
Un algorithme basé sur la théorie d'électromagnétisme pour l'ordonnancement temps réel dans un FMS avec flexibilité de routage

Souier Mehdi, Hassam Ahmed et Sari Zaki

*Laboratoire d'Automatique de Tlemcen, Faculté des sciences de l'ingénieur,
Université d'Abou Bekr Belkaid, BP 230, Tlemcen 13000, Algérie
{m_souier,a_hassam,z_sari}@mail.univ-tlemcen.dz*

RÉSUMÉ .Dans cet article, nous nous proposons de développer un algorithme basé sur la métaheuristique « Electromagnétisme » pour la sélection de routages en temps réel dans un FMS avec et sans panne, et de comparer les performances de cette métaheuristique avec les méthodes DMM (Dissimilarity Maximization Method) et DMM modifiée afin d'avoir une idée sur l'efficacité de cette métaheuristique pour la sélection des routages alternatifs en temps réel. Pour valider les résultats de cette étude, nous avons simulé la DMM et la DMM modifiée sur un FMS modèle en utilisant ARENA, et électromagnétisme a été simulé en utilisant Java sur le même modèle.

Nous avons constaté que cette métaheuristique a nettement amélioré le taux de production, le taux d'utilisation des machines et du système de transport, pour un système de production FMS saturé avec et sans présence de pannes.

ABSTRACT. In this article, we developed an algorithm based on electromagnetism metaheuristic for alternative routing selection in real time in an FMS with and without breakdowns and compared their performances with methods DMM (Dissimilarity Maximization Method) and modified DMM in order to have an idea on the effectiveness of this metaheuristic for alternative routing selection in real time . To validate the results of this study, we simulated DMM and modified DMM on a FMS model using ARENA and electromagnetism was simulated using Java on the same model.

We noted that this metaheuristic improved the production rate, the utilisation ratio of the various machines and the utilisation ratio of the material handling system, for a saturated FMS with and without breakdowns.

MOTS-CLÉS : Système de production flexible, Routage alternative, Règle de sélection de routage, Métaheuristiques, Electromagnétisme.

KEYWORDS: Flexible manufacturing system, Alternative routing, Routing selection rule, Metaheuristics, Electromagnetism.

1. Introduction

Aujourd'hui, les entreprises doivent faire face à l'augmentation de la concurrence, à la pression de plus en plus forte de leur environnement (clients et concurrents) pour un renouvellement rapide des produits, mais aussi une augmentation de l'offre vis à vis de la demande. Les systèmes de production et de fabrication actuels offrent une grande flexibilité, tel que les systèmes flexible de production (FMS) qui fournissent des avantages divers comme l'augmentation de l'utilisation des ressources, l'augmentation de la productivité, la réduction des encours...etc. (Hassam, 2006).

Les ateliers flexibles avec des ressources limités, des pannes de machines aléatoires ou des critères de production multiples ont un aspect qui explique que les problèmes d'ordonnancement dans ces systèmes sont généralement de type NP complet. C'est pour cela, que pour ce genre de système, il faut développer des algorithmes efficaces.

Afin de tirer pleinement partie de la flexibilité offerte par ces systèmes, les décisions d'allocation et d'ordonnancement des opérations et des plans de processus sont généralement prises dynamiquement et à très court terme, en fonction de l'état du système de production (disponibilité des ressources, disponibilité du système de manutention, présence de goulots d'étranglement), des caractéristiques du plan de production (date échues des ordres de fabrication) et des objectifs de production (augmentation du taux de production, réduire les en cours) (Mebarki, 1994).

Plusieurs chercheurs proposent différentes méthodes pour fournir une flexibilité à l'ordonnancement en temps différé afin d'augmenter les performances des systèmes (Saygin et al, 1996), (Saygin et al, 2001).

Cependant, l'ordonnancement temps réel reste toujours le but souhaitable mais insaisissable (Basnet et al, 1994), (Shukla et al, 1996). D'autres chercheurs ont réussi à donner une flexibilité de routage en temps réel. (Saygin et Kilic, 1999) ont proposé une plateforme qui intègre le processus de planification flexible et l'ordonnancement prédictif (en temps différé), il ont présenté un concept nommé dissimilarity maximisation method (DMM) pour minimiser la congestion dans un FMS, l'idée de cette règle c'est de maximiser les dissimilitudes entre les routages occupés. L'efficacité de cette règle dans la résolution des problèmes de sélection de routage en temps réel a été démontré dans (Saygin et al, 2001) et (Ghomri et Sari 2007) où elle a dépassé d'autres règles tel que FIFO/FA (first-in first-out/ first available) et equal probability loading (EPL) si chaque machine utilise la règle FIFO, et dans (Saygin et kilic, 2004) où les trois règles ont été combinée avec d'autres règles de priorité. Dans l'étude de (Hassam et Sari, 2007) sur la règle DMM, Il ont remarqué que pour un taux d'arrivée de pièces important et pour une faible capacité de files d'attente faible le système de production est saturé et le taux d'utilisation des machines et du transporteur est assez faible, ce qui va influencer sur les performances du système de production. Pour cela ils ont proposé la règle DMM

modifiée qui est une modification de la règle DMM qui vise à garder le même principe mais si tous les routages sont sélectionnés par des pièces, la pièce suivante va être acheminée dans le routage où la file d'attente de la première machine de ce routage, contient au moins une place libre.

