



**HAL**  
open science

## Régulation d'étamage sur bande d'acier

Frédéric Thibault

► **To cite this version:**

Frédéric Thibault. Régulation d'étamage sur bande d'acier. Automatique / Robotique. 2015. dumas-01633605

**HAL Id: dumas-01633605**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01633605>**

Submitted on 13 Nov 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**

CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE NANTES

---

**MEMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

**SPECIALITE : SYSTEMES AUTOMATISES**

par

Frédéric THIBAULT

---

**Titre : Régulation d'étamage sur bande d'acier**

**Soutenu le 20 Octobre 2015**

---

**JURY**

*M. BOURLES, Professeur Cnam Paris, Président*

*M. GUGLIELMI, CNRS*

*M. GATEFAIT, Responsable du département DSSP, ArcelorMittal Basse Indre*

*M. VERMOT DES ROCHES, Coordinateur industriel, ArcelorMittal Basse Indre*

*M. DUCHESNE, Responsable du département Aval, ArcelorMittal Basse Indre*

*M. Erwan LASTENNET, Coordinateur régional Ecole d'ingénieur, Cnam Pays de Loire*

## Remerciements

---

*Grâce à un environnement de qualité, j'ai pu suivre mon cursus et finalement effectuer un travail qui conduit à ce mémoire. Il est le point final de près de six années d'étude. Parmi les nombreuses personnes qui m'ont soutenues, je tiens plus particulièrement à remercier :*

*Mr Guglielmi pour son aide pédagogique dans la rédaction. Il m'a aidé à mieux cerner les limites de ce que l'on attendait de moi dans cet exercice.*

*Mr Lastennet pour avoir permis et accompagné la réalisation de ce mémoire.*

*L'entreprise ArcelorMittal et son directeur Mr Pennerad pour m'avoir accompagné dans cette démarche depuis le début et pour m'avoir fait confiance tout au long du parcours d'ingénieur.*

*Mr Gatefait pour avoir œuvré au sein d'ArcelorMittal à la mise en place des conditions de réussite de ce mémoire. Merci aussi pour sa présence et ses conseils tout au long de ces six ans.*

*Mr Duchesne pour avoir organisé mon remplacement pour la durée de ce mémoire.*

*Mr Friedrich pour les portes qu'il m'a ouvertes vers l'extérieur d'Arcelormital Basse Indre.*

*Plus généralement, je tiens de nouveau à remercier Mr Guglielmi et Mr Lastennet qui me suivent depuis près de six ans. Dans un contexte difficile, sans leur implication personnelle, je n'aurais pas eu accès à cette formation. Ils ne m'ont pas seulement permis de terminer mon parcours d'ingénieur, ils m'ont aussi motivé et relancé dans les moments difficiles.*

*Enfin merci à ma femme et mes trois enfants d'avoir accepté mes absences et mes semi-présences pendant ce cursus. Leurs encouragements et leurs sacrifices ont eux aussi été précieux.*

*Merci à vous tous pour vos efforts et votre soutien.*

## Glossaire

---

- **Coil** : Bobine d'acier brut.
- **du/dt** : Dérivée de la tension.
- **Electrolyte** : Liquide acide permettant la réaction d'électrolyse.
- **Etamage** : Dépôt d'étain sur un support.
- **Fer blanc** : Acier doux recouvert d'étain et destiné à l'industrie d'emballage.
- **IHM** : Interface Homme / Machine.
- **LRE1** : Ligne de Revêtement Electrolytique N°1.
- **LRE2** : Ligne de Revêtement Electrolytique N°2.
- **PID** : Proportionnel Intégral Dérivée.
- **PRBS** : Pseudo Random Binary Signals.  
ou **SBPA** : Séquence Binaire Pseudo Aléatoire.
- **Redresseur** : Organe électrique permettant la transformation d'un courant alternatif en courant continu.
- **Revêtement électrolytique** : Dépôt d'une couche de protection par électrolyse sur une bande d'acier.
- **Sn** : Symbole chimique de l'étain.
- **TOR** : Tout Ou Rien.

