvenir. La disparité des méthodes utilisées par les chercheurs est donc grande, même si l'idée générale est toujours la même : répartir (plutôt que regrouper) dans l'espace disponible les postes de travail de même nature. Il est toutefois possible de regrouper les diverses techniques proposées sous trois classes de méthodes. Nous présenterons donc la méthode aléatoire, la méthode probabiliste basée sur des ratios de similitude et enfin la méthode basée sur l'optimisation.

#### **2.3.1 La méthode aléatoire**

La méthode aléatoire, comme son nom l'indique, utilise le hasard pour répartir les postes de travail. Tous les postes de travail ont donc la même probabilité de se retrouver à chacun des espaces.

Pour construire leur aménagement holonique, Askin et al. (1999) proposent deux méthodes, la première est complètement aléatoire alors que la seconde, par coefficient de similitude, sera présentée à la section suivante. Dans les deux cas,

l'espace disponible est séparé en lignes et en colonnes de sorte à créer un échiquier comprenant le même nombre de carreaux que de machines à distribuer. L'ordre d'attribution des carreaux est linéaire et prédéterminé.

Figure 6 : Échiquier reproduit de Askin et al. (1999)

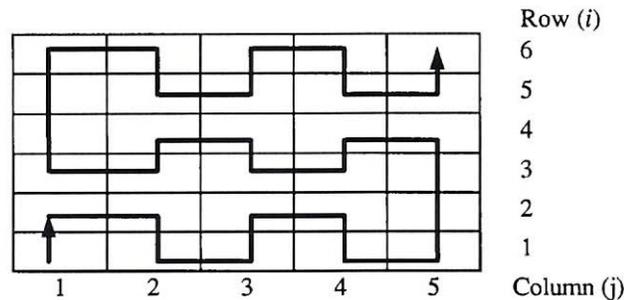


Figure 1. Space filling curve for holonomic layout with 30 machines.

Avec la méthode aléatoire, la première machine est choisie au hasard dans la liste des machines disponibles et placée dans le premier emplacement. On retire cette machine de la liste et procède ainsi pour toutes les autres jusqu'à ce que toutes les machines aient été placées dans une case de l'échiquier.

### 2.3.2 La méthode probabiliste

La méthode probabiliste, contrairement à la méthode aléatoire, ne donne pas la même possibilité à tous les départements de se retrouver dans chacune des cases. Elle utilise un élément connu de la réalité du système qui est la relation d'association de deux postes de travail. On force ainsi l'aménagement à être construit de telle sorte que deux postes de travail souvent utilisés l'un après l'autre soient placés à proximité.

Tel que mentionné précédemment, Askin et al. (1999) proposent une deuxième méthode qui cette fois tient compte de la séquence des tâches des processus de

fabrication. Les cases de l'aménagement sont remplies de la même façon que dans le schéma présenté pour la méthode aléatoire, mais la règle pour l'ordre d'attribution des postes est différente. En effet, on utilise des facteurs pour faire en sorte que les équipements voisins dans le cadre du processus aient une tendance plus forte d'être voisins sur le plancher de l'usine que les équipements non liés dans le processus. Les auteurs ne tiennent pas compte du volume de production de chaque type de produit, mais affirment que ceci pourrait être pris en compte dans une variante de leur modèle.

Il existe donc un facteur de besoin de proximité pour chaque couple de types de machines. Ils représentent chacun la probabilité que la machine de type  $i$  suive la machine de type  $j$  selon l'ensemble des processus et des produits à fabriquer. Comme dans le premier cas, la première machine est choisie au hasard et la séquence des carreaux de l'échiquier est prédéterminée. Toutefois, seule la première machine est choisie complètement au hasard (chacune des machines ayant une probabilité égale d'être retenue). Pour chacune des machines suivantes, on fera un tirage parmi les machines encore disponibles qui prendra en compte la somme des probabilités que cette machine soit utilisée à la suite de la dernière placée (selon la gamme d'opérations de tous les produits). Donc, on favorise statistiquement la proximité de machines devant être utilisées une à la suite de l'autre afin de minimiser les déplacements entre celles-ci.

### 2.3.3 La méthode d'optimisation

Les méthodes d'optimisation sont un peu plus complexes que les méthodes précédentes. On cherche dans ce cas à trouver la meilleure disposition des postes de travail. Cette méthode procède donc un peu à l'inverse en testant différentes possibilités d'aménagement afin de trouver celle qui optimisera la variable objectif, en général, la minimisation de la distance parcourue. La construction de l'aménagement devient donc le résultat de la méthode d'optimisation, contrairement aux méthodes précédentes.

L'objet des travaux de Montreuil et al. (1993) concernent l'élaboration d'une méthode d'optimisation de l'aménagement de sorte que la distance comprise entre les différents types de station de travail soit minimisée. La construction d'un aménagement distribué est dans ce cas le résultat d'un ensemble d'essais (une simulation) faisant varier la valeur d'un certain nombre de paramètres tels que le volume de demande, le temps des processus, le nombre et le type de machines utilisées ainsi que le taux d'utilisation du système de production.

L'aménagement fonctionnel utilisé par Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) est construit en utilisant une heuristique. Selon cette technique, l'espace est divisé en échiquier, de sorte que la première machine du premier département impliqué dans la production est placée dans le coin supérieur gauche. Les machines suivantes sont alors placées selon le flux de matière de sorte à tracer un serpentín d'abord dans la partie supérieure de l'aménagement vers la droite pour descendre dans la partie inférieure et revenir vers la gauche toujours en traçant un serpentín de haut en bas.

Figure 7 : Aménagement de Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) tiré de l'article « Design of flexible plant layouts »

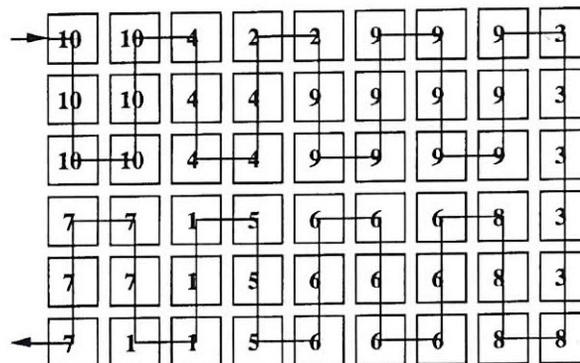


Fig. 1. Example fill sequence for functional layouts.

L'aménagement distribué est obtenu par une dispersion maximale des départements d'un même type. Ces derniers sont répartis de façon uniforme sur l'ensemble de l'espace disponible. L'idée qui sous-tend cet aménagement est l'accessibilité des départements peu importe où l'on se trouve dans l'espace. Cette méthode, comme la méthode aléatoire, est donc complètement aveugle à la réalité de production quant aux flux de matière.

#### **2.4 La construction des routes de production en aménagement distribué**

Le problème consiste ici, une fois que l'aménagement est défini et que l'on doit fabriquer un produit qui implique une suite d'opérations spécifiques, à déterminer le cheminement de ce produit au sein de l'aménagement. Le cheminement est en fait une séquence de postes de travail qui seront en mesure de réaliser les opérations désirées. Plusieurs auteurs se sont intéressés à cette question. L'idée de base est presque toujours la même : minimiser la distance à parcourir. Pratiquement tous les auteurs font l'hypothèse que la distance entre deux postes peut être calculée de façon rectiligne en mesurant la distance entre les centres de chaque poste.

Certaines méthodes sont myopes et retiennent à chaque étape le poste qui minimise la distance par rapport au poste de l'étape précédente. C'est le cas des méthodes de Afentakis et al. (1990). D'autres, plus ambitieuses, sont globales et cherchent à minimiser la distance totale à parcourir pour l'ensemble des étapes d'une commande. C'est le cas des méthodes de Montreuil et al. (1993) et de Benjaafar et Sheikhzadeh (2000).

Enfin, Askin et al. (1999), proposent une méthode à plusieurs objectifs qui englobe différents cas de figures. Ces cas dépendent, comme il a été mentionné plus tôt, de si l'aménagement a été construit en tenant compte ou non de la probabilité d'une utilisation séquentielle de postes de travail et par conséquent en favorisant ou non

la proximité de ceux-ci. Ils utilisent ensuite des visions statique et dynamique. Dans le cas, de la vision statique, une évaluation de la charge de travail est faite au début d'un processus de production. Les postes de travail ayant les charges de travail les moins importantes sont choisis sans tenir compte de la distance entre ceux-ci. Dans le deuxième cas, on utilise une information dynamique pour l'attribution des postes de travail. À chaque mouvement, on fait un arbitrage entre la distance à parcourir entre les postes de travail et le temps d'attente à chaque poste de travail.

## 2.5 Études similaires

Quelques études comparent la performance d'aménagements de différents types. Askin et al (1999) comparent les aménagements fractionnels, distribué (holonique) et processus. Ces auteurs tiennent à comparer les deux premiers puisqu'il s'agit selon eux des aménagements les mieux adaptés dans un contexte où la production doit être flexible pour répondre aux besoins de personnalisation des produits et réagir rapidement aux opportunités de marché. Selon ces auteurs l'aménagement fractionnel est un dérivé de l'aménagement cellulaire où chacune des cellules plutôt que d'être dédiées sont polyvalentes et peuvent donc permettre la fabrication de différents produits.

À l'aide de la simulation, ils cherchent à comparer ces aménagements à l'aménagement-processus sous divers facteurs de production afin d'en évaluer la performance. La mesure de performance utilisée par les auteurs afin de comparer les aménagements est le temps passé dans le système.

Les auteurs utilisent sept paramètres comportant chacun deux ou quatre niveaux (nous donnerons plus de détails à la prochaine section). Toutes les combinaisons de paramètres pour chaque facteur sont alors définies comme un cas de simulation

où sont testées différentes variantes des trois types d'aménagement de base (processus, fractionnel et holonique).

Par une analyse de variance, ils concluent que le facteur le plus significatif est celui du temps de déplacement (manutention entre les postes) alors que l'intervalle d'arrivée des commandes et la séquence de sélection des machines n'ont pratiquement pas d'impact. Ils prétendent également que viser les délais les plus courts engendrent les meilleurs résultats. Ils soulignent aussi que les taux d'utilisation des machines et le temps passé dans le système sont intimement liés. Finalement, selon eux, le meilleur aménagement dépend du contexte de production. L'aménagement processus obtient un rendement imbattable avec un flux de matière rapide alors que l'aménagement fractal performe le mieux quand le flux de matière est lent. Toutefois, l'aménagement holonique offre un compromis entre ces derniers en plus d'être flexible aux variations de conditions.

Afentakis et al. (1990) étudient quant à eux l'impact de la proximité des modules de production dans un contexte de système de fabrication flexible (FMS) afin de déterminer les paramètres qui permettent la minimisation des besoins de manutention du matériel. Ce dernier est mesuré selon le temps de déplacement entre deux machines. Afin de pouvoir représenter une situation de production et de demande dynamique, les auteurs utilisent la simulation mathématique. Les facteurs qu'ils utilisent pour influencer le rendement du système de production sont semblables à ceux des auteurs précédents avec toutefois des paramètres différents. Ils ajoutent un objectif de flexibilité du système à leur simulation. Pour ce faire, ils effectuent différents réaménagements.