Les métaheuristiques sont des algorithmes de type stochastique visant à résoudre une large gamme de problème d'optimisation difficile, pour lesquels on ne connaît pas de méthodes classiques plus efficace. Souvent inspirées d'analogies avec la réalité comme la physique (recuit simulé, diffusion simulée...) la biologie (algorithmes évolutionnaires, recherche tabou...) et l'éthologie (colonies de fourmis, essaims particulaires...). Elles sont généralement conçues au départ pour des problèmes discrets, mais peuvent s'adapter aux autres types de problèmes.

Dans (Souier et al, 2008) nous avons adapté plusieurs métaheuristiques (les colonies de fourmis, les algorithmes génétiques, les essaims de particules, le recuit simulé, recherche tabous et l'électromagnétisme) pour résoudre le problème de sélection de routage dans un FMS avec un nombre important de pièces mais en temps différé.

Dans ce travail nous nous intéressons à électromagnétisme métaheuristique et nous allons présenter une étude comparative entre cette métaheuristiques et les règles DMM, et DMM modifiée afin d'avoir une idée sur l'efficacité de cette technique.

Pour valider les résultats de notre étude, nous avons simulé les méthodes DMM et DMM modifiée dans un FMS par le logiciel de simulation ARENA, et électromagnétisme métaheuristiques a été programmée en Java et exécutée dans un Core (TM) 2 Duo CPU avec 2.2 GHZ et 1 GO de RAM.

Le reste de cet article s'articule autour de trois sections. Dans la première nous définissons le contexte du travail présenté. Dans la deuxième section, nous définissons les règles DMM, DMM modifiée et le mode de fonctionnement d'électromagnétisme métaheuristique. La dernière section est consacrée aux résultats.

2. Présentation du modèle FMS étudié

Pour faire la comparaison entre les deux règles DMM, DMM modifiée et les métaheuristiques, nous avons étudié et simulé un système flexible de production.

Ce système contient sept machines et deux stations : une station de chargement et une de déchargement. Six types de pièces différentes sont traités dans le système.

Les machines et les stations qui composent le système étudié sont définies comme suit :

- Deux fraiseuses verticales (FV).

- Deux fraiseuses horizontales (FH).
- Deux tours (T).
- Une toupie (TP).
- Une station de chargement (SC).
- Une station de déchargement (SD).

Chaque machine comporte une file d'attente d'entrée et une file d'attente de sortie, la station de chargement contient aussi une file d'attente d'entrée.

La configuration du système flexible de production est donnée dans la figure suivante :

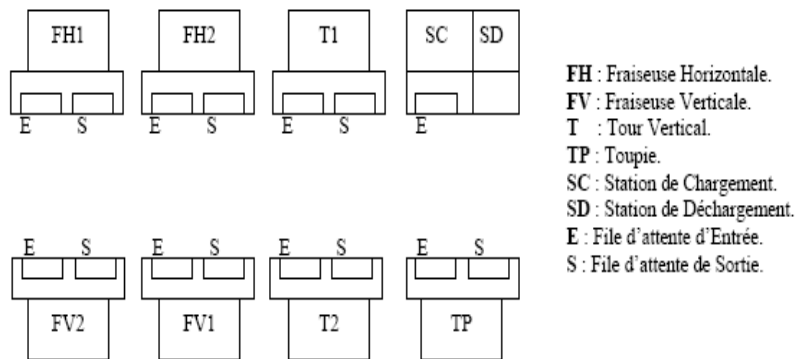


Figure 1 : Configuration du modèle FMS étudié (Saygin et al, 2001).

Les opérations sur le système flexible de production étudié sont basées sur les suppositions suivantes :

- Les routages alternatifs de chaque type de pièce sont connus avant le début de la production.
- Le temps de traitement est déterminé et il comprend le temps de changement des outils et le temps d'exécution de la machine.
- Le temps de traitement d'une opération est le même sur les machines alternatives identifiées pour cette opération.
- Chaque machine peut traiter une seule pièce à la fois.

Les routages alternatifs et les temps de traitement de chaque type de pièce sont donnés dans le tableau 1.

