

# Contrôle robuste d'un laminoir à chaud

Ivan MALLOCI<sup>1</sup>, Jamal DAAFOUZ<sup>1</sup>, Claude IUNG<sup>1</sup>, Rémi BONIDAL<sup>2</sup>, Patrick SZCZEPANSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre de Recherche en Automatique de Nancy, UMR 7039 CNRS - Nancy Université  
ENSEM, 2, Avenue de la forêt de Haye, 54516 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<sup>2</sup> ArcelorMittal Maizières, R&D Industrial Operations, BP 30320  
F-57283 Maizières-lès-Metz Cedex, France

Ivan.Mallici@ensem.inpl-nancy.fr

<http://www.istia.univ-angers.fr/LISA/jd-jn-macs09/>

*Résumé*— Dans cet article, nous proposons un régulateur robuste  $H_2$  capable de garantir la stabilité d'un laminoir à chaud et d'améliorer ses performances. L'objectif principal du processus de laminage est d'obtenir des tôles métalliques avec l'épaisseur désirée. Le décentrement de la tôle par rapport à l'axe de laminage peut dégrader la qualité du produit voire endommager le système de production. L'objectif est de réduire ce décentrement. Comme un laminoir travaille avec des produits qui peuvent avoir des caractéristiques très différentes, nous avons créé une base de données qui décrit l'ensemble des produits traités et nous l'avons divisée en plusieurs familles de produits. Nous décrivons une méthode pour réduire la complexité du problème en exploitant les relations physiques entre les paramètres. Cette méthode permet de formuler le problème de stabilisation comme un problème convexe et, par conséquent, de synthétiser un régulateur  $H_2$  différent pour chaque famille de produits. Nous présentons aussi les résultats expérimentaux obtenus sur le laminoir d'ArcelorMittal situé à Eisenhüttenstadt.

*Mots-clés*— Laminoir à chaud, Perturbations singulières, Incertitudes polytopiques, Régulateur robuste  $H_2$ , Inégalités matricielles linéaires (LMI).

Ce travail a été réalisé en collaboration avec ArcelorMittal Maizières Research et la région Lorraine, France.

## I. INTRODUCTION

Le laminage de produits plats à chaud est une des étapes d'élaboration des tôles. Le procédé consiste à réduire la section d'un produit métallique en l'entraînant par frottement entre deux cylindres en rotation afin d'obtenir une tôle (ou bande) avec l'épaisseur désirée. De plus, il faut garantir un produit avec les caractéristiques géométriques, métalliques et mécaniques présentes dans le cahier des charges. Un laminoir est l'association de plusieurs cages, où chaque cage est constituée par un ensemble de cylindres. Au cours du laminage, si la tôle ne suit pas une trajectoire rectiligne, elle risque de se déchirer ou de se replier sur elle-même. Outre le fait que cette tôle devient inutilisable, un incident de laminage de ce type peut engendrer de sérieux défauts sur les cylindres de travail. Le déplacement latéral du produit par rapport à un axe de référence, appelé décentrement de bande, est la conséquence des dissymétries de laminage liées à la cage et/ou au produit, et il doit être réduit si on veut améliorer la fiabilité du processus.

Dans le contexte du contrôle de déport de bande, les contributions les plus importantes sont basées sur la mesure du différentiel de force [5], [9], [11], [12]. Normalement, les

industriels supposent que le différentiel de force est l'image du décentrement de bande. Dans ce cas, le différentiel de serrage est fixé proportionnel au décentrement de bande et un régulateur de type PID peut être utilisé. Néanmoins, la loi qui lie le différentiel de force et le décentrement de bande est non-linéaire. Ces contraintes ont été considérées dans [3], où un régulateur linéaire quadratique (LQ) a été synthétisé dans un cadre nominal [1]. Cependant, plusieurs types de produits avec des caractéristiques très différentes transitent dans un laminoir. Cette stratégie ne peut pas garantir le même niveau de performances pour l'ensemble des produits, malgré les propriétés de robustesse des régulateurs LQ.

Dans cet article, nous proposons un régulateur robuste  $H_2$  en temps discret capable de garantir la stabilité d'un laminoir et de minimiser le décentrement de bande pour la totalité des produits laminés. Dans la synthèse du régulateur, nous avons pris en compte la variation des paramètres physiques en divisant l'ensemble des produits en plusieurs familles et en synthétisant un régulateur différent pour chaque famille de produits. Nous avons aussi utilisé une approche polytopique afin de décrire le système comme un problème convexe, ce qui permet de synthétiser les régulateurs en utilisant des techniques LMI [2].

Cet article est organisé comme suit. Dans la section II, nous donnons la description physique du système. Nous utilisons l'approximation des perturbations singulières pour prendre en compte le fait que le système possède deux échelles de temps différentes [6], [10]. Dans la section III, nous expliquons la modélisation polytopique et une méthode qui permet de simplifier la description du système en exploitant les relations physiques entre les paramètres. Dans la section IV, nous présentons le régulateur robuste  $H_2$ . Dans la section V nous synthétisons un régulateur différent pour chaque famille et nous exposons les résultats, simulés et expérimentaux, concernant le laminoir d'ArcelorMittal situé à Eisenhüttenstadt (Allemagne).