Leurs résultats démontrent que le pire aménagement entraîne une augmentation de 36% des besoins de déplacement par rapport au cas qui utilise les paramètres optimaux. La performance se dégrade au rythme de l'augmentation des réaménagements et selon le nombre de machines présentes dans le système. Donc, plus le temps écoulé entre deux réaménagements augmente, plus la manutention

du matériel augmente, mais plus les déplacements de machines diminuent. Considérant les résultats, les auteurs remettent en question l'utilité du FMS comme alternative au job-shop considérant les inconvénients liés à la manutention du matériel.

L'article de Montreuil et al. (1993) cherche à comparer la performance (en termes de minimisation des déplacements des produits) des aménagements distribués dessinés de façon aléatoire à celle d'aménagements distribués construits par optimisation (grâce à une méthode qui vise à minimiser la distance entre les équipements de différents types) ainsi qu' à celle de l'aménagement processus.

Leurs résultats démontrent que la performance s'améliore de 12 à 118% lorsqu'on utilise un aménagement optimisé plutôt que le meilleur parmi mille définis de façon aléatoire. L'ampleur de l'amélioration dépend de la taille de l'aménagement, à savoir que plus la taille augmente meilleurs sont les résultats relatifs des aménagements construits par optimisation. Ces résultats démontrent que l'emplacement de chacun des postes de travail dans ce type d'aménagement, contrairement à ce qui était cru jusqu'alors et outre les considérations de besoins physiques (poids, alimentation électrique, etc.), ne doit pas se faire de façon arbitraire et aléatoire.

Lorsque les auteurs comparent l'aménagement distribué à l'aménagement fonctionnel, ils obtiennent une amélioration des résultats allant de 31,5 à 59,9%, toujours selon la taille des aménagements simulés. Dans le contexte d'un flux uniforme, les résultats s'améliorent toujours à l'avantage de l'aménagement distribué soient de 51,7 à 72,2%. Selon eux, l'aménagement holographique optimal ne pourrait donc jamais donner un résultat inférieur au meilleur aménagement fonctionnel.

Une autre étude faite par Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) démontre qu'en séparant en deux les départements d'un aménagement et en les dispersant on peut

significativement réduire les coûts associés à la maintenance du matériel. Ceci serait explicable théoriquement par le fait qu'en divisant le département, on augmente l'accessibilité de chacun des poste de travail et ce peu importe le point de départ à l'intérieur de l'usine. Par simulation, les auteurs comparent l'aménagement fonctionnel et différents aménagements distribués (distribué, totalement distribué et aléatoire) quant à leurs coûts de maintenance. La différence entre les aménagements totalement distribués et aléatoires réside dans le fait que les premiers ont été soumis à une optimisation qui cherchait à maximiser la dispersion des postes de travail alors que les deuxièmes ont été choisis en tant que meilleurs parmi 100 distributions aléatoires.

Les résultats démontrent que l'aménagement distribué obtient une performance supérieure quant aux coûts de maintenance de matériel de l'ordre de 21 à 45 % par rapport à l'aménagement fonctionnel selon le nombre de départements (respectivement 16 et 40) compris dans ces aménagements. Les auteurs concluent donc que plus la taille de l'aménagement augmente, plus l'aménagement distribué est préférable à l'aménagement fonctionnel. Les différences de rendement sont de l'ordre de 11 à 20% comparativement à l'aménagement totalement distribué et de 10 à 18 % par rapport à celui établi de façon aléatoire. Les auteurs mentionnent que si l'aménagement distribué fait mieux que l'aménagement aléatoire, c'est qu'il est possible de tirer profit de l'information découlant des flux de matière.

Les auteurs démontrent aussi que toute division (par deux) des départements d'un aménagement fonctionnel dans le but d'en distribuer les parties est bénéfique à la réduction des coûts de maintenance de matériel. Toutefois, cette réduction décroît au rythme des divisions. La première apporte donc plus de résultat que la quatrième par exemple. Il n'est donc pas nécessaire de distribuer en plusieurs parties les départements pour obtenir des réductions de coûts.

Ces différentes études permettent de dresser quelques conclusions. D'abord, la simulation se veut une méthodologie incontournable dans ce type d'étude puisque

la validation des hypothèses par une expérimentation terrain est pratiquement impossible. Ensuite, le temps ou la distance des déplacements est récurrente à toutes les études. Qu'elle soit utilisée comme objectif ou comme paramètre, tous les auteurs soulignent son importance. Finalement, l'aménagement distribué semble plus avantageux que l'aménagement fonctionnel du point de vu des déplacements des produits. Toutefois, beaucoup d'interrogations demeurent face aux contextes susceptibles de favoriser ou de défavoriser l'écart de performance entre les deux types d'aménagement. La taille de l'aménagement est un facteur qui a été identifié par Montreuil et al. (1993) et Benjaafar et Sheikhzadeh (2000), on peut toutefois penser que d'autres facteurs, par exemple le taux d'utilisation des postes de travail et la similarité des produits à fabriquer, pourraient avoir un impact encore plus important sur cet écart.

## **2.6 Les paramètres inclus dans les modèles**

Les auteurs qui ont utilisé la simulation pour estimer la performance de divers aménagements utilisent des paramètres (ou variables) pour générer différents contextes de production. Cela permet notamment d'identifier les contextes les plus propices (ou facteurs clés) susceptibles de favoriser la mise en place d'un aménagement distribué. Nous présentons ici une synthèse de ces paramètres.

Les tableaux suivants présentent ces paramètres en les catégorisant selon quatre types principaux : les paramètres relatifs à la demande, au processus, aux ressources et aux départements. . Pour chaque paramètre, on précise les auteurs les ayant utilisés et les valeurs testées.

Tableau 6 : Paramètres relatifs à la demande

Paramètres	Valeurs	Auteurs
Intervalle de temps entre commandes	Constant - exponentiel	Askin et al. (1999)
Nombre de pièces par période	uniforme [100-200] ou [100-1000]	Afentakis et al. (1990)
Stabilité du volume Demande	uniforme [10-100] [100-200] ou [200,300]	Afentakis et al. (1990) Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) Montreuil et al. (1993)
Fréquence de changement des pièces	Probabilité 0,05 ou 0,2	Afentakis et al. (1990)

Tableau 7 : Paramètres relatifs au processus

Paramètres	Valeurs	Auteurs
Temps du processus	Fixe - exponentiel Aléatoire [10,100]	Askin et al. (1999) Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) Montreuil et al. (1993)
Nombre de processus / opérations	5 – 15 Aléatoire [1-20] ou [21-40] Aléatoire [2-5] ou [2-8]	Askin et al. (1999) Afentakis et al. (1990) Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) Montreuil et al. (1993)
Séquence de sélection	uniforme - dépendante Uniforme	Askin et al. (1999) Afentakis et al. (1990)
Délai de manutention de matériel	0,5 - 1 - 5 – 10	Askin et al. (1999)

Tableau 8 : Paramètres relatifs aux ressources

Paramètres	Valeur	Auteurs
Nombre de machines	30 – 60 5 ou 7 16 ou 40	Askin et al. (1999) Afentakis et al. (1990) Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) Montreuil et al. (1993)
Type de machines	5 ou 10	Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) Montreuil et al. (1993)
Taux d'utilisation	75% - 85%	Askin et al. (1999) Montreuil et al. (1993)

Tableau 9 : Paramètres relatifs aux départements

Paramètres	Valeurs	Auteurs
Forme	Carré Rectangulaire	Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) Askin et al. (1993) Montreuil et al. (1993)
Taille	5 x 6 10 x 15 5 x 8 4 x 4	Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) Askin et al. (1993) Montreuil et Al. (1993) Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) Benjaafar et Sheikhzadeh (2000)

On remarque que si certains facteurs semblent être des incontournables tels que la taille de l'aménagement ou le nombre d'opération/processus puisqu'ayant été utilisés par tous les auteurs, d'autres facteurs originaux surtout reliés à la notion temporelle comme l'intervalle de temps entre les commandes et le délai pour la manutention du matériel permettent la différenciation des travaux.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté différents types d'aménagement. Ces différents aménagements se distinguent non seulement de par leur représentation graphique, mais aussi de par la performance qu'ils engendrent selon le contexte de productions. Les études démontrent que l'aménagement distribué permet des réductions de temps (ou coût) de manutention par rapport à l'aménagement fonctionnel. Cette réduction semble toutefois très variable et dépendre du contexte, notamment du nombre et de la taille de département impliqués. Beaucoup reste à faire pour mieux comprendre les contextes qui sont très ou peu avantageux pour les aménagements distribués face aux aménagements fonctionnels. L'étude qui suit permettra de déterminer si d'autres facteurs de production ont un impact sur la prérogative de l'aménagement distribué face à l'aménagement fonctionnel.

## Chapitre 3

### Méthodologie

#### 3.1 Introduction

Maintenant que nous avons cerné la problématique dans le chapitre 1 et que la revue de littérature nous a permis de dresser la table en traçant le portrait de précédentes études faites dans le domaine, ce présent chapitre expliquera la méthodologie utilisée pour tenter de répondre à notre question de recherche, à savoir: à quel point l'aménagement distribué permet-il de réduire la distance totale des déplacements pour le traitement d'une commande par rapport à l'aménagement fonctionnel et quels sont les contextes qui favorisent cet écart?

D'abord, nous expliquerons le choix de la méthode d'expérimentation qu'est la simulation, ensuite nous traiterons du cadre méthodologique.

#### 3.2 La simulation

L'évolution de la simulation est étroitement liée à celle de l'informatique. Alors qu'elle a vu le jour dans le domaine militaire au cours de la seconde guerre mondiale avec le projet Manhattan (bombe atomique), c'est en 1955, qu'elle fut utilisée la première fois en science par les chercheurs Fermi-Pasta-Ulam dans leur article intitulé « *Studies of Nonlinear Problems* ». Depuis, elle est devenue accessible au commun des chercheurs possédant un ordinateur de base.

La simulation est donc une modélisation imitant les processus et les systèmes du monde réel (Banks 2004). Comme le mentionne cet auteur, elle permet d'analyser le comportement d'un système en le confrontant à une multitude de situations avec le questionnement « que se passerait-il si ... ? » Elle permet donc aux chercheurs des expérimentations autrement irréalisables, difficilement réalisables, ou encore très coûteuses dans la réalité.

Dans le cas présent, il aurait été, en effet, impensable de tester en entreprise toutes les configurations qu'on désirait évaluer. Une expérimentation dans un contexte réel représenterait de nombreuses constructions de bâtiments, des déplacements de machineries, un contrôle impeccable des autres facteurs de productions sans oublier la production de mêmes commandes à plusieurs reprises. C'est pourquoi la simulation était tout à fait indiquée comme méthodologie.