Type de pièces	Taux d'arrivée	Routage et temps de traitement (min)
A	17 %	SC – T1 (30) – FV1 (20) - SD
		SC – T1 (30) – FV2 (20) - SD
		SC – T2 (30) – FV1 (20) - SD
		SC – T2 (30) – FV2 (20) - SD
B	17 %	SC – T1 (20) – TP (1) – FV1 (15) – SD
		SC – T1 (20) – TP (1) – FV2 (15) – SD
		SC – T2 (20) – TP (1) – FV1 (15) – SD
		SC – T2 (20) – TP (1) – FV2 (15) – SD
C	17 %	SC – T1 (40) – FV1 (25) - SD
		SC – T1 (40) – FV2 (25) – SD
		SC – T2 (40) – FV1 (25) – SD
		SC – T2 (40) – FV2 (25) - SD
D	21 %	SC – T1 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH1 (35) – SD
		SC – T1 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH2 (35) – SD
		SC – T1 (40) – TP (1) – T2 (20) – FH1 (35) – SD
		SC – T1 (40) – TP (1) – T2 (20) – FH2 (35) – SD
		SC – T2 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH1 (35) – SD
		SC – T2 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH1 (35) – SD
		SC – T2 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH1 (35) – SD
		SC – T2 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH1 (35) – SD
E	20 %	SC – T1 (25) – TP (1) – T1 (35) – FH1 (50) – SD
		SC – T1 (25) – TP (1) – T1 (35) – FH2 (50) – SD
		SC – T1 (25) – TP (1) – T2 (35) – FH1 (50) – SD
		SC – T1 (25) – TP (1) – T2 (35) – FH2 (50) – SD
		SC – T2 (25) – TP (1) – T1 (35) – FH1 (50) – SD
		SC – T2 (25) – TP (1) – T1 (35) – FH2 (50) – SD
		SC – T2 (25) – TP (1) – T2 (35) – FH1 (50) – SD
		SC – T1 (25) – TP (1) – T2 (35) – FH2 (50) – SD
F	8 %	SC – FH1 (40) – SD
		SC – FH2 (40) – SD

Tableau 1 : Routages alternatifs et temps de traitement des pièces (Saygin et al, 2001).

3. Méthodes simulées et électromagnétisme métaheuristique

3.1. La règle DMM (Saygin et al, 2001)

Dans ce paragraphe nous présentons la règle DMM (Dissimilarity maximization method) en proposant son algorithme où nous allons montrer les différentes étapes à suivre pour intégrer la règle DMM comme outil de sélection de routages alternatifs en temps réel.

Nous montrons dans ce qui suit, la manière d'appliquer la règle DMM dans un système flexible de production afin de sélectionner un routage parmi les routages disponibles pour chaque type de pièce. Les pièces qui arrivent en premier ont la plus grande priorité suivant la règle FIFO (First in First out), les autres pièces restent en attente dans les files d'attente d'entrée ou de sortie des différentes machines ou dans la station de chargement. L'algorithme de la règle DMM est donné comme suit:

Etape 1 : Tous les routages sont libres (disponible) donc $X(i) = 0$.

Où $X(i)$ représente le coefficient de disponibilité du routage i , il prend la valeur 0 ou 1.

Etape 2 : Calcul des coefficients de dissimilitude D_{ij} comme suit :

$$D_{ij} = \frac{\text{Nombre de types de machines non communes entre les routages } i \text{ et } j}{\text{Le nombre total des machines entre les routages } i \text{ et } j}$$

Etape 3 : Arrivée des pièces.

Etape 4 : Selon le type de la pièce testée s'il y'a au moins un routage libre et au moins une place libre dans la file d'attente de la station de chargement.

Etape 5 : Si la condition précédente n'est pas vérifiée, la pièce va dans une file d'attente jusqu'à ce que la condition soit vérifiée.

Etape 6 : Si la condition de l'étape 4 est vérifiée alors on calcule la somme :

$$S(j) = \sum_{i=1}^q X(i) * D(i, j)$$

Où $D(i, j)$ Coefficient de dissimilitude.

Etape 7 : Trouver le maximum de $S(j)$.

Etape 8 : Le routage j correspondant à la valeur de $S(j)$ trouvée dans l'étape précédente est occupé donc : $X(j)=1$ (Le routage j contient une seule pièce à la fois).

Etape 9 : Traitement de la pièce selon le routage sélectionné j .

Etape 10 : A la fin du traitement, le routage devient de nouveau disponible $X(j)=0$.

Etape 11 : Sortie de la pièce du système.

REMARQUE. — Ce cycle va se répéter de l'étape 3 à l'étape 11 à chaque arrivé d'une pièce, jusqu'au un critère d'arrêt est atteint.

3.2. La règle DMM modifié (Hassam and Sari,2007)

Dans cette section nous allons expliquer la règle DMM modifiée qui a été développée à partir de la règle DMM déjà citée précédemment, Cette règle est aussi utilisée dans la sélection des routages alternatifs en temps réel dans un FMS.

Dans la règle DMM, après avoir sélectionné un routage pour une pièce, ce routage ne peut pas être utilisé par une autre pièce tant que la première pièce n'est pas sortie du système donc chaque routage ne peut contenir qu'une seule pièce à la fois. La modification de cette règle vise à garder le même principe qui dépend de la maximisation des coefficients de dissimilitude pour la sélection des différents routages alternatifs mais en affectant plusieurs pièces à un seul routage. Alors si tous les routages sont sélectionnés par une pièce, la pièce suivante va être acheminée dans le routage où la file d'attente de la première machine de ce routage, contient au moins une place libre.