## II. DESCRIPTION DU SYSTÈME

### A. Description physique du système

Un laminoir est composé de  $n$  cages, où chaque cage contient un ensemble de cylindres (composé par deux cylindres de travail et deux cylindres de soutien). Dans les

laminoirs d'ArcelorMittal  $n = \{5, 6, 7\}$ . Nous ne considérons que le cas  $n = 5$  car la généralisation ne présente pas de difficultés théoriques. Le modèle non-linéaire est obtenu à partir des relations qui gouvernent le comportement du système.

Pour chaque cage  $j \in \Upsilon = \{1, \dots, n\}$ , les paramètres physiques principaux sont la largeur de la tôle  $w_j$ , l'épaisseur de la tôle  $h_j$ , la tension amont à la cage  $T_j^{am}$ , la tension aval à la cage  $T_j^{av}$ , la longueur entraxe des vis  $l_j^v$ , la distance entre deux cages  $l_j^0$ , la longueur des cylindres de travail  $b_j$ , la vitesse des cylindres de travail  $s_j$  et le module de Young  $E_j$ . Les constantes  $c_j^{fh}$ ,  $c_j^{fT_{am}}$ ,  $c_j^{fT_{av}}$ ,  $c_j^{gh}$ ,  $c_j^{gT_{am}}$ ,  $c_j^{gT_{av}}$ ,  $K_j^h$ ,  $K_j^f$ ,  $K_j^l$ ,  $P_j$  et  $g_j$  représentent le gradient des paramètres de la tôle. Elles peuvent être évaluées en utilisant des algorithmes numériques spécifiques, développés par les ingénieurs d'ArcelorMittal. Les asymétries principales sont le décentrement de bande  $Z_j$ , le différentiel d'épaisseur en sortie de cage  $\Delta h_j$ , le différentiel de serrage  $\Delta S_j$  et le différentiel de cé dage  $\Delta K_j$ . Les équations principales qui gouvernent le comportement du système sont :

- L'équation qui détermine le différentiel de force de laminage

$$\Delta P_j = c_{j-1}^{fh} \Delta h_{j-1} + c_j^{fh} \Delta h_j + c_j^{fT_{am}} \Delta T_j^{am} + c_j^{fT_{av}} \Delta T_j^{av}; \quad (1)$$

- L'équation qui détermine le différentiel d'épaisseur en sortie de la cage

$$\Delta h_j = \left( \frac{w_j}{(l_j^v)^2 K_j^h} + \frac{6w_j}{b_j^2 K_j^f} \right) (\Delta P_j + 2P_j) Z_j + \frac{\Delta P_j}{K_j^l} + \frac{w_j}{l_j^v} \Delta S_j - \frac{w_j}{l_j^v (K_j^h)^2} P_j \Delta K_j; \quad (2)$$

- L'équation qui détermine l'angle  $\alpha_j$  entre la bande et l'axe de laminage

$$\dot{\alpha}_j = \frac{s_j}{w_j} \left( \frac{c_j^{gh}}{1+g_j} + \frac{1}{h_j} \right) \Delta h_j + \frac{s_j}{w_j} \left( \frac{c_{j-1}^{gh}}{1+g_j} - \frac{1}{h_{j-1}} \right) \Delta h_{j-1} + \frac{s_j c_j^{gT_{av}}}{w_j (1+g_j)} \Delta T_j^{av} + \frac{s_j c_j^{gT_{am}}}{w_j (1+g_j)} \Delta T_j^{am}; \quad (3)$$

- L'équation qui détermine le décentrement de bande

$$\dot{Z}_j = s_j \alpha_j; \quad (4)$$

- L'équation qui détermine le différentiel de traction amont à la cage

$$\Delta T_j^{am} = 3 \left( \frac{w_j E_j}{(l_j^0)^2} + \frac{T_j^{am}}{w_j} \right) (Z_j - Z_{j-1}) + \frac{w_j E_j}{l_j^0} (2\alpha_j - \alpha_{j-1}) + 3 \frac{l_j^0 T_j^{am}}{w_j} \alpha_j; \quad (5)$$

- L'équation qui détermine le couplage entre deux cages successives

$$\Delta T_{j-1}^{av} = -\Delta T_j^{am}; \quad (6)$$

Nous pouvons associer deux variables d'état à chaque cage : le décentrement de bande  $Z_j$  et l'angle  $\alpha_j$ . En accord avec les précédentes équations physiques, le processus

complet peut être décrit par le système différentiel non-linéaire en temps continu :

$$\dot{x} = \varphi(x, u, d) \quad (7)$$

où

$$x = [\alpha' \quad z']' = [\alpha_1, \dots, \alpha_n, Z_1, \dots, Z_n]' \in \mathbb{R}^{2n}$$

est l'état du système,  $u \in \mathbb{R}^r$  est la commande (le différentiel de serrage  $\Delta S$ ) et  $d \in \mathbb{R}^h$  est la perturbation. Il existe  $n$  cameras qui mesurent les décentrement de bande  $Z_1, \dots, Z_n$ . Dans la suite, nous considérerons seulement une perturbation, c'est-à-dire le décentrement de bande en entrée de la première cage, qui est dû aux vibrations du "coilbox" (le dispositif utilisé pour introduire les bandes dans le train finisseur). Il y a aussi d'autres perturbations dans le système, mais elles sont négligeables par rapport au décentrement initial.