Il existe plusieurs types de simulation. Notons, que nous n'effectuons pas ici une simulation complète de l'ensemble des activités de production, nous nous concentrons uniquement sur les déplacements des commandes au sein de l'aménagement.

### **3.3 Le cadre méthodologique**

Dans cette section nous présenterons les différents choix méthodologiques relatifs à la construction de l'aménagement, au contexte de production, à la mesure de la distance parcourue et au nombre d'essais lors des simulations.

#### **3.3.1 La construction des aménagements**

La construction de l'aménagement est définie par sa forme, sa taille (nombre total de postes), le nombre de départements, ainsi que la répartition des postes de travail dans l'espace global. Nous présentons ici chacun de ces aspects.

### Les formes d'aménagement

La plupart des études antérieures utilisent des formes régulières, à savoir le carré et le rectangle. Dans le cas des rectangles, les ratios longueur-largeur testés dans la littérature, bien que variés, sont en général compris entre 0,5 et 1.

Dans la présente étude, nous nous pencheront sur l'effet de ce ratio sur les distances moyennes parcourues pour réaliser toutes les tâches liées à la fabrication d'un ensemble de commandes. Ainsi, nous utiliseront trois formes d'aménagement.

Le premier est l'aménagement carré. Celui-ci offre une concentricité des postes de travail et donc une distance moyenne minimale entre les différents postes de travail. Les deux autres types d'aménagement sont des rectangles plus ou moins allongés. Les ratios longueur/largeur retenus pour l'étude sont 1/9 et 4/9. Ceci différencie notre étude des précédentes puisque qu'aucun auteur n'a utilisé des ratios aussi petits (ex : 5/6(Askin et Al.), 2/3(Montreuil et Al.), 1/1 et 5/8 (Benjaafar et Sheikhzadeh).

### La taille des aménagements

La taille des aménagements est fonction de la quantité de postes de travail qui les composent. On suppose donc ici, comme dans les études antérieures, que tous les postes de travail sont de la même taille, occupent une même fraction de l'aménagement total et sont conscrits dans un espace 1 par 1.

Puisque nous désirons tester à la fois des aménagements de formes carrés et de formes rectangulaires de ratio 1/9 et 4/9, nous avons choisi d'utiliser 144 postes de travail. En effet, ce carré parfait offre une multitude de combinaisons de facteurs, notamment un aménagement carré de 12x12 et des aménagements rectangulaires de 4x36 et de 8x18.

### Le nombre de départements

L'aménagement retenu comprend douze unités de production (ou départements) comprenant chacune douze postes de travail pour un total convenu de 144 postes. Comme nous l'avons mentionné au chapitre précédent, les travaux de Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) ont démontré que plus le nombre des départements augmente, plus les performances de l'aménagement distribué sont supérieures à celles de l'aménagement fonctionnel. Ces derniers utilisaient deux nombres de départements soient 16 et 40. Nous avons donc choisi de prendre un nombre de département plus petit que leur valeur inférieure afin de ne pas utiliser un contexte de production qui favoriserait au départ l'aménagement distribué. De plus, ce nombre est très bien adapté au nombre total de postes de travail (taille de l'aménagement) que nous avons retenu.

### La répartition des postes de travail

Nous utiliserons deux configurations pour répartir ces postes, à savoir des aménagements fonctionnel et distribué.

Les aménagements distribués se composent de postes individuels. Les travaux de Benjaafar et Sheikhzadeh (2000) démontrent que la principale réduction des distances à parcourir dans un aménagement fonctionnel se fait à la première distribution des postes de travail par rapport à l'aménagement fonctionnel et que les gains des distributions suivantes sont décroissants. Nous avons tout de même retenu l'option qui permet la distribution maximale.

De façon plus précise, les postes de travail sont répartis en utilisant la méthode de Benjaafar et Sheikhzadeh (2000). L'espace est divisé en échiquier et ensuite séparé en deux parts égales ; celle du haut et celle du bas. Le premier poste est placé à gauche sur la ligne médiane. Le second est placé au-dessus de celui-ci et ainsi de suite jusqu'au haut de l'aménagement. Quand cette limite est atteinte, le prochain est placé à la droite du dernier et les suivants vers le bas jusqu'à la ligne médiane. Les machines sont donc placées selon le flux de matière de sorte à tracer un



La même technique est utilisée pour la construction des aménagements distribués. Les postes de travail sont toutefois choisis aléatoirement. Ainsi, le premier à être tiré parmi les 144 disponibles est placé à la cellule 1 et est retiré de la liste des postes disponibles. Nous procédons ainsi jusqu'à ce que l'aménagement soit complété. Nous procéderons ainsi 30 fois pour avoir un éventail de 30 configurations différentes d'aménagement distribué. La figure 10 présente une de ces configurations.

Figure 10 : Méthode de répartition des postes de travail pour l'aménagement distribué

E	F	L	I	E	G	J	C	F	F	G	C
H	C	C	H	I	G	D	G	A	G	G	K
L	I	C	J	C	H	L	L	H	B	F	K
J	L	L	K	C	L	H	F	C	G	I	F
L	C	A	B	L	L	L	K	I	A	J	D
I	B	B	D	L	F	C	I	F	E	J	H
E	J	H	K	E	H	C	A	D	G	H	A
E	E	K	I	B	A	D	B	E	A	K	B
J	J	A	I	G	J	A	F	F	E	K	I
D	J	E	D	K	B	D	B	E	D	A	D
F	D	K	F	B	G	A	G	A	D	H	B
J	E	K	H	B	I	K	G	H	I	J	C

Dans les deux cas, aménagements fonctionnel et distribué, l'ordre dans lequel sont placés les départements reste le même indépendamment de la forme de l'aménagement. Par exemple, la cellule numéroté par le chiffre 3 sera occupée par une machine de type A dans tous les aménagements fonctionnels et par une machine de type J dans l'aménagement distribué présenté en exemple.

### Contexte de production

Plusieurs paramètres vont ici définir le contexte de production. Le premier de ces paramètres est le taux d'occupation des postes de travail. Askin et al. (1999) ont

démontré que le taux d'occupation est un facteur influant dans la performance d'un système. En effet, il force l'utilisation de postes de travail plus éloignés les uns des autres et augmente ainsi la distance à parcourir pour l'achèvement d'un processus. Ces derniers utilisent deux cas de figure, soient des taux d'utilisation de 75 et 85% alors que Montreuil et al. (1993) utilisent plusieurs taux (60, 70, 75, 80, 85, 90 et 95%).

Nous cherchons à analyser trois situations différentes, soient quand le système approche de sa pleine capacité, quand il est presque vide et une mesure intermédiaire. Ainsi, nous utiliseront les taux d'occupation suivant : 50%, 75% et 91,67%. Ces taux sont des fractions de douze. Par exemple, 91,67% d'utilisation correspond à un aménagement où une seule machine sur les 12 de chaque type serait disponible. Ces taux sont fixes. Ainsi, un taux de 50% signifie que précisément une machine sur deux est disponible en tout temps. Pour chaque type, les postes occupés sont choisis au hasard parmi tous les postes de ce même type jusqu'à ce que le ratio voulu soit atteint. Pour mieux représenter un environnement dynamique, une nouvelle liste de postes occupés sera générée pour chaque commande. Ainsi, durant la simulation, une même machine sera parfois occupée et parfois libre. Plus de détails sur cette technique seront donnés au prochain chapitre.

Un autre élément important du contexte de production est l'ensemble des commandes à traiter. Une commande représente un ensemble de tâches à réaliser. Dans le cas de notre recherche, les commandes comportent un nombre fixe de tâches. Toutes les tâches ne sont pas nécessairement présentes dans chacune des commandes au même titre qu'une même tâche peut revenir à plusieurs reprises (de façon consécutive ou non) pour une même commande. Cela nous permet de représenter des cas tels une commande nécessitant deux couches de peinture ou deux assemblages.

Afin de vérifier si le nombre de tâches d'une commande a un impact sur l'écart entre les distances parcourues au sein d'aménagement de différents types, nous étudierons les commandes comprenant deux, quatre, huit et douze tâches ce qui offre un plus grand fractionnement que celui testé par Askin et al. (1999) avec 5 et 15 tâches. Les tâches présentes dans chaque commande sont choisies de façon aléatoire parmi les douze tâches possibles jusqu'à ce que la commande comporte le nombre de tâches voulu. Au sujet de l'ordre de réalisation de ces tâches, nous étudierons deux cas de figure. Dans le premier cas, les tâches d'une commande sont traitées dans l'ordre du tirage. Ce cas représente donc un contexte où les produits sont tellement variés qu'il n'y a aucune corrélation entre les activités de fabrication des différents produits. Dans le deuxième cas, les tâches sont triées par ordre alphabétique. Ce cas représente donc au contraire un contexte où les activités de fabrication respectent toujours un même ordre logique (fidèle à l'aménagement fonctionnel) même si certaines activités peuvent ne pas être nécessaires pour un produit donné. Nous expliquerons en détails comment cela se traduit dans le simulateur au prochain chapitre.

Le tableau suivant présente une synthèse de l'ensemble des paramètres du modèle.

Tableau 10 : Paramètres de la simulation

Paramètres	Valeurs			
	Fonctionnel		Distribué	
Type d'aménagement				
Forme d'aménagement	4/36	8/18	12/12	
Taux occupation	50%	75%	92%	
Ordre des tâches	Tri		Aléatoire	
Nombre de tâche par commande	2	4	8	12

### 3.3.2 Le calcul de la distance entre deux postes de travail

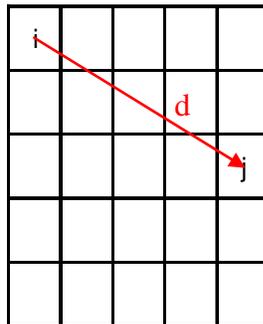
L'objectif de cette étude étant de comparer les aménagements fonctionnel et distribué en fonction d'un ensemble de paramètres au niveau de la distance

parcourue pour réaliser des commandes, cette partie constitue en quelque sorte le point central de la recherche.

Le point de départ est le premier poste de travail où on traitera la commande et le point d'arrivée est le dernier poste où l'on traitera cette même commande. Il est à noter que plusieurs cheminements peuvent être envisageables pour compléter la commande. Nous utilisons un algorithme glouton (Cormen et al., 1990) pour déterminer le chemin à parcourir. Il commence par chercher le premier emplacement libre pour la première tâche. Il trouve ensuite tous les emplacements vides pour la seconde tâche, calcule les distances à parcourir et choisit le second emplacement qui minimise cette distance et ainsi de suite jusqu'à ce que la commande soit complétée.

Les distances entre deux postes de travail  $i$  et  $j$   $d(i,j)$  sont calculées en mesurant la longueur de la ligne droite liant les points milieux des poste de travail  $i$  et  $j$ .