Dans ce paragraphe nous montrons l'intégration de la règle DMM modifiée, dans un système flexible de production pour la sélection d'un routage alternatif parmi les routages disponibles pour chaque type de pièce. Les pièces arrivant en premier ont une priorité plus élevée suivant la règle FIFO (First In First Out) les autres pièces restent en attente dans les files d'attentes d'entrée ou de sortie des différentes machines ou dans la station de chargement. La règle DMM modifiée va utiliser l'algorithme suivant pour la sélection des routages alternatifs en temps réel dans un système flexible de production.

Etape 1 : Tous les routages sont libres (disponible) donc $X(i) = 0$.

Où $X(i)$ représente le coefficient de disponibilité du routage i , il prend la valeur 0 ou 1.

Etape 2 : Calcul des coefficients de dissimilitude D_{ij} comme suit :

$$D_{ij} = \frac{\text{Nombre de types de machines non communes entre les routages } i \text{ et } j}{\text{Le nombre total des machines entre les routages } i \text{ et } j}$$

Etape 3 : Arrivée des pièces.

Etape 4 : Selon le type de la pièce testée :

- S'il y'a au moins un routage libre et au moins une place libre dans la file d'attente de la station de chargement. Ou,
- Si tout les routages sont occupés et la file d'attente d'entrée des premières machines de ces routages contient au moins une place libre et ces machines ne sont pas en panne.

Etape 5 : Si la condition précédente n'est pas vérifiée, la pièce va dans une file d'attente jusqu'à ce que la condition soit vérifiée.

Etape 6 : Si la condition de l'étape 4 est vérifiée alors on va calculer la somme :

$$S(j) = \sum_{i=1}^q X(i) * D(i, j)$$

Où D (i, j) Coefficient de dissimilitude.

Etape 7 : Tester, si on a trouvé un maximum de S(j) (Il y'a des routages libres).

Etape 8 : Si la condition précédente est vérifiée alors, aller à l'étape 10.

Etape 9 : Si la condition de l'étape 7 n'est pas vérifiée, alors sélectionner le routage

Où la file d'attente d'entrée de sa première machine contient au moins une place libre.

Etape 10 : Le routage j sélectionné d'après l'étape 7 ou l'étape 9 est donc occupé, $X(j)=1$.

Etape 11 : Traitement de la pièce selon le routage sélectionné j.

Etape 12 : A la fin du traitement, le routage devient de nouveau disponible $X(j)=0$.

Etape 13 : Sortie de la pièce du système.

REMARQUE. — Ce cycle va se répéter de l'étape 3 à l'étape 11 à chaque arrivée d'une pièce, jusqu'au un critère d'arrêt est atteint.

3.3. *Électromagnétisme (electromagnetism like method : EM)*

Electromagnétisme métaheuristique a été proposé par Birbil et Fang en 2003 (Birbil et al, 2003) pour résoudre les problèmes d'optimisation difficile continus efficacement. Elle a été inspirée d'une analogie du mécanisme attraction-répulsion de la théorie d'électromagnétisme, elle est basée sur une population.

Dans cette approche la charge de chaque point est relative à la valeur de la fonction objective que nous essayons d'optimiser. Cette charge détermine également l'attraction ou la répulsion du point.

D'ailleurs, la force électrostatique entre deux points est directement proportionnelle aux charges de ces points et inversement proportionnelle au carré de la distance entre ces points. La charge fixe de chaque particule est donnée comme suit :

$$q_i = \exp\left(-n * \left(f(x_i) - f(x_{best}) / \left(\sum_{k=1}^m (f(x_k) - f(x_{best}))\right)\right)\right), \forall [1]$$

Où q_i est la charge de particule i , $f(x_i)$, $f(x_{best})$, et $f(x_k)$ sont les valeurs des fonctions objectives des particules i , la meilleure particule, et la particule k . m est la taille de la population et n la dimension du problème.

La qualité de solution ou la charge de chaque particule détermine l'effet d'attraction et de répulsion dans la population. Une meilleure solution encourage d'autres particules à converger aux vallées attrayantes tandis qu'une mauvaise solution décourage les autres particules pour se déplacer vers cette région.

Ces particules se déplacent avec toute la force et ainsi des solutions diversifiées sont produites. La formulation suivante donne la force de la particule i .

$$F_i = \sum_{j \neq i}^m \left\{ \begin{array}{l} (x_j - x_i) * \frac{(q_i * q_j)}{\|x_j - x_i\|^2} : f(x_j) < f(x_i) \\ (x_i - x_j) * \frac{(q_i * q_j)}{\|x_j - x_i\|^2} : f(x_j) \geq f(x_i) \end{array} \right\}, \forall i \quad [2]$$

Le générique pseudo-code de cette métaheuristique est le suivant:

Initialiser les points

Tant que (critère d'arrêt non atteint) faire

Effectuer une recherche locale pour chaque particule.

Calculer la force total $F()$ de chaque particule.

Déplacer la particule par $F()$.

Evaluer les particules $()$.

Fin Tant que

Dans cet algorithme, il y a quatre procédures : l'initialisation, la recherche locale, le calcul de la force totale et le déplacement par rapport à la force totale.