Un simulateur du système a été développé sous *Matlab-Simulink*. Il est adaptable à chaque usine, au prix de caler le modèle et de développer une base de données de produits spécifiques. Le calage pour l'usine d'Eisenhüttenstadt donne de bons résultats avec la majorité des produits.

### B. Linéarisation du système

L'objectif principal du système de contrôle d'un laminoir est de maintenir la bande centrée dans l'axe de laminage. Ce but peut être atteint en modifiant le différentiel de force de laminage  $\Delta P$  de manière à guider la bande dans la trajectoire désirée. Néanmoins, si la valeur de  $\Delta P$  est trop élevée nous engendrons un coin  $\Delta h$  excessif, ce qui équivaut à obtenir une tôle avec un profil trapezoïdal (Fig. 1.a), tandis que le profil idéal d'une tôle devrait être rectangulaire ( $\Delta h = 0$ ). En général, un coin en sortie de la dernière cage qui appartient à l'intervalle  $-10 \mu m < \Delta h_n < 10 \mu m$  respecte le cahier des charges. La force de laminage dépend du différentiel de serrage  $\Delta S$ , qui est limité à  $\pm 0.6 \text{ mm}$  pour les trois premières cages et à  $\pm 0.1 \text{ mm}$  pour les deux dernières cages, afin de respecter le cahier des charges. Ces contraintes ont été prises en compte dans la synthèse du régulateur. Puisque nous considérons seulement des pe-

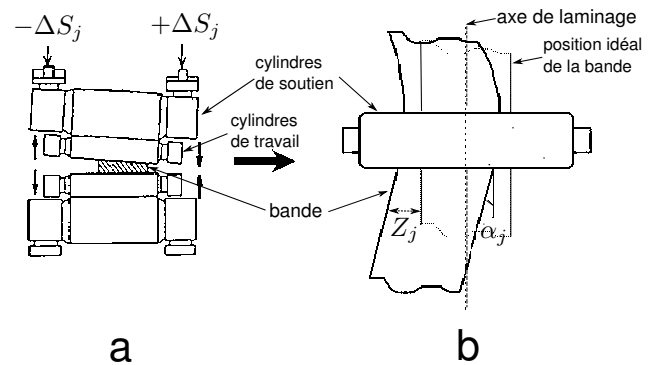


Fig. 1. Description de la cage  $j$  : vue de face (a) et vue du dessus (b)

tités déviations autour du point de fonctionnement idéal ( $\alpha_j = Z_j = \Delta h_j = 0$ ), afin de synthétiser la loi de contrôle nous pouvons utiliser le modèle linéarisé

$$\begin{cases} \dot{x} = Mx + Nu + Nd \\ y = Cx. \end{cases} \quad (8)$$

La dynamique d'un laminoir possède deux échelles de temps différentes car les angles  $\alpha$  sont des variables rapides par rapport aux décentrement de bande  $Z$ . Les systèmes avec plusieurs échelles de temps sont souvent caractérisés par des problèmes numériques lors de la synthèse du régulateur. Ces problèmes sont dus au fait que les équations du système sont mal conditionnées [6]. De plus, dans un laminoir, la dynamique correspondant aux angles ne peut pas être contrôlée directement car les actionneurs du système ont une vitesse limitée. Tous ces problèmes peuvent être résolus en utilisant la méthode d'approximation des perturbations singulières. Il s'agit de décrire le comportement du système pour la variété lente. Les équations différentielles qui concernent les variables rapides sont remplacées par des équations algébriques. En décomposant l'état du système en une partie rapide  $\alpha$  et une partie lente  $z$ , nous obtenons :

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = M_{11}\alpha + M_{12}z + N_1^u u + N_1^d d \\ \dot{z} = M_{21}\alpha + M_{22}z + N_2^u u + N_2^d d \\ y = C_1^y \alpha + C_2^y z. \end{cases} \quad (9)$$

Posant  $\dot{\alpha} = 0$ ,

$$M_{11}\alpha + M_{12}z + N_1^u u + N_1^d d = 0 \quad (10)$$

nous donne l'équation de la variété lente et

$$\begin{cases} \dot{z} = M_s z + N_s^u u + N_s^d d \\ y = C_s^y z \end{cases} \quad (11)$$

nous donne l'approximation d'ordre zéro du système, où

$$\begin{aligned} M_s &= M_{22} - M_{21}M_{11}^{-1}M_{12}, \\ N_s^u &= N_2^u - M_{21}M_{11}^{-1}N_1^u, \\ N_s^d &= N_2^d - M_{21}M_{11}^{-1}N_1^d, \\ C_s &= C_2 - M_{21}M_{11}^{-1}C_1. \end{aligned}$$

Nous supposons que la paire  $(M_s, N_s^u)$  est contrôlable et que le vecteur d'état  $z$  est accessible. L'approximation des perturbations singulières peut être utilisée seulement si la matrice  $M_{11}$  est inversible. Cette condition est toujours vérifiée dans le laminoir. De plus,  $M_{11}$  est Hurwitz et vérifie la condition

$$\max_{\iota} \operatorname{Re}(\xi_{\iota}\{M_{11}\}) < \min_{\zeta} \operatorname{Re}(\xi_{\zeta}\{M_s\}), \quad (12)$$

avec  $\iota, \zeta \in \Upsilon$ , où  $\xi\{M\}$  dénote le spectre de  $M$ . Par conséquent la solution de l'équation (11) est une bonne approximation de la solution de l'équation (9).