Figure 11 : Calcul des distances entre deux postes de travail



Le système agit donc de façon myope en minimisant la distance à parcourir à chaque déplacement indépendamment des déplacements à venir. Cette façon de faire est identique à la démarche employée par Afentakis et al. (1990).

### 3.3.3 Le nombre d'essais

Afin de minimiser les risques de résultats non représentatifs, nous générerons, dans un premier temps, 1000 commandes. Cet échantillon de commandes nous fournira une base commune pour l'ensemble de nos configurations. Dans un deuxième temps, nous nous assurerons que les intervalles de tolérance des résultats ainsi obtenus sont satisfaisants.

## 3.4 Conclusion

Au cours de cette simulation, nous étudierons six aménagements différents. Il est donc question de trois aménagements fonctionnels : un carré de 12 par 12, un rectangle de 8 par 18 et un dernier rectangle de 4 par 36 et de trois aménagements distribués de mêmes formats comprenant chacun 144 postes de travail. Pour chacun de ces aménagements nous étudierons 24 contextes de production (3 valeurs de taux d'utilisation \* 2 possibilités de triage des tâches \* 4 valeurs pour le nombre de tâches) pour un total de 144 configurations différentes. Chaque configuration sera testée par 1000 commandes. Enfin, la distance considérée pour le cheminement d'une commande sera la somme des distances linéaires entre chaque poste de travail visité. Le prochain chapitre expliquera en détail le fonctionnement du simulateur.

## **Chapitre 4**

### **Description du simulateur**

#### **4.1 Introduction**

Au chapitre dernier, nous avons présenté le cadre méthodologique de notre recherche. Plus précisément, nous avons dressé le portrait des différentes questions auxquelles nous devons répondre et précisé les paramètres dont l'impact sur les distances parcourues dans les aménagements fonctionnels et distribués sera étudié. Dans ce chapitre-ci nous expliquerons comment ces choix s'inscrivent dans le simulateur utilisé. Nous présenterons donc, d'un point de vue technique, comment le simulateur construit les aménagements, comment il traite les paramètres et leurs différentes valeurs et finalement comment il effectue le calcul des distances parcourues.

#### **4.2 La construction des aménagements**

La première étape de la construction des aménagements est de dessiner les canevas de départ. Ces derniers correspondent à la forme (4/36, 8/18 et 12/12) en deux exemplaires, l'une pour l'aménagement fonctionnel et l'autre pour l'aménagement distribué. Ensuite, tel que décrit précédemment, nous utilisons la méthode de Benjafer et Sheikhzadeh (2000) afin de numéroter chacune des cases de l'échiquier et ainsi préciser l'ordre selon lequel les 144 positions seront comblées.

Dans le cas de l'aménagement distribué, le type de machine de chaque position est effectué de façon aléatoire par un programme développé en VBA sous Excel. Ce dernier utilise la fonction « Rnd » de VBA avec une réinitialisation de la valeur initiale à chaque tirage afin de générer des séries de nombres aléatoires distincts. La fonction **Rnd** est un générateur de nombres « aléatoires ». Chaque valeur suivante résulte d'un algorithme appliqué à la valeur précédente. La suite de nombres générée dépend donc de la valeur initiale du premier tirage. La réinitialisation à partir de l'horloge interne permet ainsi de modifier la valeur initiale du premier tirage. Si nous n'utilisons pas la réinitialisation, Excel partirait toujours d'une même valeur initiale, et à chaque fois, nous obtiendrions une série « aléatoire » identique.

L'utilisateur a le loisir d'y inscrire le nombre de fois qu'un même type de poste peut revenir dans une liste de possibilités de 1 à 12 correspondant aux douze premières lettres de l'alphabet. Ensuite, il indique la taille de la matrice dans laquelle seront affichés les résultats. Il clique ensuite sur le bouton permettant le calcul. À ce moment, le programme tire un nombre aléatoire compris entre 1 et 12. Il vérifie dans la table le nombre de fois que ce nombre peut revenir en soustrayant le nombre de fois qu'il a préalablement été utilisé. Si le résultat est plus grand que zéro, il le place dans la matrice et si le résultat est nul, il tire un nouveau nombre jusqu'à ce que la matrice soit remplie et toutes les valeurs attribuées.

Considérant la méthode d'attribution des machines, nous avons défini une matrice 1 par 144 pour que l'ordre d'attribution des machines correspondent à la méthode de Benjafer et Sheikhzadeh (2000) et qu'elle soit la même dans tous les cas étudiés.

À cette matrice, nous ajoutons une colonne pour l'ordre d'attribution de l'aménagement fonctionnel. Dans ce cas, les lettres sont placées dans l'ordre de l'alphabet. La fonction « recherchev » d'Excel remplace alors les numéros de cellule par la valeur alphabétique de la matrice. Ainsi, six aménagements sont construits, soient trois aménagements fonctionnels et trois aménagements

distribués. Pour chacun de ces six aménagements ont étudié 24 contextes pour un total de 144 configurations.

### **4.3 Les contextes de production, le nombre de commandes et l'exécution du programme**

Le simulateur permet à l'utilisateur de faire varier la valeur des paramètres qui définissent le contexte de production. Ainsi, il doit déterminer le taux d'occupation des machines et le nombre de tâches à effectuer pour compléter chacune des commandes. Il choisit également le nombre de commandes. Ensuite, il clique sur le bouton qui met le programme en marche.

Le programme commence alors par générer des nombres aléatoires compris entre 1 et 12 correspondant aux tâches A à L. Il en tire autant que l'utilisateur lui en a demandé pour chaque commande et pour le nombre total de commandes demandées.

Le programme appelle ensuite, au besoin, une fonction « tri » qui permet d'ordonner les tâches en ordre alphabétique de façon à représenter le cas où les tâches sont toujours traitées dans un ordre séquentiel défini. La méthode de tri utilisé est développée encore une fois sous VBA dans Excel et constitue un tri de Shell (1959).

La détermination des postes de travail non disponibles (ou occupés) est fonction du taux d'occupation déterminé par l'utilisateur. Le programme tire aléatoirement un emplacement compris entre 1 à 144. Il vérifie le type de poste dont il s'agit, ce poste est alors déclaré non disponible si le nombre cible de postes non disponibles de ce type n'est pas atteint. Tant que certaines cibles ne sont pas atteintes on continue le tirage.

#### **4.4 Le calcul des distances totales**

Pour chaque cas de figure, le programme calcule la distance à parcourir pour traiter l'ensemble de la commande. Tel que précisé précédemment, le programme tire aléatoirement, parmi les postes disponibles, un poste en mesure d'effectuer la première tâche de la commande. Pour tous les postes suivants, on choisit le poste du bon type qui minimise la distance par rapport au poste précédant. Pour chacune des configurations, le programme calcule la moyenne, la médiane et l'écart-type pour l'ensemble des essais.

#### **4.4 Conclusion**

Nous avons, dans ce chapitre, présenté le simulateur basé sous Excel et VBA qui nous a permis de tester différentes configurations de paramètres.

Il est important de se rappeler que la simulation n'est pas le réel (Banks, 2004), elle n'est que le résultat de notre conceptualisation d'un système de production. Les contraintes et les valeurs sont ici générales et servent à dresser des lignes directrices. Elles pourraient être modifiées pour répondre à des besoins précis de production.

La partie qui suit sera la présentation et l'analyse des résultats obtenus grâce à cette simulation.

## **Chapitre 5**

### **Résultats et analyse**

#### **5.1 Introduction**

Au cours des précédents chapitres, nous avons décrit la méthodologie et le simulateur que nous avons utilisés afin de comparer les aménagements fonctionnel et distribué. Nous cherchions à démontrer si l'aménagement distribué, en comparaison avec l'aménagement fonctionnel permettait de réduire la distance totale des déplacements pour le traitement d'une commande et ce, sous diverses configurations. Afin de répondre à notre question de recherche, les résultats obtenus lors de la simulation seront successivement présentés et analysés au cours du présent chapitre. Nous comparerons ensuite ces résultats à ceux obtenus par d'autres chercheurs lors d'études antérieures.

#### **5.2 Présentation des résultats**

Rappelons que le simulateur présenté au chapitre 4 génère 1000 commandes qui servent à étudier chacune des 72 combinaisons de paramètres pour un total de 72 000 résultats par configuration d'aménagement. 31 aménagements ont été étudiées, à savoir un premier cas avec douze départements de douze machines identiques (aménagement fonctionnel) et 30 aménagements avec une disposition aléatoire des 144 machines (aménagement distribué).

Dans un premier temps, nous présenterons les tableaux regroupant les statistiques descriptives que sont la moyenne, la médiane et l'écart type des distances parcourues pour l'ensemble des cas étudiés. Nous analyserons ensuite les écarts de distances entre les aménagements fonctionnel et distribué en considérant leur ampleur et leur aspect significatif.

### 5.2.1 Sommaire des statistiques descriptives

Les tableaux 11 à 14 représentent respectivement les résultats pour l'aménagement fonctionnel avec des séquences de tâches suivant un ordre prédéfini (tri) et aléatoire (sans tri) et ensuite les résultats globaux pour les aménagements distribués avec et sans tri.

Tableau 11 : Résultats pour les aménagements fonctionnel avec tri

		4 / 36			8 / 18			12 / 12		
		50%	75%	92%	50%	75%	92%	50%	75%	92%
2 tâches	Moyenne	11,050	11,337	11,981	6,179	6,407	6,859	4,351	5,089	6,037
	Médiane	11,066	11,342	11,963	6,175	6,409	6,852	4,366	5,087	6,031
	Écart-type	0,226	0,282	0,291	0,112	0,130	0,135	0,080	0,084	0,099
4 tâches	Moyenne	31,410	32,384	33,921	17,625	18,412	19,573	12,414	14,756	17,489
	Médiane	31,248	32,377	33,988	17,552	18,404	19,592	12,373	14,754	17,484
	Écart-type	0,503	0,504	0,586	0,246	0,241	0,276	0,167	0,169	0,209
8 tâches	Moyenne	69,569	70,362	72,288	37,965	39,138	41,008	26,582	30,646	35,663
	Médiane	69,396	70,374	72,356	37,964	39,196	41,038	26,538	30,623	35,731
	Écart-type	0,980	0,792	0,847	0,460	0,351	0,382	0,330	0,289	0,273
12 tâches	Moyenne	100,619	101,278	102,911	54,021	55,540	57,616	37,685	42,872	49,052
	Médiane	100,486	101,259	102,915	54,004	55,505	57,712	37,677	42,878	49,105
	Écart-type	0,539	0,845	0,815	0,293	0,386	0,431	0,220	0,256	0,391