L'initialisation est utilisée pour distribuer les m points uniformément dans une région faisable. La procédure suivante est d'effectuer une recherche locale autour d'un point pour avoir de bonnes solutions. Les procédures du EM algorithme sont : calcul de la force totale et le déplacement par rapport à la force total, la première procédure est utilisée pour calculer la force totale de chaque point (formule [2]), et l'autre consiste à déplacer le particule (point) selon la direction de la force total de ce point. Le pseudo code de la procédure de déplacement est le suivant (Birbil et al, 2003):

Pour $i := 1$ to m faire

Si $i \neq \text{best}$ alors

$$\lambda = U(0, 1)$$

$$F_i = F_i / \|F_i\|$$

Pour $k = 1$ to n faire

Si $F_k^i > 0$ alors

$$x_k^i = x_k^i + \lambda \cdot F_k^i \cdot (u_k - x_k^i)$$

Sinon

$$x_k^i = x_k^i + \lambda \cdot F_k^i \cdot (x_k^i - l_k)$$

Fin si

Fin pour

Où λ est un nombre compris entre 0 et 1 généré par une distribution uniforme, l_k et u_k sont les limites minimale et maximale de déplacement, n est la dimension du problème, x et F sont les vecteurs position et force.

Cette métaheuristique peut être adaptée aux cas non continus comme notre problème de sélection de routage où nous avons utilisé un framework qui inclut les opérations des algorithmes génétiques (croisement) et un EM algorithme modifié proposé par Chen et al en 2007 (Chen et al, 2007).

Pour résoudre notre problème en temps réel, nous avons pris en considération à chaque itération des critères concernant l'état du système, à chaque fois qu'une nouvelle pièce entre dans la station de chargement. Pour DMM, et DMM modifiée la dissimilitude entre les routages occupés a été maximisée, à l'aide des métaheuristiques nous avons essayé d'équilibrer les charges de routages non pas en terme de nombre de pièces mais en terme de temps opératoire (maximiser le produit des charges de routages). Pour ce faire nous avons pris en considération les types des premières pièces existantes (le nombre de ces pièces égale à la taille de la station de chargement) dans la file infinie (avant qu'ils passent à la station de chargement) en essayant d'affecter chaque pièce à un routage selon son type. Les routages de ces pièces sont modifiés à chaque itération selon le principe de chaque métaheuristique et pour chaque routage nous avons calculé sa charge en vue de maximiser leur produit.

Cet algorithme hybride commence à déterminer quelle particule sera déplacée ou modifiée par les opérations de croisement. L'algorithme suivant est le pseudo code de la procédure principale du framework hybride adapté à notre problème :

n : la taille de chaque file.

S'il y a une place libre dans la station de chargement alors

Génération d'une population aléatoire.

Tant que (critère d'arrêt est non atteint)

Pour chaque particule X_i

Recherche_locale en modifiant les routages de certains pièces parmi les n premières de la file infini.

Evaluation de la fonction objective (Produit des charges de routages).

Si la fonction objectif est supérieure à la meilleure solution alors mettre à jour la meilleure solution. (L'élitisme)

Finsi

Fin pour

avg = calcAvgObjectiveValues() (calcul de moyen des fonctions objectifs).

Pour chaque particule X_i

Si $i \neq \text{best}$ et $f(x_i) > \text{avg}$ alors

$X_j =$ particule sélectionné.

croisement_uniforme (x_i, x_j).

Finsi

Si $f(x_i) < \text{avg}$ Alors

Calcul force et déplace (x_i).

Finsi

Fin pour

Fin tant que

Finsi.

4. Résultats et interprétations

Il a été montré dans (Hassam et al, 2007), (Ghomri et al, 2007) que les méthodes DMM et DMM modifiée présentent les meilleurs résultats pour la sélection alternative de routage lorsque comparés avec d'autres règles classiques de sélection de routage.

Pour cela nous avons utilisé les méthodes DMM et DMM modifiée comme base de comparaison pour évaluer les performances de notre métaheuristique (l'électromagnétisme).

Afin de montrer les améliorations apportées par cette métaheuristique nous avons fait plusieurs études en simulation avec des variations sur les critères du

système étudié. C'est pour ça que les résultats que nous allons présenter reposent sur deux critères principaux :

- Le taux de création des pièces.
- La taille des files d'attente d'entrée et de sortie des stations.

Dans cette section nous avons montré les résultats de simulation des deux méthodes, l'exécution des programmes et les interprétations des résultats.

4.1. Étude comparative sans introduction des pannes

4.1.1. Taux de production

Le taux de sortie des pièces est calculé en divisant le nombre de pièces sorties du système sur le nombre de pièces créées.

Le tableau 2 et figure 2 montrent que pour un taux de création des pièces important le taux de production obtenu par électromagnétisme est meilleur que ceux des méthodes DMM modifiée et DMM et qu'en dessous du taux de création 1/30 le taux de production est pratiquement le même pour toutes les méthodes.

Taux de création	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
EM	99.99	99.99	99.99	99.99	98.52	66.94	44.75	22.42
MDMM	99.99	99.99	99.98	99.71	84.47	60.73	41.67	21.15
DMM	99.99	99.99	99.97	81.4	24.65	32.05	15.43	8.88

Tableau 2 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2.