Pour conclure, dans cette section nous avons présenté un modèle non-linéaire du laminoir qui a été calé en comparant les sorties mesurées et simulées du laminoir d'Eisenhüttenstadt. Ensuite, nous avons linéarisé le modèle et nous sommes parvenus à une forme réduite en utilisant l'approximation des perturbations singulières. Enfin, nous avons obtenu le modèle linéaire (11), qui contient seulement la dynamique contrôlable  $z$ . Pour synthétiser le régulateur, nous avons supposé que le système travaille toujours autour du point de fonctionnement et que la dynamique rapide peut être négligée. Toutes ces hypothèses ont été validées dans

[3], où le modèle (1)-(6) a été utilisé pour synthétiser un régulateur LQ pour un produit spécifique. En accord avec l'implémentation pratique, le régulateur doit être synthétisé en temps discret. Donc, dans la suite nous considérons seulement la version discretisée du système (11) :

$$\begin{cases} z(k+1) = Az(k) + B^u u(k) + B^d d(k) \\ y(k) = C^y z(k). \end{cases} \quad (13)$$

### III. MODÉLISATION POLYTOPIQUE

Le fait qu'un laminoir travaille avec un ensemble de produits très hétérogènes peut être modélisé comme une incertitude sur chaque paramètre du produit. Les incertitudes dépendent des paramètres physiques de la tôle (largeur, épaisseur, température, etc.) et des paramètres du laminoir (rayon vitesse de rotation des cylindres, force de laminage, etc.).

Dans cette section, nous présentons la méthode utilisée pour décrire le système comme un problème convexe en utilisant une approche polytopique, qui nous permettra d'appliquer des techniques LMI dans la synthèse du régulateur. Un laminoir avec 5 cages possède 70 paramètres incertains. Pour un problème de cette dimension, la synthèse du régulateur basée sur la résolution de LMI peut échouer, c'est-à-dire que les solveurs n'arrivent pas à trouver une solution. Nous montrons comment la complexité du problème peut être réduite en exploitant les relations physiques entre les différents paramètres du produit. De plus, puisque les produits laminés peuvent être très différents, nous proposons de les diviser en plusieurs familles. Pour chaque famille, nous synthétiserons un régulateur robuste différent de manière à améliorer les performances du système. Nous considérons le système dans la forme

$$\begin{cases} z(k+1) = \mathcal{A}z(k) + \mathcal{B}^u u(k) + \mathcal{B}^d d(k) \\ y(k) = C^y z(k), \end{cases} \quad (14)$$

où  $\mathcal{A} = \sum_{\nu=1}^{N_\nu} \lambda_\nu^A A_\nu$ ,  $\mathcal{B}^u = \sum_{\nu=1}^{N_\nu} \lambda_\nu^{B^u} B_\nu^u$  et  $\mathcal{B}^d = \sum_{\nu=1}^{N_\nu} \lambda_\nu^{B^d} B_\nu^d$  représentent des polytopes, avec  $\{\lambda_\nu^A, \lambda_\nu^{B^u}, \lambda_\nu^{B^d}\} \in \Lambda$ .  $\lambda_\nu$  dénote l'incertitude et appartient au simplexe unitaire

$$\Lambda = \left\{ \sum_{\nu=1}^{N_\nu} \lambda_\nu = 1, \lambda_\nu \geq 0 \right\}. \quad (15)$$

Chaque point  $\nu$  est décrit par les matrices d'état  $(A_\nu, B_\nu^u, B_\nu^d)$  et représente le modèle linéaire (13) qui correspond à un sommet du polytope.  $N_\nu = 2^{\mathcal{D}}$  est le nombre de sommets et  $\mathcal{D}$  est la dimension du polytope. Nous avons divisé l'ensemble de produits en  $\mathcal{F}$  familles. Pour chaque famille  $f \in \Psi = \{1, \dots, \mathcal{F}\}$  nous pouvons définir le nombre de sommets de son polytope  $N_\nu^f$ , avec  $\nu \in \Gamma^f = \{1, \dots, N_\nu^f\}$ , et le nombre de produits  $N_p^f$ , avec  $p \in \Omega^f = \{1, \dots, N_p^f\}$ .

La dimension de l'espace  $\mathcal{D}$  du polytope est égale au nombre de paramètres incertains  $\mathcal{U}^p$ , qui dans notre système vaut  $\mathcal{U}^p = 70$ . Les solveurs LMI n'arrivent pas à trouver une solution pour un problème de cette dimension. Néanmoins, puisque la plupart des paramètres sont liés par des relations physiques, nous pouvons déterminer un ensemble de paramètres indépendants  $\mathcal{U}^m \subset \mathcal{U}^p$  tels que