Tableau 12 : Résultats pour les aménagements fonctionnels sans tri

		4 / 36			8 / 18			12 / 12		
		50%	75%	92%	50%	75%	92%	50%	75%	92%
2 tâches	Moyenne	10,121	10,681	11,981	5,787	6,124	6,859	4,158	4,935	6,037
	Médiane	10,146	10,719	11,963	5,791	6,123	6,852	4,178	4,935	6,031
	Écart-type	0,217	0,279	0,291	0,111	0,130	0,135	0,078	0,089	0,099
4 tâches	Moyenne	28,445	30,203	34,094	16,311	17,335	19,491	11,693	13,993	17,195
	Médiane	28,348	30,224	34,064	16,298	17,348	19,446	11,656	13,989	17,200
	Écart-type	0,445	0,528	0,523	0,219	0,255	0,266	0,157	0,173	0,206
8 tâches	Moyenne	65,707	69,297	78,187	37,636	39,759	44,704	26,969	32,104	39,357
	Médiane	65,760	69,294	78,207	37,627	39,788	44,716	27,004	32,101	39,382
	Écart-type	0,935	0,754	0,617	0,455	0,415	0,304	0,321	0,299	0,247
12 tâches	Moyenne	102,375	108,220	122,039	58,708	62,066	69,792	42,063	50,110	61,434
	Médiane	102,453	108,433	121,859	58,775	62,113	69,698	42,075	50,186	61,492
	Écart-type	0,979	1,225	0,922	0,447	0,592	0,407	0,351	0,393	0,354

Tableau 13 : Résultats pour les aménagements distribués avec tri

		4 / 36			8 / 18			12 / 12		
		50%	75%	92%	50%	75%	92%	50%	75%	92%
2 tâches	Moyenne	3,533	5,613	11,297	2,740	3,835	6,500	2,682	3,672	5,786
	Médiane	3,489	5,605	11,325	2,699	3,824	6,501	2,707	3,664	5,788
	Écart-type	0,304	0,300	0,248	0,163	0,144	0,123	0,169	0,127	0,103
4 tâches	Moyenne	9,835	15,433	31,396	7,588	10,549	18,024	7,467	10,113	15,978
	Médiane	9,678	15,505	31,457	7,553	10,541	18,030	7,398	10,017	16,007
	Écart-type	0,926	0,793	0,652	0,448	0,408	0,299	0,432	0,352	0,302
8 tâches	Moyenne	19,707	30,798	62,087	15,164	20,975	35,690	14,887	20,098	31,605
	Médiane	18,963	30,243	61,788	15,039	20,877	35,507	14,981	19,873	31,540
	Écart-type	2,382	2,030	1,886	1,188	0,879	0,889	1,211	1,025	0,729
12 tâches	Moyenne	26,573	41,776	83,887	20,457	28,435	48,149	20,098	27,226	42,610
	Médiane	25,242	40,669	83,135	20,305	28,098	47,737	20,140	27,029	42,286
	Écart-type	3,468	3,235	3,790	1,748	1,456	1,788	1,799	1,630	1,366

Tableau 14 : Résultats pour les aménagements distribués sans tri

		4 / 36			8 / 18			12 / 12		
		50%	75%	92%	50%	75%	92%	50%	75%	92%
2 tâches	Moyenne	3,574	5,658	11,297	2,752	3,841	6,500	2,697	3,672	5,786
	Médiane	3,539	5,698	11,325	2,736	3,833	6,501	2,710	3,645	5,788
	Écart-type	0,236	0,256	0,248	0,115	0,114	0,123	0,108	0,088	0,103
4 tâches	Moyenne	10,070	15,911	32,233	7,736	10,837	18,513	7,596	10,324	16,415
	Médiane	10,171	15,767	32,206	7,739	10,810	18,496	7,583	10,301	16,407
	Écart-type	0,575	0,620	0,486	0,259	0,295	0,257	0,204	0,215	0,234
8 tâches	Moyenne	23,275	36,461	73,298	17,815	24,832	42,146	17,443	23,706	37,482
	Médiane	23,330	36,233	73,108	17,818	24,827	42,099	17,313	23,706	37,474
	Écart-type	1,319	1,364	0,884	0,607	0,534	0,420	0,594	0,462	0,349
12 tâches	Moyenne	36,233	57,336	115,498	27,778	38,987	66,300	27,179	37,265	58,841
	Médiane	36,501	57,211	115,404	27,739	39,194	66,112	27,149	37,216	58,911
	Écart-type	2,191	2,032	1,404	0,902	0,865	0,757	0,839	0,773	0,602

En analysant ces tableaux, nous pouvons constater que les différents paramètres utilisés ont une influence sur les résultats obtenus et ce, pour les deux types d'aménagement. D'abord, plus la longueur de l'édifice est disproportionnée par rapport à sa largeur, plus les distances augmentent. Dans tous les cas, on constate une première hausse de la distance lorsqu'on passe d'un format carré (12/12) à un rectangle un peu étiré (8/18) et une seconde hausse quand on passe à un rectangle beaucoup plus étiré (4/36). Le taux d'occupation a également un impact sur les résultats. Plus le système approche de sa pleine capacité, plus les distances à parcourir sont importantes. L'utilisation du tri a généralement pour effet de diminuer les distances nécessaires au traitement des commandes. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le nombre de tâches que comporte une commande est grand. Lorsque ce nombre est petit, cette diminution est beaucoup moins marquée. Ceci s'explique par le fait qu'en triant les tâches d'une commande, toutes les tâches de même nature sont alors faites successivement au même poste de travail; ce qui est avantageux dans tous les cas puisque n'entraînant alors aucun déplacement. De plus, dans le cas spécifique de l'aménagement fonctionnel, plus le nombre de tâches est grand, plus des tâches non triées risquent d'impliquer de multiples aller-retour au sein de l'aménagement. Le dernier paramètre est celui du nombre de tâches que comporte une commande. On constate dans ces tableaux que l'augmentation du nombre de tâche a pour impact d'augmenter les distances totales à parcourir. Ce résultat est très intuitif puisque plus de tâches implique plus de postes de travail à visiter et forcément plus de déplacements. C'est pourquoi, dans la section suivante, nous traiterons ce résultat en le ramenant en distance par tâche et non en distance totale.

Finalement, les résultats les plus intéressants à tirer de ces tableaux se rapportent à notre question de recherche. Rappelons que nous cherchons à comparer les aménagements fonctionnel et distribué quant à la distance parcourue. Nous pouvons constater que pour la totalité des cas, l'aménagement distribué obtient des statistiques descriptives ; autant les moyennes, les médianes et les écart-types, plus

petites que l'aménagement fonctionnel. Une analyse plus détaillée de ces écarts est présentée plus loin.

### 5.2.2 Présentation des écarts de distances entre les aménagements fonctionnel et distribué

Afin de comparer les performances de l'aménagement distribué par rapport à l'aménagement fonctionnel quant à la distance parcourue pour la réalisation de chacune des commandes, il importe d'observer l'écart des résultats obtenus selon les différents contextes. Les tableaux suivants représentent donc la différence (écart brut) résultant de la soustraction de la moyenne des distances nécessaires en aménagement distribué à celle en aménagement fonctionnel. De plus, les écarts sont également présentés sous forme d'écarts relatifs à l'aide de la formule suivante:

$$\text{Écart relatif} = \frac{\text{moyenne en am. Fonctionnel} - \text{moyenne en am. Distribué}}{\text{moyenne en am. Fonctionnel}}$$

Nous effectuons la soustraction dans cet ordre puisque l'hypothèse de départ est que l'aménagement distribué demandera de plus courtes distances totales, donc un écart positif.

Tableau 15 : Ampleur des écarts (bruts et relatifs) des distances en contexte d'utilisation du tri

	4 / 36			8 / 18			12 / 12		
	50%	75%	92%	50%	75%	92%	50%	75%	92%
2 tâches	7,517	5,724	0,685	3,439	2,572	0,359	1,669	1,417	0,251
	68%	50%	6%	56%	40%	5%	38%	28%	4%
4 tâches	21,575	16,951	2,525	10,036	7,863	1,549	4,947	4,643	1,512
	69%	52%	7%	57%	43%	8%	40%	31%	9%
8 tâches	49,862	39,564	10,201	22,801	18,162	5,318	11,695	10,547	4,059
	72%	56%	14%	60%	46%	13%	44%	34%	11%
12 tâches	74,046	59,502	19,024	33,564	27,105	9,467	17,587	15,646	6,442
	74%	59%	18%	62%	49%	16%	47%	36%	13%

Tableau 16 : Ampleur des écarts (bruts et relatifs) des distances en contexte de séquence de tâches aléatoire (sans tri)

	4 / 36			8 / 18			12 / 12		
	50%	75%	92%	50%	75%	92%	50%	75%	92%
2 tâches	6,546	5,023	0,685	3,035	2,283	0,359	1,461	1,263	0,251
	65%	47%	6%	52%	37%	5%	35%	26%	4%
4 tâches	18,375	14,293	1,861	8,575	6,498	0,979	4,097	3,669	0,780
	65%	47%	5%	53%	37%	5%	35%	26%	5%
8 tâches	42,432	32,836	4,889	19,822	14,927	2,558	9,526	8,398	1,876
	65%	47%	6%	53%	38%	6%	35%	26%	5%
12 tâches	66,142	50,884	6,541	30,930	23,078	3,492	14,884	12,845	2,593
	65%	47%	5%	53%	37%	5%	35%	26%	4%

Les résultats sont représentés en quatre groupes-couleur selon quatre niveaux. Les résultats compris entre 0 et 5% sont en bleu, ceux entre 6 et 25% en vert, ceux de 26 à 50% en jaune et finalement les ampleurs plus grandes que 51% en rouge.

L'analyse de ces tableaux permet de constater que l'aménagement distribué offre des réductions de distances de 4 à 74% par rapport à l'aménagement fonctionnel.

À première vue, les écarts les plus importants se situent lorsque le taux d'occupation est faible et la forme de l'aménagement n'est pas proportionnée. Une analyse plus détaillée de l'impact de chacun des paramètres est présentée plus loin.

### 5.2.3 Sommaire de l'influence des paramètres secondaires

Étant donné la grande variabilité dans les écarts selon les contextes, nous présentons le graphique 1. Ce graphique se veut un résumé global des résultats de notre simulation faisant ressortir l'impact de chacun des paramètres sur les distances parcourues et les écarts de distances. Pour cette analyse, nous avons choisi d'utiliser un aménagement distribué représentatif parmi les 30 générés par la simulation. Il est à noter que les résultats des 30 configurations d'aménagement distribué sont très homogènes.

Un aménagement étant souvent utilisé pendant de longues périodes, il importe de préciser que certains paramètres pourraient évoluer dans le temps (nombre de tâches, taux d'occupation, cohérence du processus avec l'aménagement) alors que d'autres seront difficiles ou coûteux à modifier (forme de l'édifice, type d'aménagement). À cet effet, il semble approprié d'étudier l'effet de variations de chacun des paramètres dits évolutifs sur les distances parcourues en aménagement fonctionnel et distribué dans chacun des trois contextes dits « figés » (4/36, 8/18, 12/12).