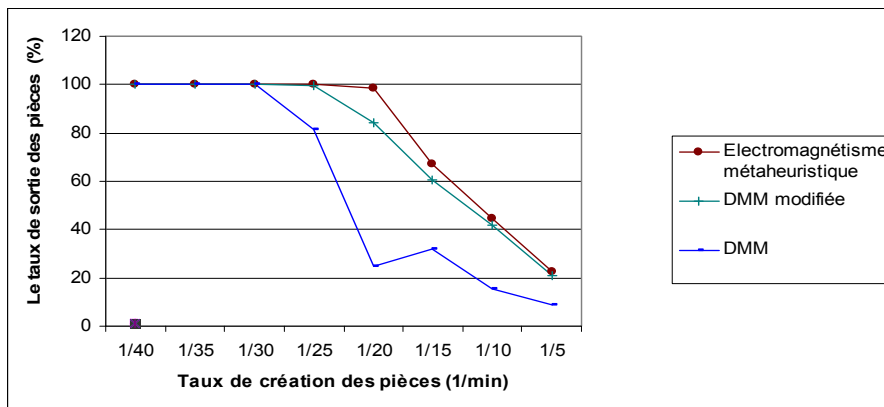


Figure 2 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2.

4.1.2. Taux d'utilisation des machines

Le taux d'utilisation des machines est un critère très important dans la mesure des performances d'un système de production.

Le tableau 3 et figure 3 montrent que le taux d'utilisation pour les machines T_1 et T_2 est plus important pour électromagnétisme que pour DMM et DMM modifiée pour un taux de création important (supérieur à 1/25).

Taux de création	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
EM	48.24	54.48	63.96	76.19	92.39	86.16	86.56	86.75
MDMM	49.97	56.94	66.59	79.85	84.52	82.72	83.58	84.7
DMM	49.94	57	66.56	65.05	24.62	42.59	30.9	35.5

Tableau 3 : Le taux d'utilisation des machines T_1 et T_2 pour une capacité de file d'attente = 2.

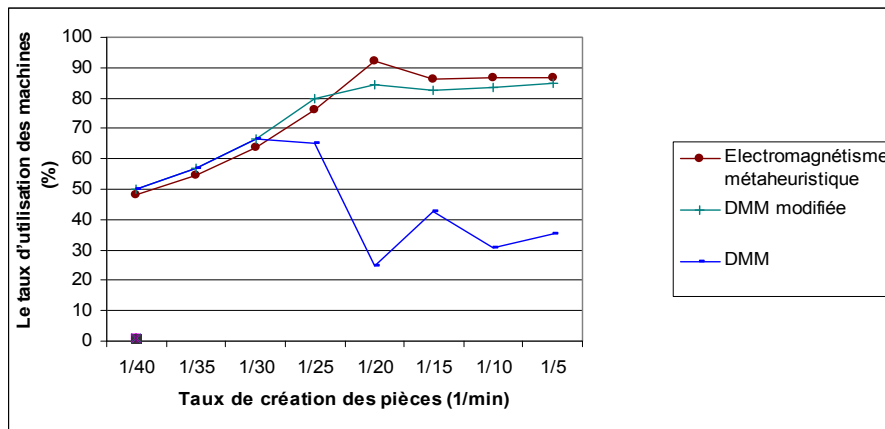


Figure 3 : Le taux d'utilisation des machines T_1 et T_2 pour une capacité de file d'attente = 2.

4.1.3. Taux d'utilisation de l'AGV

Dans cette partie nous avons illustré le taux d'utilisation de l'AGV,

Le tableau 4 et figure 4 montrent que l'utilisation de l'AGV est plus importante pour électromagnétisme que la méthode DMM et DMM modifiée.

Taux de création	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
EM	17.37	19.52	22.98	27.29	32.89	31.12	31.2	31.26
MDMM	14.98	17.46	21	27.31	30.26	29.16	30.19	30.44
DMM	15	17.4	20.93	21.67	8.43	14.35	10.55	12.08

Tableau 4 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2.

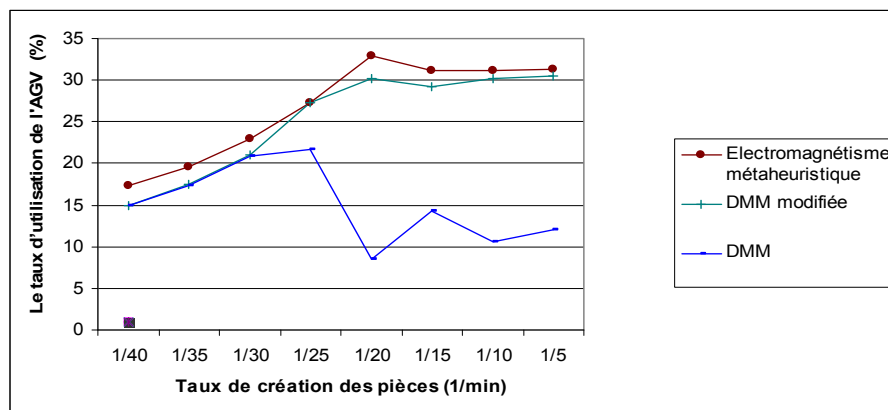


Figure 4 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2.

