

# Optimisation de l'échantillonnage dynamique des lots pour les contrôles qualité en fabrication de semi-conducteurs

Étienne LE QUÉRÉ<sup>1,2</sup>, Stéphane DAUZÈRE-PÉRÈS<sup>2</sup>, Cédric MAUFRONT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Soitec, Bernin, France

<sup>2</sup> École des Mines de Saint-Étienne, Univ. Clermont Auvergne, CNRS UMR 6158 LIMOS

**Mots-clés :** *Optimisation, fabrication de semi-conducteurs, gestion de la qualité, échantillonnage, fonctions sous-modulaires.*

## 1 Introduction

Pour répondre à la demande importante de marchés exigeants comme la téléphonie ou l'automobile, la fabrication de semi-conducteurs doit produire en fort volume et avec une totale fiabilité. Comme le temps de cycle est de plusieurs semaines (voire plusieurs mois) des contrôles dans la ligne de fabrication sont effectués pour détecter une dérive. Ces contrôles n'ont pas de valeur ajoutée, et ils servent à réduire l'impact des non-conformités pour le fabricant en détectant les dérives au plus tôt. De plus les machines utilisées pour effectuer ces contrôles coûtent cher (plusieurs millions d'euros), en conséquence la capacité de contrôle est limitée. Choisir un sous-ensemble des lots à contrôler est appelé un échantillonnage.

La figure 1 présente un exemple de trajectoires de deux lots sur les machines de production. Choisir de contrôler le lot L1 ou le lot L2 n'apporte pas de l'information sur les mêmes machines. Le problème est modélisé en profondeur (plusieurs étapes en série) et en hauteur (plusieurs machines en parallèle).

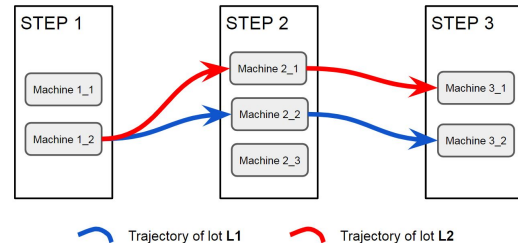


FIG. 1 – Exemple de routes de production

La revue de la littérature dans [2] classe les méthodes d'échantillonnage en trois catégories : statique, adaptative et dynamique. Les deux premières catégories gèrent mal les cas où plusieurs étapes de production séparent les étapes à risque et la mesure. On se concentre ici sur les méthodes dynamiques qui visent à modéliser l'environnement de l'usine et à échantillonner en temps réel, parmi les lots contrôlables (tous les lots ne peuvent pas être contrôlés) ceux à contrôler en fonction des gains qu'ils apportent sur des indicateurs de risque.

## 2 Modélisation

On fait deux hypothèses sur la fabrication et les modes de dérive dans l'usine :

1. Le phénomène de dérive sur un équipement est irréversible, et
2. Les mesures faites par les équipements de contrôle sont justes, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de faux positif ni de faux négatif sur la détection d'une dérive.

En conséquence, les lots réalisés depuis le dernier bon contrôle sont les lots dont on ignore l'état et qui sont par conséquent à risque. Le nombre de lots à risque est appelé W@R (Wafer @ Risk) [1]. Soit une liste de risques  $\mathcal{R}$ , on construit en temps réel des compteurs de W@R pour chaque risque. Soit  $\mathcal{L}$  une liste de lots contrôlables. La mesure d'un lot  $l$  permet de sécuriser les

$D_{r,l}$  réalisés avant  $l$  pour le risque  $r$ . D'un point de vue industriel, cela représente effectivement la diminution de l'exposition à un risque. Le problème d'échantillonnage se formule comme la maximisation d'une fonction sous-modulaire [3] sous une contrainte de capacité en sac-à-dos. L'échantillonnage consiste à choisir les lots à ajouter à l'ensemble  $\mathcal{S} \subset \mathcal{L}$  pour les mesurer.  $t_l$  est le temps de mesure du lot  $l$ ,  $T$  est la capacité de mesure et  $D_{r,l}$  la valeur du lot  $l$  sur le risque  $r$ .

$$\begin{aligned} & \max \sum_{r \in \mathcal{R}} \max_{l \in \mathcal{S} \subset \mathcal{L}} D_{r,l} \\ & \text{subject to : } \sum_{l \in \mathcal{S}} t_l \leq T \end{aligned} \tag{1}$$

### 3 Expérimentations

On considère le cas particulier de l'indicateur GSI [1], qui agrège les risques en un seul indicateur, pour réaliser des expérimentations sur les données industrielles de Soitec. Le problème est résolu avec un algorithme glouton classique de la littérature [3], une procédure d'échange et un solveur gratuit. On utilise les données industrielles de Soitec pour définir 3 types d'instances : aléatoires, industrielles aléatoires et industrielles. Les résultats en moyenne sont présentés dans la table 1 pour la contrainte de sac-à-dos. L'algorithme glouton a des performances suffisantes pour une mise en œuvre industrielle avec un temps de calcul inférieur à 1 seconde pour les instances industrielles.

Type d'instance	Glouton	Échange	solveur 60 sec
Industrielle	99.00%	99.10%	99.99%
Industrielles aléatoires	98.92%	99.66%	100%
Aléatoire	99.66%	99.74%	99.20%

TAB. 1 – Écart à l'optimum moyen dans les différentes approches

### 4 Conclusion et perspectives

Nous avons montré que le problème d'échantillonnage en fabrication de semi-conducteurs est résolu avec un algorithme glouton qui a des performances suffisantes pour être industrialisé en particulier en l'améliorant avec une procédure d'échange.

Dans la logique de l'industrie 4.0 nous travaillons maintenant à intégrer les décisions d'échantillonnage dans l'ordonnancement des lots sur les machines de contrôle.

### 5 Remerciements

Ce travail a été partiellement financé par ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) à travers la thèse en convention CIFRE 2018/0149 et un contrat de collaboration entre Soitec et Armines.

### Références

- [1] Stéphane Dauzère-Pérès, Jean-Loup Rouveyrol, Claude Yugma, and Philippe Vialletelle. A smart sampling algorithm to minimize risk dynamically. In *Advanced semiconductor manufacturing conference (ASMC), 2010 IEEE/SEMI*, pages 307–310. IEEE, 2010.
- [2] Justin Nduhura-Munga, Gloria Rodriguez-Verjan, Stéphane Dauzère-Pérès, Claude Yugma, Philippe Vialletelle, and Jacques Pinaton. A literature review on sampling techniques in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 26(2) :188–195, 2013.
- [3] George L Nemhauser, Laurence A Wolsey, and Marshall L Fisher. An analysis of approximations for maximizing submodular set functions—i. *Mathematical programming*, 14(1) :265–294, 1978.