Afin de simplifier la présentation des résultats, nous avons retiré un paramètre secondaire. Tel que mentionné précédemment, nous avons constaté qu'en divisant les distances parcourues dans chacune des commandes par le nombre de tâches qu'elles contenaient, les résultats ne varient pas beaucoup selon les quatre situations. Nous avons donc fait la moyenne de ces quotients afin de présenter l'impact des autres paramètres. Le tableau suivant représente un exemple de notre démarche pour le cas de l'aménagement distribué sans utilisation du tri. On remarque que la distance par tâche augmente de façon décroissante en fonction du nombre de tâches. Ce résultat est intuitif car deux tâches n'impliquent qu'un seul déplacement et chaque tâche supplémentaire ajoute un déplacement. Ainsi, deux tâches impliquent un seul déplacement, quatre tâches impliquent trois déplacements, huit tâches impliquent sept déplacements et ainsi de suite. Le ratio déplacements/tâches se rapprochera de 1 au fur et à mesure qu'on augmentera le nombre de tâches.

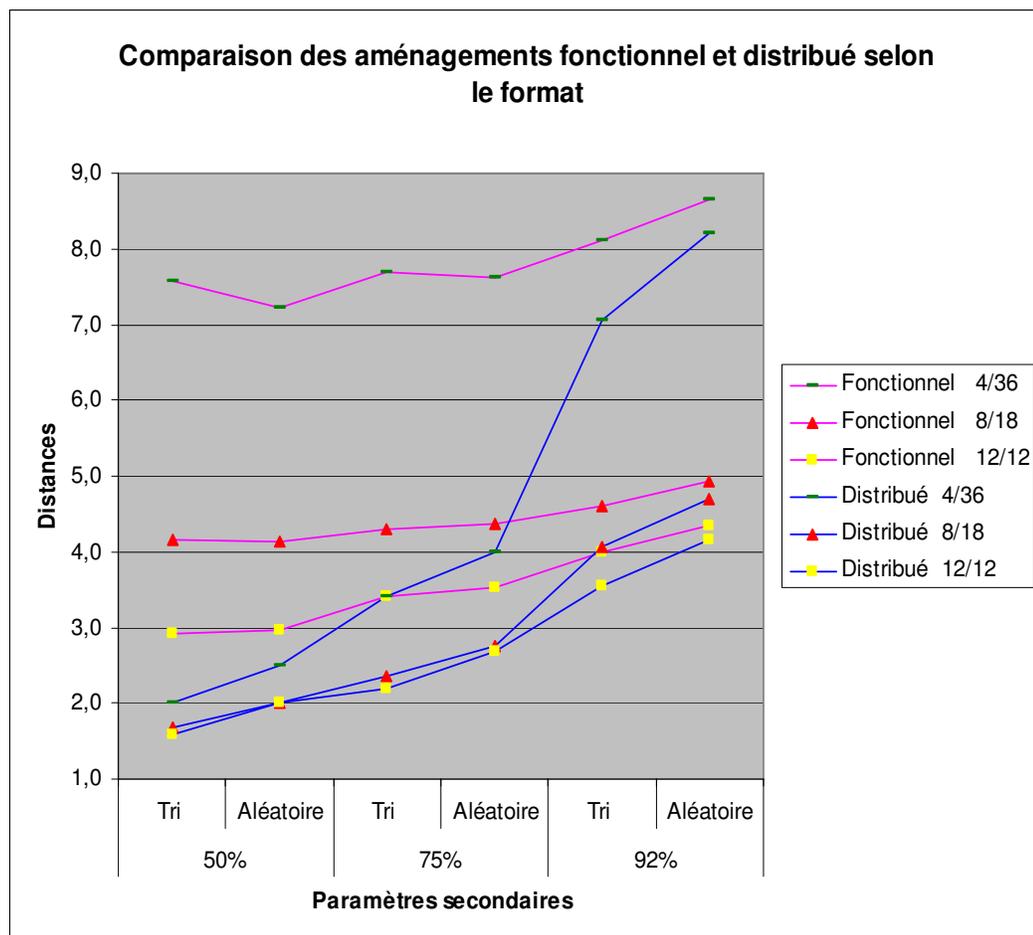
Tableau 17 : Exemple de représentation des distances par tâche pour un aménagement distribué sans utilisation du tri

	Distribué - Aléatoire								
	4 / 36			8 / 18			12 / 12		
	50%	75%	92%	50%	75%	92%	50%	75%	92%
2 tâches	1,666	2,725	6,049	1,368	1,904	3,463	1,403	1,829	3,036
4 tâches	2,574	3,969	7,964	2,051	2,755	4,562	2,036	2,728	4,036
8 tâches	2,787	4,601	9,333	2,216	3,162	5,334	2,226	3,076	4,694
12 tâches	2,965	4,694	9,429	2,348	3,236	5,419	2,340	3,135	4,821
Moyenne	2,498	3,997	8,194	1,996	2,764	4,694	2,001	2,692	4,147

Le graphique comprend six courbes, soit une pour chacun des contextes figés (la combinaison des trois formats et des deux types d'aménagement). Les courbes sont caractérisées par un trait coloré qui identifie le type d'aménagement et un symbole coloré qui identifie la forme de l'aménagement. Les traits en rose représentent les contextes en aménagement fonctionnel et les traits bleus ceux de l'aménagement distribué. Le fin rectangle vert représente le format 4/36, le triangle rouge le format 8/18 et le carré jaune le format 12/12.

Globalement, nous pouvons constater que pour un même format d'aménagement les courbes bleues se trouvent toujours en dessous des courbes roses. Comme il a été mentionné précédemment, l'aménagement distribué implique donc toujours de plus petites distances parcourues.

Graphique 1 : Comparaison des aménagements selon le format



Nous pouvons noter que le format d'aménagement 4/36 (un rectangle très étiré) est particulièrement favorable à un aménagement distribué puisque c'est dans ce format que l'ampleur des écarts est le plus important. Le fait que nous ayons un aménagement étiré augmente les distances parcourues dans tous les cas, cette augmentation est toutefois beaucoup moins marquée dans le cas de l'aménagement distribué que dans celui de l'aménagement fonctionnel. La dispersion physique des différents types de poste de travail est alors un atout. Toutefois, dans certaines configurations cette compensation est moins marquée. Par exemple, si le taux d'occupation des équipements est très élevé, une forme très allongée sera plus difficile à compenser par la dispersion.

Le taux d'occupation des machines influence grandement à la fois les distances parcourues et les écarts de résultats obtenus. Ainsi, si l'on se réfère aux tableaux 15 et 16 présentés à la section 5.2.2, un système de production occupé à 91,67% de sa capacité impliquera des distances parcourues nettement plus grandes que celles d'une même commande traitée dans un système dont le taux d'occupation est de 50%. On remarque pour tous les contextes que si le taux d'occupation augmente, les écarts de distances entre l'aménagement fonctionnel et distribué diminuent. Ainsi, à un taux d'utilisation de 50% deux tiers des contextes engendrent des réductions de distances de plus de 51% si l'on compare les deux types d'aménagement et dans tous les cas, cet écart est supérieur à 35%. Toutefois, lorsque le système est près de la pleine capacité (91,67%), l'ampleur de ces écarts chute de façon importante. Dans un peu moins de la moitié des cas, l'aménagement distribué permet des réductions de moins de 5% et jamais supérieures à 18%. Ce résultat semble intuitif. En effet, dans le cas de l'aménagement distribué, même si les postes sont réparties dans l'espace, si les postes sont pratiquement tous occupés, il faudra être chanceux pour en trouver un libre à proximité. À l'inverse, si la majorité est disponible, on est presque sûr d'en trouver un libre à proximité. Dans le cas de l'aménagement fonctionnel, on bénéficie très rarement de cette possibilité de trouver un poste à proximité. Il faut toujours se déplacer à l'endroit où tous les postes d'un même type et dont on a

besoin se retrouvent. On peut parfois être très chanceux et se retrouver dans la situation où le dernier poste visité est tout près de cet endroit où tous les postes identiques sont regroupés.

Finalement, on remarque que l'utilisation du tri permettant de visiter les postes de travail dans un ordre préétabli a un impact positif bien que limité sur les distances à parcourir. De façon intuitive, on s'y attendait puisque les opérations identiques sont alors faites en séquence et sans déplacement puisqu'on peut alors rester sur la même machine. Cet impact est plus prononcé quant le taux d'utilisation est élevé. Dans les autres cas, cet impact est beaucoup plus faible, notamment dans le cas de l'aménagement distribué ou cet impact est alors pratiquement inexistant.

#### 5.2.4 Résultats statistiquement significatifs

La présentation des résultats quantitatifs et des conclusions qu'elles permettent nous amène à nous poser des questions quant à leur validité. Nous cherchons donc à savoir si les écarts obtenus lors de notre simulation sont significatifs d'un point de vue statistique. Pour ce faire, nous utilisons le *test de student*. Ce test d'hypothèse cherche à mesurer la probabilité que l'hypothèse nulle soit rejetée.

Le résultat de ce test est le seuil expérimental (*P Value*) et selon Wasserman (2004) doit être interprété tel qu'indiqué dans le tableau suivant.

Tableau 18 : Interprétation des seuils expérimentaux

<b>Valeur P</b>	<b>Interprétation</b>
< 0,01	Très forte présomption contre l'hypothèse nulle
0,01 - 0,05	Forte présomption contre l'hypothèse nulle
0,05 - 0,1	Faible présomption contre l'hypothèse nulle
>0,1	Pas de présomption contre l'hypothèse nulle

Le tableau qui suit contient tous les seuils expérimentaux obtenus par le test de Student sur les résultats de notre simulation. Le test compare les données de l'aménagement fonctionnel à celles de l'aménagement distribué pour tous les cas. Nous cherchons à savoir si les résultats de l'aménagement fonctionnel sont significativement différents de ceux de l'aménagement distribué, c'est-à-dire si la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle est supérieure à 0.05.

Tableau 19 : Seuils expérimentaux des résultats de la simulation

		Aléatoire			Tri		
		4/36	8/18	12/12	4/36	8/18	12/12
50%	2 tâches	9,12E-114	2,41E-106	8,41E-50	4,23E-138	4,90E-131	2,03E-82
	4 tâches	5,20E-136	7,88E-87	2,04E-41	3,46E-51	3,20E-20	4,48E-170
	8 tâches	1,49E-173	2,16E-126	3,19E-142	6,12E-93	6,78E-66	6,24E-260
	12 tâches	5,49E-232	5,12E-196	3,97E-238	3,54E-168	6,64E-180	0,00E+00
75%	2 tâches	5,61E-65	9,95E-61	1,21E-36	3,07E-85	1,61E-78	3,34E-53
	4 tâches	9,96E-121	1,07E-103	2,52E-48	6,82E-153	2,13E-149	6,28E-118
	8 tâches	1,07E-177	9,37E-159	5,15E-80	3,43E-266	2,31E-255	1,14E-220
	12 tâches	8,17E-215	7,92E-193	5,37E-115	0,00E+00	0,00E+00	1,50E-290
91,67%	2 tâches	0,40	0,32	0,21	0,40	0,32	0,21
	4 tâches	4,46E-03	1,85E-03	2,13E-04	1,26E-05	1,06E-08	1,26E-15
	8 tâches	1,10E-03	5,37E-05	5,80E-06	6,75E-35	1,32E-40	2,57E-37
	12 tâches	1,12E-06	1,11E-08	7,22E-08	9,21E-72	9,95E-82	1,18E-84

L'analyse des seuils expérimentaux démontre que l'hypothèse nulle peut être rejetée dans tous les cas, sauf lorsque le taux d'occupation est de 91.67% et que nous avons seulement deux tâches à effectuer par commande. En effet, excepté cette situation tous les seuils sont bien en deçà de 0,01 et nous pouvons conclure avec une très faible possibilité de se tromper que l'hypothèse nulle peut être rejetée et donc que les résultats sont significativement différents. L'écart entre les résultats obtenus est donc l'œuvre d'une variable autre qu'aléatoire prouvant que le type d'aménagement est la cause de cet écart.