la dynamique du système est similaire, pour deux produits qui possèdent le même ensemble  $\mathcal{U}^m$ . Nous définissons aussi l'ensemble  $\mathcal{U}^s = \{\mathcal{U}^p \setminus \mathcal{U}^m\}$  comme l'ensemble des paramètres restants, qui dépendront de  $\mathcal{U}^m$ . L'ensemble  $\mathcal{U}^s$  peut être divisé en deux sous-ensembles  $\mathcal{U}^s = \{\mathcal{U}_{op}^s, \mathcal{U}_{fnc}^s\}$ . Le premier sous-ensemble  $\mathcal{U}_{op}^s$  contient les paramètres choisis par l'opérateur, comme les caractéristiques des cylindres. L'une des tâches principales des opérateurs est de prévenir les incidents dans le laminoir. Donc, ils doivent assurer une configuration du système garantissant un comportement standard ainsi que la sûreté du système. Cela revient à dire qu'ils utiliseront un sous-ensemble  $\mathcal{U}_{op}^s$  similaire pour laminier des produits avec les mêmes caractéristiques de façon à obtenir la même dynamique pour le système. Étant donné que l'ensemble  $\mathcal{U}^m$  inclut les caractéristiques physiques les plus importantes du produit, nous pouvons supposer que pour deux produits avec le même ensemble  $\mathcal{U}^m$ , l'opérateur choisira le même sous-ensemble  $\mathcal{U}_{op}^s$ . Le dernier sous-ensemble  $\mathcal{U}_{fnc}^s$  peut être calculé en utilisant des fonctions analytiques en connaissant les valeurs de  $\mathcal{U}^m$  et  $\mathcal{U}_{op}^s$ . Par exemple, la relation entre la vitesse de rotation et l'épaisseur de sortie de deux cages adjacentes est donnée par la loi de conservation de la matière. Alors, des produits qui ont le même ensemble  $\mathcal{U}^m$  auront aussi le même ensemble  $\mathcal{U}^s$ , en première approximation.

Nous avons trouvé  $\mathcal{U}^m = \{w, h_n, \sigma_1^0, \sigma_n^0\}$ , où  $w$  est la largeur de la tôle,  $h_n$  est l'épaisseur de sortie de la tôle dans la dernière cage et  $\sigma_1^0$  et  $\sigma_n^0$  représentent la dureté de la tôle dans la première et dans la dernière cage, respectivement.

Par conséquent, nous sommes arrivés à déterminer un système polytopique de la forme (14) avec  $N_v^f = 2^4$  sommets (plutôt que les  $2^{70}$  sommets nécessaires dans le problème original),  $\forall f \in \Psi$ . La réduction de  $N_v^f$  à une quantité acceptable pour les solveurs LMI nous permettra de trouver une solution pour la synthèse du régulateur robuste. Le prix à payer pour la simplification décrite auparavant est une approximation dans les composants de l'ensemble  $\mathcal{U}_{op}^s$ . Dans les prochaines sections, nous montrerons que la modélisation polytopique présentée permet de trouver un ensemble de familles améliorant les performances du système.

#### IV. SYNTHÈSE DU RÉGULATEUR $H_2$

Dans cette section, nous présentons le régulateur  $H_2$ . Nous considérons le système linéaire incertain en temps discret

$$\begin{cases} z(k+1) = \mathcal{A}z(k) + \mathcal{B}^u u(k) + \mathcal{B}^d d(k) \\ q(k) = C^q z(k) + D^{qu} u(k) \\ y(k) = C^y z(k) \end{cases} \quad (16)$$

où  $z \in \mathbb{R}^n$  est l'état,  $u \in \mathbb{R}^r$  est la commande,  $d \in \mathbb{R}^h$  est la perturbation,  $y \in \mathbb{R}^m$  la sortie mesurable et  $q \in \mathbb{R}^m$  la sortie pour la mesure des performances. De plus, nous considérons  $C^{q'} D^{qu} = 0$  et  $D^{qu'} D^{qu} \succ 0$ . Nous avons décidé de synthétiser un régulateur  $H_2$  par retour d'état, qui permet de déterminer une solution robuste par rapport aux incertitudes. De plus, ce type de technique permet de minimiser les effets des perturbations extérieures. Étant donnée la loi de contrôle

$$u(k) = Kz(k), \quad (17)$$

avec  $K \in \mathbb{R}^{r \times n}$ , et les matrices du système en boucle fermée  $A_\nu^{cl} = A_\nu + B_\nu^u K$  et  $C^{cl} = C^q + D^{qu} K$ , nous pouvons définir la matrice de transfert entre  $q$  et  $d$   $T_\nu^{dq}(\varsigma) = C^{cl}(\varsigma I - A_\nu^{cl})^{-1} B_\nu^d$  et sa norme  $H_2$   $\|T_\nu^{dq}\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \text{Tr}\{T_\nu^{dq}(\varsigma)^* T_\nu^{dq}(\varsigma)\} d\omega$ , où  $\text{Tr}(W)$  représente la trace de  $W$  et  $\varsigma = e^{j\omega}$ ,  $\forall \nu \in \Gamma$ . Le théorème suivant permet de calculer une matrice de gain  $K = \underset{K}{\text{argmin}} \|T_\nu^{dq}\|_2^2$  telle que le système (16) est asymptotiquement stable  $\forall \nu \in \Gamma$ .