4.2. Étude comparative avec introduction des pannes

Dans cette partie nous allons donner les résultats et les interprétations de l'étude comparative entre électromagnétisme et les règles DMM et DMM modifiée présentés déjà dans le paragraphe précédent avec l'introduction de pannes. Les pannes sont introduites sur les ressources toutes les 100 heures. La panne va durer 2 heures suivant une loi exponentielle.

4.2.1. Taux de production

La simulation du système en introduisant des pannes nous montre que le taux de production pour électromagnétisme est nettement supérieur à ceux des règles DMM et DMM modifiée pour un taux de création supérieur ou égale à 1/40.

Taux de création	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
EM	99.99	99.99	99.99	99.99	89.78	65.61	43.76	21.96
MDMM	99.99	99.97	99.62	85.02	66.7	50.91	34.29	17.04
DMM	99.99	99.97	99.95	53.07	32.46	29.29	15.43	8.55

Tableau 5 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2.

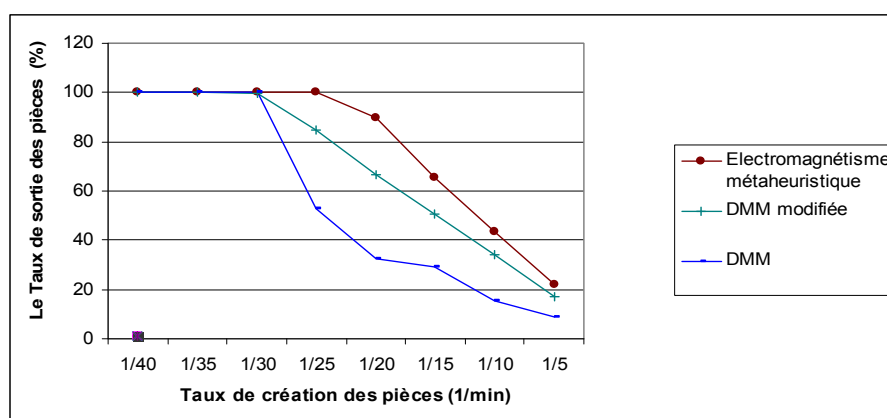


Figure 5 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2.

4.2.2. Taux d'utilisation des machines

Le tableau 6 et figure 6 montrent que le taux d'utilisation pour les machines T_1 et T_2 est plus important pour électromagnétisme que pour DMM et DMM modifiée pour un taux de création important (supérieur à 1/25).

Taux de création	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
EM	48.30	54.60	64.01	75.95	86.16	84.6	84.65	84.96
MDMM	49.88	56.94	66.78	77.16	77.77	78.13	78.5	78.75
DMM	49.96	57.23	66.81	42.71	33.02	39.3	31.21	34.83

Tableau 6 : Le taux d'utilisation des machines T_1 et T_2 pour une capacité de file d'attente = 2.

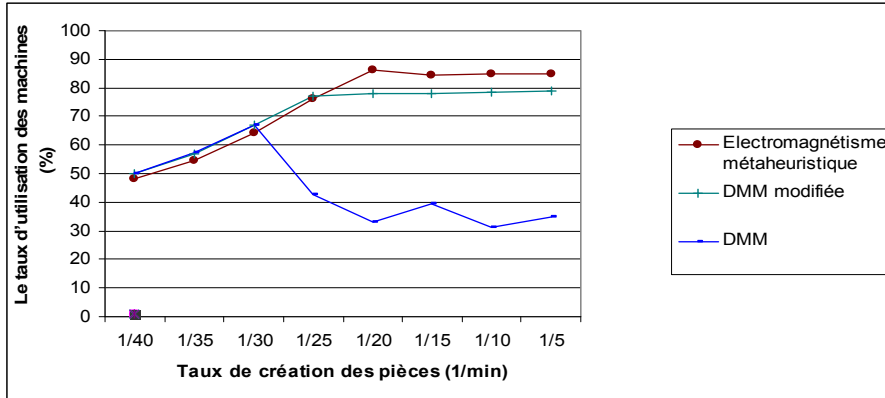


Figure 6 : Le taux d'utilisation des machines T_1 et T_2 pour une capacité de file d'attente = 2.

4.2.3. Taux d'utilisation de l'AGV

Comme nous pouvons bien le remarquer dans le tableau 7 et figure 7, l'utilisation de l'AGV est plus importante pour électromagnétisme que la méthode DMM et DMM modifiée.

Taux de création	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
EM	17.40	19.58	23	27.17	30.96	30.49	30.51	30.62
MDMM	14.98	17.55	21.19	24.28	24.07	24.54	24.67	24.54
DMM	15	17.61	21.06	14.2	10.94	12.98	10.41	11.59

Tableau 7 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2.

