

Bastien Rolland<sup>1</sup>

Ordonnancement dans un contexte de production de verre  
The Robust Magnetron Problem

**ROADEF 2020 : Résumé pour le prix de l'étudiant de master 2019**

**Maître de Stage :** Frédéric Meunier<sup>1</sup>,     **Référent Saint-Gobain :** Tristan Barbe<sup>2</sup>,  
**Tutrice MPRO :** Safia Kedad<sup>3</sup>,     **Tuteur Ponts-ParisTech :** Axel Parmentier<sup>1</sup>.

Le sujet de stage a été proposé par Tristan Barbe pour le DataLab de Saint-Gobain. Le stage a eu lieu au CERMICS sous la direction de Frédéric Meunier du 8 avril au 23 août 2019. Le sujet du stage est l'optimisation d'une étape de la production industrielle de verre. Une fois les plaques de verre confectionnées, des couches de matériaux sont déposées sur celles-ci pour conférer des propriétés au verre, telles que le filtrage ultraviolet ou l'isolation thermique. Ces dépôts de verre sont effectués dans un magnétron où les plaques de verre sont déplacées horizontalement. Le magnétron est sous vide et les plaques de verre passent sous des réserves de matériaux appelées « cibles ». Le dépôt s'effectue à l'aide d'un champs magnétique dont la puissance variable permet de choisir la vitesse de consommation des cibles. La production est interrompue à intervalles réguliers et les réserves de matériaux sur les cibles peuvent être remplacées. Lorsque les réserves sont renouvelées, le matériau restant est perdu. Le problème étudié est l'optimisation des renouvellements de matériaux et de leur consommation pour minimiser le coût des pertes engendrées par les matériaux jetés.

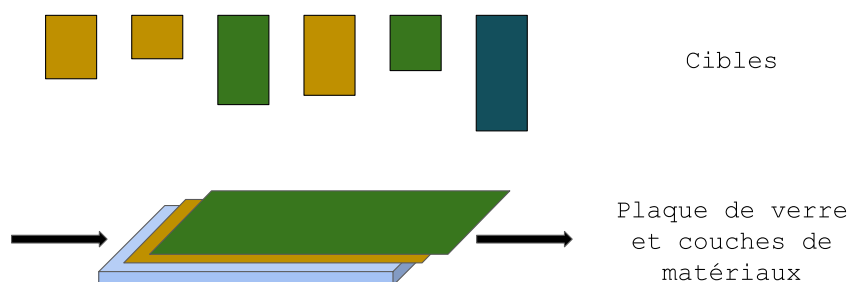


FIG. 1 – Schéma du fonctionnement du magnétron

Les demandes de production sont incertaines et le problème que nous considérons est un problème d'optimisation robuste. Nous considérons un ensemble de robustesse  $\Theta$  défini comme l'ensemble des réalisations possibles des demandes de production. La robustesse intervient alors doublement : dans l'objectif qui est le coût maximal de la solution pour les demandes de production variant dans  $\Theta$  et dans les contraintes qui doivent être réalisées pour tout ensemble de demandes de production dans  $\Theta$ . Les décisions sont prises lors des interruptions du magnétron et dépendent de la réalisation des demandes de production. Par conséquent, le problème du magnétron est un problème d'optimisation robuste avec recours.

Après avoir défini le problème, nous l'avons modélisé en trois temps. Le premier est la modélisation par un Programme Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) du problème déterministe où les demandes de production sont connues et ne varient pas. Le second est une étude de complexité de ce problème déterministe, permettant de justifier l'utilisation de la programmation linéaire en nombres entiers. Le troisième est la modélisation du problème complet. Puis, nous proposons une méthode de résolution exacte du problème lorsque les recours ne sont pas autorisés. Nous montrons que cette méthode converge vers une solution optimale de la version « Open-Loop » du problème en un nombre fini d'appel d'un PLNE compact. De plus, dès qu'une solution est construite, elle vérifie les contraintes robustes. La méthode que nous proposons fait appel à une technique de dualisation des contraintes robustes et à un algorithme d'ajouts de plans coupants. Puis, nous calculons des bornes inférieures du problème complet : nous montrons que le problème est résoluble par un PLNE dans le cas où l'ensemble de robustesse est discret. Nous obtenons alors des bornes inférieures du problème complet en construisant un sous-ensemble discret de  $\Theta$ . Afin d'obtenir des bornes inférieures de qualité, nous étudions comment choisir astucieusement le sous-ensemble discret de  $\Theta$ . Puis, nous essayons de simuler les choix effectués en pratique par les opérateurs du magnétron qui suivent ce que nous avons appelé les « règles métiers ». Nous avons copié ces méthodes pratiques par l'application d'une heuristique qui utilise des seuils sur les réserves de matériaux. Les réserves des cibles sont renouvelées dès lors que la quantité de matériau restante est inférieure au seuil défini pour cette cible. Nous avons testé ces méthodes sur des données réelles, montrant alors que notre méthode de résolution « Open-Loop » est plus efficace que l'heuristique de simulation des règles métiers : dans le cas où les temps de commande des produits varient de 10%, nous garantissons une solution à moins de 1% de la solution optimale, contre 10% pour la méthode heuristique qui simule les règles métiers.

Une piste d'amélioration de la résolution du problème du magnétron est l'utilisation de recours constants par partitionnement de l'ensemble de robustesse. Il nous a semblé nécessaire d'étudier en détails les conditions de convergence de cette méthode dans un cadre général avant de pouvoir l'appliquer au problème du magnétron. Nous avons donc commencé cette étude en cherchant des exemples simples de cas dans lesquels la méthode converge ou non.

<sup>1</sup> CERMICS, École des Ponts ParisTech, Champs-sur-Marne, France  
 bastien.rolland@eleves.enpc.fr, {frederic.meunier, axel.parmentier}@enpc.fr

<sup>2</sup> DataLab, Saint-Gobain, Aubervilliers, France  
 Tristan.Barbe@saint-gobain.fr

<sup>3</sup> CEDRIC, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France  
 safia.kedad-sidhoum@cnam.fr