Toutefois, cette conclusion est fautive pour un cas. Lorsque le système est occupé à 91.67%, donc lorsqu'une seule machine de chaque type est disponible et qu'on doit traiter une commande comportant deux tâches, il n'y a pas de présomption

contre l'hypothèse nulle puisque la possibilité de commettre une erreur en la rejetant excède les 5%, allant même jusqu'à 40%. Cela signifie que les résultats sont influencés par une même loi et que les écarts sont le fruit du hasard. Dans ce cas, le type d'aménagement n'a pas d'influence sur les résultats obtenus et les résultats ne sont pas significatifs.

### **5.3 Comparaisons avec la littérature**

Certains des paramètres utilisés dans cette simulation, c'est-à-dire le format de l'aménagement et l'utilisation d'un tri dans l'ordre de traitement des tâches, étant propres à notre étude il n'est pas possible de comparer nos résultats à d'autres recherches. Toutefois, il est possible de le faire pour le nombre de tâches à traiter ainsi que le taux d'utilisation du système.

Ainsi, comme il a été mentionné au chapitre deux, Askin et al. (1999) ont démontré dans leurs travaux que les variations du taux d'utilisation des postes de travail influençaient grandement les résultats obtenus. En effet, dans leur étude, le temps passé dans le système était significativement plus élevé lorsque le taux d'utilisation était de 85% que lorsqu'il était de 75% quelque soit le type d'aménagement (fonctionnel ou distribué). Nos résultats vont dans le même sens.

En effet, ils illustrent notamment que plus on se rapproche de la pleine occupation (91,67%), plus une augmentation du taux d'occupation a un impact important sur les distances parcourues et ce peu importe la configuration retenue.

Nos résultats se distinguent toutefois en faisant ressortir que l'aménagement distribué bénéficie plus grandement d'une baisse du taux d'utilisation que l'aménagement fonctionnel.

Le second paramètre à comparer est le nombre de tâches à réaliser pour une même commande. Askin et al. (1999) ont également testé l'effet du nombre de tâches à

traiter au cours d'une même commande. Leurs résultats illustrent que si l'aménagement compte peu de machine (30), le temps par tâche moyen est sensible au nombre total de tâches à exécuter (ils observent une augmentation significative après être passé de 5 à 15 tâches). Toutefois, quand on compte plus de machines (avec 60 machines), ces temps moyens sont plutôt stables (ils observent une très légère baisse après être passés de 5 à 15 tâches).

Dans notre cas, avec 144 postes de travail de douze types différents nous obtenons des résultats très semblables peu importe le nombre de tâches à compléter par commande. Ce qui semble confirmer que, plus on augmente le nombre de postes de travail dans un aménagement, plus la distance moyenne par tâche tend à se stabiliser.

#### **5.4 Conclusion**

Au cours de ce chapitre nous avons présenté et analysé les résultats de notre simulation. Nous avons ainsi comparé les aménagements fonctionnel et distribué et permis de démontrer l'hypothèse que l'utilisation d'un aménagement distribué permet de réduire les distances parcourues dans le traitement d'une commande de 4 à 74% en comparaison à l'aménagement fonctionnel. À l'aide du test de Student, nous avons également démontré que ces résultats étaient statistiquement significatifs.

En effet, la comparaison des deux formes d'aménagement au niveau des statistiques descriptives tel que la moyenne, la médiane et l'écart-type des distances indique des valeurs toujours plus petites en aménagement distribué qu'en aménagement fonctionnel.

Nos résultats permettent aussi de déterminer dans quels contextes ces améliorations sont les plus importantes. Nous avons utilisé 4 paramètres

secondaires et avons déterminé leurs impacts sur les distances. Ces derniers ont été divisés en deux catégories soient ceux dits fixes et ceux dits variables. Pour la première catégorie de paramètres, nous avons démontré qu'une forme d'aménagement concentrique (carré de 12/12) diminue globalement la distance à parcourir et les écarts entre les aménagements distribué et fonctionnel. Pour la seconde catégorie, nous avons démontré, comme les auteurs précédents, qu'une augmentation du taux d'utilisation entraîne une augmentation des distances à parcourir. Fait nouveau, nous avons aussi fait ressortir qu'une telle augmentation du taux d'utilisation implique une réduction des écarts entre les aménagements distribué et fonctionnel. En d'autres termes, pour bénéficier des avantages d'un aménagement distribué, il est primordial d'avoir une certaine marge de manœuvre du point de vue de la capacité. Enfin, nous avons démontré que le nombre de tâches présentes dans une commande, si nous traitons l'information en distance par tâche et non en distance totale, n'a pas d'impact significatif ni sur les distances parcourues ni sur les écarts entre les aménagements fonctionnels et distribués.

Bien qu'il soit toujours préférable de choisir l'aménagement distribué, il existe des situations où ses performances se rapprochent de celles de l'aménagement fonctionnel. Cette distinction peut s'avérer très importante dans le processus décisionnel d'un gestionnaire à choisir l'un ou l'autre des types d'aménagement, mais plus encore sur les autres choix de pratiques de gestion relatives aux variables utilisées dans cette recherche.

Toute chose étant égale par ailleurs, un gestionnaire aurait avantage à choisir l'aménagement distribué comme première forme d'aménagement s'il désire réduire les déplacements nécessaires entre les différentes opérations. Par contre, effectuer un réaménagement, pour passer d'un aménagement fonctionnel à un aménagement distribué, n'est pas forcément avantageux. Il est alors nécessaire d'évaluer le contexte, c'est-à-dire les valeurs des paramètres, afin de vérifier s'il l'on ne se retrouve pas dans une situation où les deux types d'aménagement offrent des performances similaires. Le principal paramètre à considérer est alors

le taux d'occupation. Dans le cas d'une utilisation à pleine capacité du système ( $\geq 91,67\%$ ), la dispersion des postes de travail de l'aménagement distribuée ne permet pas de limiter les déplacements de façon significative. Il n'y aurait alors pratiquement aucun gain à faire quant aux distances parcourues dans le traitement d'une commande en procédant à un réaménagement. À l'inverse dans un contexte d'un local non concentrique, avec une bonne marge de surcapacité et une grande diversité (ou incertitude) des séquences de fabrication des produits, l'aménagement distribué est très avantageux.

Pour minimiser les distances de façon absolue, la meilleure stratégie est d'opter pour un aménagement distribué dans un format concentrique et de fixer la capacité de telle sorte que le taux d'utilisation du système soit en deçà d'un certain seuil (nos résultats montrent que les distances doublent entre  $75\%$  et  $91,67\%$ ).

Au chapitre suivant, la conclusion, nous ferons le sommaire de notre réflexion sur la comparaison des aménagements fonctionnel et distribué.

## **Chapitre 6**

### **Conclusion**

Ce chapitre se veut l'aboutissement de notre recherche. Nous y présenterons un sommaire de l'étude, les principales contributions qu'elle offre, ses limites et finalement différentes avenues de recherches futures pouvant améliorer notre travail.

#### **6.1 Sommaire**

Au cours de la présente étude, nous avons comparé les aménagements fonctionnel et distribué et plus précisément, nous avons cherché à connaître, dans différents contextes, l'ampleur des réductions des distances à parcourir.

Traditionnellement, l'aménagement fonctionnel se voulait le choix tout indiqué pour faire face aux difficultés liées à un contexte de production changeant, donc avec un grand besoin de flexibilité dans ses installations d'équipements et de postes de travail. Selon la littérature recensée, une nouvelle option s'offre maintenant aux gestionnaires devant jongler avec cette réalité : l'aménagement distribué. Il s'agit d'un aménagement à contre courant qui cherche à disperser plutôt qu'à regrouper les postes de travail dans l'espace donné.

Les différentes recherches faites sur le sujet demeurent pour le moment théoriques en se basant sur la simulation et cherchent à comparer différents aménagements dits flexibles quant à leur performance sous différentes variations de paramètres.

Cette performance est généralement représentée par les distances qui doivent être parcourues pour l'accomplissement d'une commande. Dans tous les cas, l'aménagement distribué se voit avantagé à ce niveau. Toutefois, nous désirons porter plus loin cette analyse en soumettant précisément les aménagements fonctionnel et distribué à d'autres paramètres pour agrandir les possibilités de contexte de production et déterminer pour chacun l'ampleur de ces réductions.

Nous avons donc nous aussi choisi d'utiliser la simulation comme méthode de recherche. Nous avons par la suite défini notre cadre méthodologique en précisant comment seraient construits les aménagements (leurs formes, leur taille, le nombre de départements, la répartition des postes de travail, le contexte de production), comment se ferait le calcul des distances entre deux postes de travail et finalement le nombre d'essais qui seraient effectués. Ce sont dans les choix effectués dans la construction des aménagements que se définissent les paramètres de notre étude. Nous avons en effet choisi de travailler avec trois formes d'aménagement soient deux rectangles de proportions différentes et un carré. Nous avons établi le nombre de postes de travail à 144 ce qui donne des tailles d'aménagement, relativement aux formes déjà mentionnées, de 4 par 36, 8 par 18 et 12 par 12. Au niveau du contexte de production, nous avons testé deux éléments soient la stabilité de la séquence de production et le taux d'utilisation. Nous avons donc expérimenté une séquence de production triée, c'est-à-dire où les postes de travail sont toujours visités dans le même ordre et une séquence aléatoire. Pour le taux d'utilisation nous avons utilisé trois valeurs représentatives d'un système presque vide (50%), à pleine capacité (91,67%) et une mesure intermédiaire (75%).

Le simulateur a été développé en VBA sous Excel. Il construit les aménagements, génère les commandes à être traitées et exécute le programme sous les différents contextes déterminés par l'utilisateur. Enfin, il calcule les distances totales parcourues pour chacune des commandes et en tire les statistiques descriptives de base.