*Théorème 1:* [4] S'il existe des matrices définies positives  $W = W'$ ,  $P_\nu = P_\nu'$ , des matrices  $X$ ,  $L$  et un scalaire  $\mu > 0$  telles que les LMI

$$\text{Tr}(W) < \mu \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} W & C^q X + D^{qu} L \\ (\star)' & X + X' - P_\nu \end{bmatrix} \succ 0 \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} P_\nu & A_\nu X + B_\nu^u L & B_\nu^d \\ (\star)' & X + X' - P_\nu & 0 \\ (\star)' & (\star)' & I \end{bmatrix} \succ 0 \quad (20)$$

sont vérifiés  $\forall \nu \in \Gamma$ , alors le régulateur (17) avec  $K = LX^{-1}$  garantit la stabilité asymptotique du système (16), avec  $\|T_\nu^{dq}\|_2^2 < \mu$ .

Le Théorème 1 permet de caractériser un ensemble de correcteurs stabilisants et garantissant que  $\|T_\nu^{dq}\|_2$  est inférieur à un scalaire  $\mu > 0$ . Pour choisir le correcteur qui minimise ce transfert, on résout le problème d'optimisation convexe suivant :

$$\begin{cases} \min \mu \\ \text{sous (18) - (20)}. \end{cases} \quad (21)$$

#### V. RÉSULTATS

Dans cette section, nous appliquons la loi de contrôle décrite dans les sections précédentes au laminoir Arcelor-Mittal situé dans l'usine d'Eisenhüttenstadt. Nous avons divisé l'ensemble des produits traités en  $\mathcal{F}$  familles et, pour chaque famille, nous avons synthétisé un régulateur différent dans la forme (17). Cette stratégie permet d'améliorer les performances du système, par rapport aux performances obtenues en utilisant un seul régulateur pour tous les produits. En revanche, le nombre de familles doit être limité afin de ne pas compliquer la gestion des données dans l'usine.

##### A. Boite à Outils RSCT

Afin d'obtenir une procédure simple et systématique qui permet d'étendre le contrôle de dépôt de bande dans plusieurs usines, nous avons développé une boite à outils *Matlab*, appelée *Robust Steering Control Toolbox (RSCT)* [8]. Elle donne la possibilité de construire une base de données de produits et d'implémenter l'algorithme décrit dans la section III. Ceci permet de diviser la base de données en  $\mathcal{F}$  familles, de calculer les produits correspondants aux sommets,  $\forall f \in \mathcal{F}$ , et le système linéaire correspondant à chaque produit (voir la section II). Ces informations seront utilisées pour calculer les gains des régulateurs  $K^f$ , utilisant le Théorème 1. La boite à outils contient aussi le simulateur du laminoir qui permet d'analyser le comportement du système. Le problème LMI (18)-(20) a été résolu

TABLE I  
BORNES DES FAMILLES

Famille	$w$	$h_n$	$\sigma_1^0$	$\sigma_n^0$
1	810 – 1200	1.9 – 3	22 – 65	30 – 95
2	810 – 1200	3 – 4.5	22 – 65	30 – 95
3	810 – 1200	4.5 – 6.2	22 – 65	30 – 95
4	1200 – 1670	1.9 – 3	22 – 65	30 – 95
5	1200 – 1670	3 – 4.5	22 – 65	30 – 95
6	1200 – 1670	4.5 – 6.2	22 – 65	30 – 95

utilisant le solveur LMI *SeDuMi* [13] et la boîte à outils *Matlab YALMIP*, qui fournit une interface simple pour les solveurs LMI les plus utilisés [7].

### B. Calcul des Régulateurs

Les essais expérimentaux effectués nous ont conduit à diviser la base de données en  $\mathcal{F} = 6$  familles, en fonction de l'ensemble des paramètres principaux  $\mathcal{U}^m = \{w, h_n, \sigma_1^0, \sigma_n^0\}$ . Les bornes des familles sont résumées dans la table I.

Le système de contrôle a été synthétisé en temps discret, avec un temps d'échantillonnage  $T_s = 0.05 \text{ sec}$  (une borne inférieure pour  $T_s$  est imposée par les limites des actionneurs). Le Théorème 1 permet de déterminer un gain  $K^f$  qui garantit la stabilité robuste du système en boucle fermée pour chaque famille  $f \in \Psi$ .

Les matrices de poids  $C^{q,f}$  et  $D^{qu,f}$  ont été choisies telles que  $\|K^f\|_\infty \leq 10^{-2}$  car, pour expérience, ce choix permet de respecter les contraintes sur  $\Delta S$  décrites dans la section II. Ces contraintes qui sont nécessaires afin d'obtenir une bonne qualité du produit ( $-10 \mu m < \Delta h_n < 10 \mu m$ ).

### C. Résultats de Simulation

Dans la suite, nous présentons les résultats de simulation pour un produit  $p$  avec  $\mathcal{U}^m = \{967, 2.02, 27.9, 40.1\}$ , qui appartient à la famille 1 (table I). La figure 2 montre l'évolution de la sortie  $Z$ .

Le trait plein représente l'évolution de  $Z$  avec le gain de régulation  $K^1$ . Le trait discontinu montre l'évolution de  $Z$  avec un régulateur LQ classique, synthétisé pour un produit moyen par rapport à la famille 1. Le trait pointillé montre l'évolution de  $Z$  avec un régulateur LQ classique synthétisé pour un produit moyen par rapport à l'ensemble de la base de données. Ce dernier régulateur est présenté dans [3].