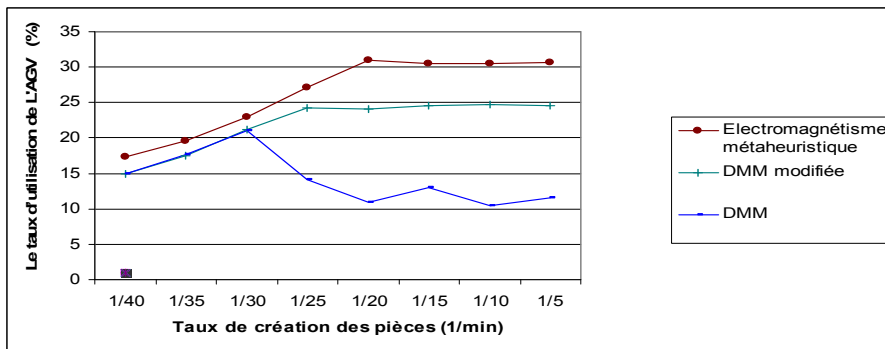


Figure 7 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2.

4.3. Temps de calculs

Pour chaque méthode, le temps de calcul ou le temps nécessaire d'affectation d'une pièce à un routage est d'ordre de la milliseconde qui reste très faible par rapport aux durées opératoires du problème.

Le tableau suivant présente le temps de calcul d'électromagnétisme mesuré en millisecondes pour une capacité de file d'attente égal à 2.

Taux de création	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Sans panne	0.029	0.026	0.029	0.027	0.045	0.583	0.616	0.584
Avec panne	0.028	0.020	0.029	0.028	0.627	0.604	0.597	0.600

Tableau 8 : *Le temps de calculs d'électromagnétisme pour une capacité de file d'attente =2*

5. Conclusion et perspectives

Dans ce travail, nous avons adapté électromagnétisme métaheuristique pour résoudre le problème de sélection de routage en temps réel dans un FMS.

Cette approche a été comparée avec les règles DMM et DMM modifié, afin de tirer des idées sur l'efficacité de cette métaheuristique.

Nous avons d'abord varié le temps d'arrivée (le taux de création) des pièces et garder la capacité des files d'attentes fixes. Ensuite, nous avons simulé le système avec les deux critères de simulation mentionnés, mais en ajoutant des pannes aux machines du système.

De cette simulation un certain nombre de conclusions peuvent être faites. Nous résumons ici, l'essentiel :

- Les résultats obtenus ont montré que la métaheuristique que nous avons étudiée a donné de meilleures performances pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines et du système de transport pour un système flexible de production saturé surtout pour de petites capacités des files d'attente même avec la présence de pannes.

Dans ce travail, Il est évident que les résultats de simulation sont fortement dépendants de la structure du système étudié, et surtout des données. Nous sommes actuellement entrain de travailler sur d'autres configurations de job shop afin de vérifier si nos conclusions sont généralisable.

6. Références bibliographiques

- Basnet C., Mize J. H., «*Scheduling and control of flexible manufacturing systems: a critical review*», International journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 7, n° 6, p. 340-355, 1994.
- Birbil, S.I., FANG, S., «*An Electromagnetism-like Mechanism for Global Optimization*», *Journal of Global Optimization*», vol 25: 263–282, 2003.
- Chen, S. Chang, P. Chan, C. and Mani., V. «A Hybrid Electromagnetism-Like Algorithm for Single Machine Scheduling Problem». Book chapter in *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence*, Volume 4682. 2007
- Ghomri, L., Sari, Z., «*Influence des Contraintes et des Perturbations sur les Performances des Règles de Routage dans un FMS*», Rabat, la conférence internationale Conception et Production Intégrées, 2007.
- Hassam, A., Sari, Z., «*Real-Time Selection of Process Plan in Flexible Manufacturing Systems: Simulation Study*», CHINA, International Conference on Industrial engineering and Systems Management, 2007.
- Mebarki, N., «*Une approche d'ordonnancement temps réel basée sur les règles de priorité des files d'attente*», PhD thèse, Université de Claude Bernard Lyon1, 1995.
- Saygin C., Chen F.F., Singh J., «*Real-Time Manipulation of alternative Routings in Flexible Manufacturing Systems: A simulation Study*», International journal of advanced Manufacturing Technology, 18, 755-763, 2001.
- Saygin C., Kilick, S.E., «*Effect of flexible process plans on performance of flexible manufacturing system*», Proceedings of 7th International DAAM Symposium, p.393-394, Vienna, 1996.
- Saygin, C. and Kilic, S.E. «*Dissimilarity Maximization Method for Real-time Routing of Parts in Random Flexible Manufacturing Systems*», The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 16, 169-182. 2004
- Shukla C. S., Chen F. F., «*The state of the art in intelligent real-time FMS control: a comprehensive survey*», Journal of intelligent Manufacturing, vol. 7, p. 441-455, 1996.
- Souier, M., Hassam, A., Sari, Z., «*Evaluation of Metaheuristics performances in manipulation of alternative routing*», International conference on Electrical Engineering Design and Technologies, Hammamet Tunisi, 2008.