Les résultats présentés au chapitre 5 nous permettent donc de répondre à notre question de recherche à savoir quel est l'ampleur des réductions de distance de l'aménagement distribué par rapport à l'aménagement fonctionnel et ce sous différents contextes. Tel que démontré par les auteurs précédents, l'aménagement distribué permet de réduire les distances parcourues et ce, dans tous les contextes. Toutefois, notre recherche permet d'apporter certaines nuances à cette affirmation. Les réductions se situent entre 4 et 74%. Les plus importantes se retrouvant dans les contextes où le taux d'occupation est le plus faible et la forme de l'aménagement est un rectangle très disproportionné. Nous avons également constaté que le nombre de tâche compris dans une commande augmente certes la distance totale, mais a très peu d'impact sur la distance moyenne par tâche.

Nous avons par la suite démontré que les résultats obtenus (les écarts entre les aménagements distribué et fonctionnel) étaient statistiquement significatifs excepté dans le contexte où une commande comporte seulement deux tâches et que le système est occupé à 91.67%. En effet, dans ces cas, il n'est pas possible d'avoir de présomption contre l'hypothèse nulle.

Les résultats de notre recherche vont dans le même sens que ceux présentés par les autres auteurs au niveau de l'impact du taux d'utilisation sur les performances de l'aménagement distribué, mais présentent aussi de nouvelles conclusions qui seront discutés à la section suivante.

## **6.2 Contributions de la recherche**

Notre recherche se démarque des précédentes par les nouvelles connaissances qu'elle apporte à la comparaison des aménagements fonctionnel et distribué, précisément au niveau de la distance. Comme il a été mentionné précédemment, nous avons focalisé notre attention à chiffrer l'ampleur de la diminution des distances à parcourir déjà soulevée par les auteurs présentés et prouvée une fois de

plus par notre étude. D'abord, selon les contextes de production simulés, l'aménagement distribué permet au minimum des réductions de 4% par rapport à ce qui est nécessaire en aménagement fonctionnel et peut atteindre un maximum de 74%. Cet écart est relatif à l'implication des paramètres secondaires. Nous avons ainsi déterminé que le taux d'occupation est le paramètre qui limite le plus les réductions de distances permises par l'aménagement distribué. En effet, lorsque le système est utilisé à pleine capacité (91.67%), l'ampleur des réductions se limite entre 4% et 18% lorsqu'il y a utilisation du tri et seulement 6% lorsque la séquence est aléatoire.

La seconde contribution est liée à la démonstration de l'influence de la forme de l'aménagement sur les distances. Nous avons prouvé que l'aménagement distribué convient parfaitement aux installations rectangulaires, surtout s'ils sont très disproportionnés. En effet, l'aménagement distribué est nettement moins affecté du point de vue des distances parcourues que l'aménagement fonctionnel par le fait qu'un site ne soit pas concentrique. Si l'on combine ce paramètre à ce qui a été mentionné précédemment avec le taux d'utilisation, on se rend compte que les écarts pour le rectangle disproportionné avec des taux d'utilisation de 50% ou 75% sont au minimum à 47% allant jusqu'au maximum annoncé de 74%.

Notre recherche permet donc d'établir le pont entre la théorie et la pratique en donnant au gestionnaire des outils d'analyse à savoir si l'aménagement distribué peut être bénéfique dans le contexte de son entreprise. En effet, la combinaison des différents paramètres trace un portrait large des contextes de gestion et permet de définir la robustesse de ces réductions par leur ampleur et également par leur stabilité avec les fluctuations possibles au niveau des paramètres.

Nos résultats peuvent être utilisés en deux temps. D'abord initialement dans la construction d'un système de production et également dans l'analyse des bénéfices liés à un réaménagement. Dans un contexte où la réduction des distances à parcourir dans le système est importante, un gestionnaire aurait donc avantage à se

baser sur nos conclusions dans ses décisions. Dans un choix initial, il aurait avantage à opter pour un aménagement distribué, de format carré et d'avoir une capacité de production qui excède la demande (de telle sorte qu'on bénéficie d'une certaine marge de manœuvre dans le choix de machines d'un même type). Toutefois, avant de changer de type d'aménagement, en passant de fonctionnel à distribué, on devra se positionner par rapport aux paramètres secondaires et chercher à savoir si l'ampleur des réductions dans ces circonstances est satisfaisante.

### **6.3 Limites de la recherche**

La première limite de notre recherche est liée à la méthodologie. Une simulation demeure conceptuelle et n'est qu'une représentation de la réalité. Ses résultats sont déterminés par les sous-jacents que nous avons définis. Ils sont donc théoriques et demandent à être prouvés dans le contexte d'une entreprise établie. Les autres limites se situent donc dans les choix que nous avons faits dans l'établissement de notre cadre méthodologique.

D'abord nous n'avons pas tenu compte des entrées et des sorties des commandes dans le système. Nous avons simplement calculé les distances à franchir pour parcourir les différents postes de travail nécessaires à la réalisation des tâches sans se soucier d'un point commun où devaient débiter et se terminer les commandes. Ceci étant relatif à de plus grandes décisions d'aménagement à savoir où se situent les espaces de réception et d'expédition des marchandises.

Une autre limite liée à l'aménagement est au niveau des formes que nous avons choisies. Il s'agit en effet de formes standards et complètes. Nous n'avons donc pas testés des formes atypiques telles que des L, des T, des U ou encore des aménagements à deux étages. Nous pouvons simplement supposer que ces formes

ont des caractéristiques qui se rapprochent de ce que nous avons testé par le rectangle disproportionné, c'est-à-dire non concentrique.

Lors de la construction de nos aménagements nous n'avons établi aucune limite ou contrainte quant au positionnement et à la taille des postes de travail. Ainsi tous les postes de travail étaient de même taille et pouvaient se situer n'importe où, ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité. Une installation de traitement thermique par exemple ne peut se diviser en petites parties et être dispersée dans l'espace. De plus, il arrive que certains postes de travail ne puissent pas être positionnés l'un auprès de l'autre. Finalement, tous les postes de travail n'ont pas forcément besoin du même espace.

Plusieurs autres paramètres sont aussi symétriques. Nous avons, par exemple, utilisé des taux d'occupation constants (50%, 75% et 91.67%) plutôt que des taux moyens dont la valeur aurait pu varier durant la simulation. C'est donc dire que tous les types de machines étaient utilisés au même taux au même moment. Dans la réalité, les ressources d'une entreprise ne sont pas nécessairement aussi parfaitement équilibrées.

Le dernier groupe de limites se situe au niveau des déplacements. D'une part, nous n'avons pas tenu compte de la coordination du trafic engendré par nos déplacements puisque notre simulation tient compte du traitement d'une seule commande à la fois, dans un contexte fixe. Ensuite, les distances étudiées sont théoriques puisque nous avons utilisé la distance directe en deux postes de travail. Dans la réalité, les marchandises ne peuvent passer au travers des postes de travail pour obtenir le chemin le plus court, mais doivent emprunter des routes définies.

#### 6.4 Avenues de recherches

Le présent travail inspire des sources d'amélioration et de nouvelles possibilités pour d'éventuelles recherches. Il serait certes intéressant de corriger certaines limites présentées précédemment en poussant plus loin le travail. Nous pourrions inclure la simulation dans un cadre plus réel en le rendant dynamique. Le système pourrait donc traiter simultanément plusieurs commandes et ainsi avoir à gérer les postes de travail vacant et la circulation engendrée par les déplacements entre les postes de travail.

Il serait aussi intéressant de voir si le fait de tirer les commandes à traiter avant de procéder à la répartition des postes de travail permet d'optimiser les résultats. Il est probable qu'en plaçant, comme d'autres auteurs l'ont fait, les postes de travail ayant une plus grande probabilité des chances d'être visités successivement près l'un de l'autre améliore les résultats déjà obtenues.

Une autre amélioration potentielle se situe au niveau de la méthode utilisée dans le choix des postes de travail à visiter. Dans la présente étude, nous avons utilisé un algorithme Glouton qui travaille de façon myope en choisissant les postes de travail individuellement. Il minimise donc la distance à parcourir un à la fois sans tenir compte des prochains postes de travail à visiter. Il pourrait être intéressant d'utiliser une méthode plus globale qui choisirait le chemin le plus court pour traverser tous les postes de travail nécessaires à la réalisation de la commande.

Finalement, la dernière avenue de recherche proposée serait de faire une nouvelle étude comparative, mais cette fois en confrontant l'aménagement distribué à l'aménagement cellulaire. Il serait intéressant de savoir si ce type d'aménagement non-traditionnel, mais déjà bien implanté en industrie offre des résultats semblables au niveau des distances à parcourir par rapport à cet aménagement de nouvelle génération.

## Bibliographie

AFENTAKIS Panos, Robert A. MILLEN et Marius M. SOLOMON (1990). « Dynamic layout strategies for flexible manufacturing systems », », *International Journal of Production Research*, vol.28, no.2, p.311-323.

ASKIN R.G., F.W. CIARALLO ET N.H. LUNDGREN (1999). « An empirical evaluation of holonic and fractal layouts », *International Journal of Production Research*, vol. 37, no.5, p. 961-978.

BANKS Jerry (2004), *Getting Started with AutoMod*, Chelmsford, Brooks Automation, Inc., 602 p.

BENJAAFAR Saifallah et Mehdi SHEIKHZADEH (2000). « Design of flexible plant layouts », *IIE Transactions*, vol. 32, no. 4, p. 309-322.

BENJAAFAR Saif, Sunderesh S. HERAGU et Shahrukh A. IRANI (2002). « Next generation factory layouts : Research challenges and recent progress », *Interfaces*, vol. 32, no. 6 (novembre-décembre), p. 58-76.

BERMAN, G.P. ET F.M. IZRAILEV (2005) « The Fermi-Pasta-Ulam problem: 50 years of progress », *Chaos*, vol. 15, no 1. 18 pages.

CORMEN Thomas H., Charles E. LEISERSON, Charles E., Ronald L. RIVEST (1990). *Introduction to Algorithms*, première édition, Cambridge, MIT Press and McGraw-Hill, 1048 p.

MONTREUIL Benoit, Pierre LEFRANCOIS, Suzanne MARCOTTE et Uday VENKATADRI (1993). *Layout for chaos – Holographic layout of manufacturing systems operating in highly volatile environments*, document de travail no. 93-53, Québec, Université Laval, 23 p.

NOLLET Jean, Joseph KELADA et Mattio O. DIORIO (1994). *La gestion des opérations et de la production : une approche systémique*, Montréal, Gaetan Morin Éditeur, 661p.

STEVENSON William J. et Claudio BENEDETTI (2001 – 2012). *La gestion des opérations : produits et services* (version française de *Production/Operations Management*, 1999, sixth edition, STEVENSON William J., traduit par Claudio BENEDETTI), Montréal, Les éditions de la Chenelière, 767 p.

WASSERMAN, Larry (2004). *All of Statistics : A Concise Course in Statistical Inference*, New York, Springer-Verlag, 461 p.