Comme attendu, la division de la base de données en plusieurs familles améliore les performances du système. De plus, le régulateur  $H_2$  permet de tenir compte des paramètres incertains et de minimiser les effets de la perturbation extérieure, qui est due aux vibrations du "coilbox". La dernière ligne montre l'évolution de  $Z$  sans régulateur. Nous pouvons noter que dans ce cas la sortie est sujette à saturation, c'est-à-dire que la tôle frotte contre les guides à cause de la valeur élevée de  $Z$ . La tôle risque de se déchirer ou de se replier sur elle-même. Outre le fait que cette tôle devient inutilisable, un incident de laminage de ce type peut engendrer de sérieux défauts sur les cylindres de travail.

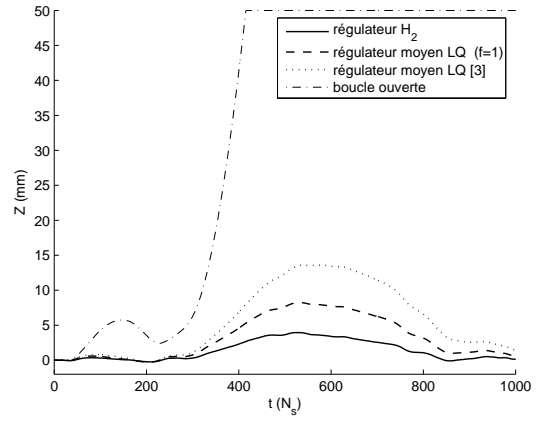


Fig. 2. Évolution du décentrement de bande en sortie du système

### D. Résultats Expérimentaux

Ici, nous présentons quelques résultats expérimentaux.

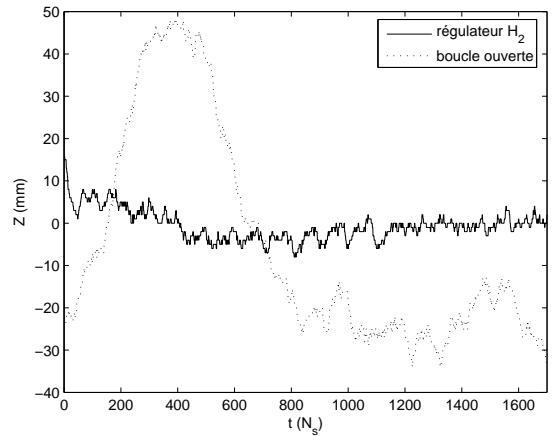


Fig. 3. Évolution du décentrement de bande

Sur la figure 3, nous montrons l'évolution de  $Z$  pour deux produits consécutifs et avec le même  $\mathcal{U}^m = \{1510, 2.02, 59.1, 72.5\}$  (famille 4). Le trait plein correspond à l'évolution de  $Z$  lorsque le système de contrôle est actif, tandis que le trait pointillé correspond à l'évolution de  $Z$  en boucle ouverte. L'amélioration des performances, par rapport à la valeur de  $Z$ , est évidente.

Dans la suite, nous montrons quelques statistiques. Sur la Fig. 4, nous comparons l'écart type du décentrement de bande  $\sigma(Z)$  obtenu utilisant le système de contrôle basée sur le régulateur  $H_2$ , et l'écart type du décentrement de bande  $\sigma(Z)$  obtenu avec le système en boucle ouverte. Les statistiques concernent 100 tôles contrôlées et 200 tôles en boucle ouverte. Toutes les familles ont été testées. L'amélioration des performances est évidente. Lorsque le système travaille en boucle ouverte, le décentrement de bande augmente d'environ le 125%. Les bornes sur  $\Delta S$  ont été toujours respectées et le coin  $\Delta h_n$  a été toujours maintenu dans les limites du cahier des charges ( $\pm 10 \mu m$ ).

Sur la Fig. 5, nous comparons l'écart type du décentrement de bande  $\sigma(Z)$  obtenu utilisant le système de contrôle basée sur le régulateur  $H_2$ , et l'écart type du décentrement de bande  $\sigma(Z)$  utilisant le système de contrôle basé sur

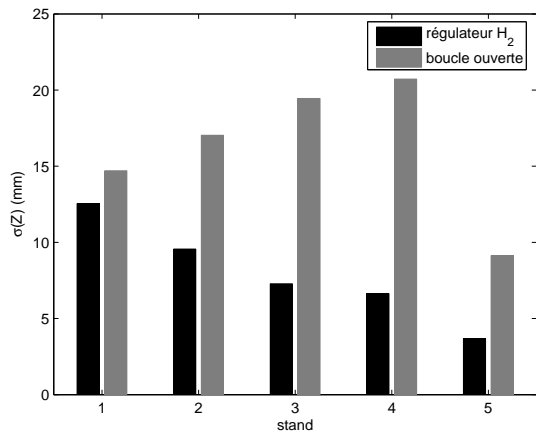


Fig. 4. Comparaison de  $\sigma(Z)$  : système contrôlé par le régulateur  $H_2$  et en boucle ouverte

