

Une heuristique en deux phases pour un problème d'équilibrage et de planification minimisant le coût énergétique d'un système reconfigurable

Paolo Gianessi¹, Audrey Cerqueus¹, Damien Lamy¹, Xavier Delorme¹

Mines Saint-Etienne, Univ Clermont Auvergne, CNRS, UMR 6158 LIMOS

Institut Henri Fayol, F - 42023 Saint-Etienne France

`firstName.name@mines-stetienne.fr`

Mots-clés : *reconfigurabilité, efficacité énergétique, optimisation bi-niveau, scalabilité*

1 Introduction

Les questions environnementales sont au cœur des préoccupations de notre société. L'agence américaine d'information sur l'énergie prévoit une importante augmentation de la consommation énergétique d'ici 2050 et précise que l'industrie en est le plus gros consommateur [1]. La consommation énergétique par les systèmes manufacturiers est donc un enjeu majeur. Trois mesures sont utilisées pour la consommation énergétique des systèmes de production : la consommation totale d'énergie, le pic de puissance et le coût de l'énergie. Dans ce travail, nous considérons cette dernière mesure, pour laquelle le prix de l'énergie varie au cours du temps par périodes (Time-Of-Use pricing).

Par ailleurs, la demande client subit de fortes variations, imposant aux systèmes de production de s'adapter rapidement, tout en restant compétitifs. Les systèmes manufacturiers reconfigurables (RMS de l'anglais Reconfigurable Manufacturing Systems) ont été introduits dans [2] afin de répondre à cette problématique. Les RMS sont généralement composés de stations sur lesquelles plusieurs ressources peuvent travailler en parallèle. Les pièces produites se déplacent de manière cadencée entre ces stations par un convoyeur ou un portique. Selon [3], la caractéristique la plus importante pour l'efficacité des RMS pourrait être la scalabilité, qui consiste à pouvoir ajouter ou enlever des ressources pour adapter la production.

Au delà de l'adaptation aux évolutions de la demande, la scalabilité des RMS peut aussi permettre de mieux gérer les variations du prix de l'énergie. En effet, une configuration peu consommatrice d'énergie mais peu productive peut être utilisée dans des périodes où l'énergie est coûteuse, et une configuration plus productive et plus consommatrice peut être employée sur des périodes où l'énergie est moins coûteuse. Notre étude propose d'utiliser la scalabilité comme un outils pour minimiser le coût de l'énergie.

2 Description du problème

Le problème sur lequel nous travaillons, qui a été introduit par [4], est un problème bi-niveau [5], dont le premier niveau consiste à déterminer un ensemble de configurations et le deuxième niveau s'intéresse à la planification de ces configurations pour satisfaire une demande. Les deux niveaux sont interdépendants : la performance d'un ensemble de configurations ne peut être évaluée sans savoir comment ces configurations seront utilisées et le planning ne peut être établi qu'en ayant la connaissance des configurations.

Une configuration est définie à la fois par la répartition des opérations sur les différentes stations (c'est-à-dire l'équilibrage de la ligne) et par le nombre de ressources en parallèle sur

une même station. Nous considérons ici le cas particulier où l'équilibrage est le même pour un ensemble de configurations. Ces dernières ne diffèrent donc que par le nombre de ressources affectées à chaque station. Nous pouvons alors considérer que le temps nécessaire pour changer de configuration est négligeable, puisqu'il ne consiste qu'à allumer ou éteindre des machines.

Le temps de cycle d'une station est la somme des temps opératoire des opérations qui y sont affectées, divisée par le nombre de ressources. À l'inverse, la consommation d'énergie d'une station est proportionnelle au nombre des ressources (somme des consommations énergétiques des opérations affectées, plus une consommation résiduelle pendant l'idle time).

La planification des configurations se fait sur un horizon de temps sur lequel la demande et le coût de l'énergie pour chaque période sont données. Sur cet horizon de temps, des interruptions de la production sont autorisées. Nous considérons que la consommation d'énergie pendant ces interruptions et lors la mise en route d'une configuration sont négligeables.

3 Méthode en deux phases

Nous proposons une méthode heuristique de décomposition en deux phases pour ce problème. La première phase est la génération d'un ensemble de configurations et la deuxième est la planification des configurations afin de répondre à une demande donnée, tout en minimisant le coût énergétique.

Pour la première phase, l'enjeu est de trouver un équilibrage pour lequel les configurations qui en dérivent présentent un compromis intéressant entre la consommation énergétique et la productivité. Pour cela, nous avons mis en place un recuit simulé cherchant l'équilibrage qui maximise un calcul d'hypervolume de ces deux objectifs (takt time et consommation énergétique moyenne). Cette phase ne prenant pas en compte explicitement la demande, nous avons ajouté une composante de maximisation de la productivité, afin d'augmenter les chances de satisfaire la demande lors de la deuxième phase.

La deuxième phase planifie l'utilisation de ces configurations sur un horizon de temps donné, étant donné une demande fixée et connaissant le coût de l'énergie pour chaque période, selon un schéma Time-Of-Use pricing. Ce problème est modélisé et résolu comme un programme linéaire. La méthode étant composée d'une partie heuristique et d'une résolution exacte, elle s'apparente à une matheuristique [6].

Nous avons mené des expérimentations numériques sur des instances de la littérature, adaptées en intégrant une composante de consommation énergétique. Les résultats montrent que l'heuristique proposée permet une diminution importante des coûts énergétiques.

Références

- [1] U.S. EIA. *International Energy Outlook 2019*. <https://tinyurl.com/yc43apkm>. 2019.
- [2] Y. KOREN et al. "Reconfigurable manufacturing systems". In : *CIRP Annals* 48.2 (1999), p. 527–540.
- [3] Y. KOREN, W. WANG et X. GU. "Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems". In : *International Journal of Production Research* 55.5 (2017), p. 1227–1242.
- [4] A. CERQUEUS et al. "Balancing and Configuration Planning of RMS to Minimize Energy Cost". In : *Advances in Production Management Systems : Towards Smart and Digital Manufacturing (APMS 2020)*. T. 592. Springer, Cham, 2020, p. 518–526.
- [5] B. COLSON, P. MARCOTTE et G. SAVARD. "Bilevel programming : A survey". In : *4OR* 3.2 (2005), p. 87–107.
- [6] V. MANIEZZO, M. A. BOSCHETTI et T. STÜZLE. *Matheuristics, Algorithms and Implementations*. Springer International Publishing, 2021.