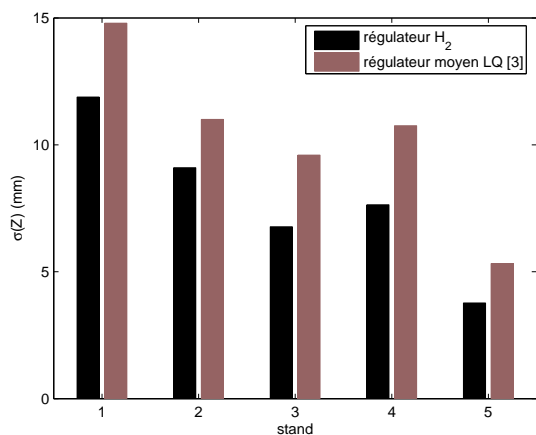


Fig. 5. Comparaison de  $\sigma(Z)$  : système contrôlé par le régulateur  $H_2$  et par le régulateur LQ

le régulateur moyen LQ décrit dans [3]. Les statistiques concernent 44 tôles appartenant à toutes les familles. Afin de garantir des conditions équivalentes de laminage (paramètres des tôles, caractéristiques des cylindres, température extérieure, asymétries dans les systèmes, etc.) et donc d'obtenir des résultats cohérents, nous avons confronté des tôles identiques. Nous pouvons observer une amélioration des performances lorsque le système de contrôle  $H_2$  est actif (environ le 35%). L'écart type du coin  $\sigma(\Delta h_n)$  a été aussi amélioré en passant de  $7.82 \mu\text{m}$  (LQ) à  $5.56 \mu\text{m}$  ( $H_2$ ).

## VI. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé un régulateur robuste  $H_2$  capable de garantir la stabilité du laminoir et d'améliorer ses performances. Nous avons créé une base de données qui décrit l'ensemble des produits traités par le système, et nous l'avons divisée en six familles de produits. De plus, nous avons présenté une méthode qui permet de réduire la complexité du problème en exploitant les relations physiques entre les paramètres. Cette méthode permet de formuler le problème de stabilisation comme un problème convexe et, par conséquent, de synthétiser un régulateur  $H_2$  différent pour chaque famille en utilisant des techniques LMI.

Nous avons aussi montré des résultats en simulation et expérimentaux qui concernent le laminoir ArcelorMittal d'Eisenhüttenstadt, qui prouvent l'efficacité de la méthode proposée. Le décentrement de bande a été réduit de façon significative, par rapport aux résultats en boucle fermée et aussi au vieux système de contrôle, qui ne tenait pas en compte les incertitudes en avant été conçu pour réguler des produits spécifiques.

Le contrôle de décentrement de bande dans un laminoir est un sujet important dans la production d'acier. Afin d'adapter la méthode présentée dans des autres laminoirs, nous avons développé une procédure systématiques. Naturellement, un calage du modèle et la construction d'une base de données de produits sont nécessaires.

Dans la suite, nous nous proposons de résoudre le problème de stabilisation concernant la phase "queue de bande", qui est la dernière phase du processus de laminage à chaud. Dans cette phase, la tôle quitte les cages l'une après l'autre et, chaque fois que la tôle quitte une cage, la dynamique du système change. Donc, le laminoir peut alors être décrit comme un système à commutations.

## RÉFÉRENCES

- [1] B.D.O. Anderson and J.B. Moore. *Optimal control : linear quadratic methods*. Prentice-Hall, 1989.
- [2] S. Boyd, L.E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in system and control theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.
- [3] J. Daafouz, R. Bonidal, C. Iung, P. Szczepanski, N. Naumann, and U. Koschack. New steering control at EKO stahl finishing mill. In *The Iron & Steel Technology Conference and Exposition*, 2008.
- [4] M.C. de Oliveira, J.C. Geromel, and J. Bernussou. An LMI optimization approach to multiobjective and robust  $H_\infty$  controller design for discrete-time systems. *International Journal of Control*, 75 :666–679, 2002.
- [5] Y. Furukawa, S. Fujii, and H. Taoka. Application of steering control in hot strip mill. *Tetsu-to-Hagane (Journal of the Iron and Steel Institute of Japan)*, 78(8) :141–144, 1992.
- [6] P. Kokotovic, H.K. Khalil, and J. O'Reilly. *Singular perturbation methods in control : analysis and design*. Academic Press, 1986.
- [7] J. Löfberg. Yalmip : A toolbox for modeling and optimization in matlab. In *IEEE international symposium on computer aided control systems design*, 2004.
- [8] I. Mallocci, R. Bonidal, P. Szczepanski, J. Daafouz, and C. Iung. *Robust Steering Control Toolbox*. Internal Rapport ArcelorMittal, 2008.
- [9] Y. Marushita, H. Ikeda, K. Yano, and S. Shindo. Advanced control method of steering on the hot rolling mill. In *5th IFAC Automation in Mining, Mineral, and Metal Processing*, 2001.
- [10] D.S. Naidu. Singular perturbations and time scales in control theory and applications : an overview. *Dynamics of Continuous, Discrete & Impulsive Systems. Series B. Applications & Algorithms*, 9(2) :233–278, 2002.
- [11] Y. Okamura and I. Hoshino. State feedback control of the strip steering for aluminum hot rolling mill. *Control Engineering Practice*, 5(8) :1035–1042, 1997.
- [12] M.J. Steeper and G.D. Park. Development of steering control system for reversing hot mills. *Iron and steel engineer*, 75(11) :21–24, 1998.
- [13] J.F. Sturm. Using sedumi 1.02, a matlab toolbox for optimization over symmetric cones. *Optimization Methods and Software*, 11-12 :625–653, 1999.