## Table des matières

---

|   |    |
|---|----|
| Remerciements.....  | 2  |
| Glossaire .....   | 3  |
| Table des matières.....   | 4  |
| Introduction .....  | 6  |
| 1 Contexte et enjeux .....  | 7  |
| 1.1 Présentation d'ArcelorMittal.....                                 | 7  |
| 1.2 L'Usine de Basse Indre.....                                       | 8  |
| 1.2.1 Les 5 étapes de la fabrication.....                             | 9  |
| 1.2.2 Quelle utilisation du fer blanc ? .....                         | 10 |
| 1.2.3 Contexte économique .....                                       | 11 |
| 1.2.4 L'organisation .....  | 12 |
| 1.3 Etamer sur la Ligne de Revêtement Electrolytique N°1 (LRE1) ..... | 14 |
| 1.3.1 La section étamage.....   | 17 |
| 1.3.2 Commande des systèmes.....                                      | 19 |
| 1.4 Objectifs du projet.....  | 21 |
| 2 Etude et simulation .....   | 24 |
| 2.1 Qu'existe t-il ?.....   | 24 |
| 2.2 Le point de vue des utilisateurs.....                             | 25 |
| 2.3 Le simulateur .....   | 26 |
| 2.3.1 Générateur de références et de perturbations.....               | 27 |
| 2.3.2 Process mécanique.....  | 28 |
| 2.3.3 Process chimique.....   | 29 |
| 2.3.4 L'actionneur.....   | 32 |
| 2.3.5 Validation du modèle .....                                      | 36 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3     | Le régulateur .....                        | 38 |
| 3.1   | Conception .....                           | 38 |
| 3.1.1 | Loi d'étamage .....                        | 39 |
| 3.1.2 | Choix des redresseurs.....                 | 40 |
| 3.1.3 | Calcul des références.....                 | 43 |
| 3.2   | Limites du régulateur .....                | 47 |
| 3.3   | Amélioration de la solution .....          | 53 |
| 4     | Mise en œuvre .....                        | 55 |
| 4.1   | Architecture des automatismes .....        | 55 |
| 4.2   | Modification de câblage.....               | 57 |
| 4.3   | Formation et accompagnement technique..... | 58 |
| 4.4   | Mise en service .....                      | 59 |
| 5     | Conclusion .....                           | 60 |
|       | Table de figures.....                      | 61 |
|       | Bibliographie .....                        | 62 |

## Introduction

---

L'usine ArcelorMittal de Basse Indre (44) est spécialisée dans les aciers pour emballage et notamment le « fer blanc ». Le « fer blanc » est le matériau de base pour la fabrication des boîtes de conserves. Il est aussi utilisé dans d'autres applications telles que les bouchons couronnes ou les capsules de bocaux. Il est constitué d'acier recouvert d'une fine couche d'étain. Ce dernier protège l'acier de la corrosion et lui permet de conserver ses vertus alimentaires.

Comme dans de nombreux autres secteurs, les aciers pour emballages sont fortement concurrencés. On pense aux concurrents directs bien sûr, qui produisent eux aussi des aciers pour emballage, mais la concurrence porte aussi sur les autres matières (verre, aluminium, plastiques,...) utilisables pour les emballages alimentaires. Pour Frédéric Bastiat, économiste au XIX<sup>ème</sup> siècle, «Détruire la concurrence, c'est tuer l'intelligence.». En effet, afin de rester compétitive, l'usine de Basse Indre se renouvelle constamment. Elle évolue avec son environnement. Dans les faits, les évolutions portent sur son organisation, son process ou ses outils de production. Que ce soit en interne ou avec le soutien de personnes externes à l'usine, l'évolution est permanente et indispensable à la survie de l'entreprise.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique : une action permettant d'améliorer la productivité d'une ligne de fabrication et de réduire ses coûts. Il décrit le travail sur le système de contrôle-commande du dépôt d'étain en permettant d'optimiser l'épaisseur d'étain déposée, et augmente la productivité en diminuant les pertes de métal lors des changements de vitesse. La méthodologie employée permet de limiter les coûts de développement par l'utilisation d'un simulateur pour la mise au point du système de contrôle-commande.

Le plan du présent document est le suivant :

Après avoir présenté la problématique générale, une première partie est consacrée à la description du procédé d'étamage et son contexte, les enjeux seront également rappelés. Ensuite, les aspects techniques du simulateur et la conception du nouveau contrôle commande sont expliqués. Enfin, la mise en œuvre est abordée dans une troisième partie avant une conclusion.

## 1 Contexte et enjeux

---

Ce mémoire répond au besoin d'amélioration de la performance industrielle du site ArcelorMittal de Basse Indre (44).

### 1.1 Présentation d'ArcelorMittal

---

ArcelorMittal est une société anonyme, leader mondial de la production d'acier. Elle compte 250 000 employés dans 60 pays, dont la moitié en Europe. Son chiffre d'affaires est de 80 milliards d'euros en 2013.

Le groupe actuel est issu d'une OPA de la famille Mittal sur Arcelor en 2006 (Figure 1). La famille Mittal détient toujours 40% du groupe, qui est dirigé par un de ses membres Lakshmi Mittal.

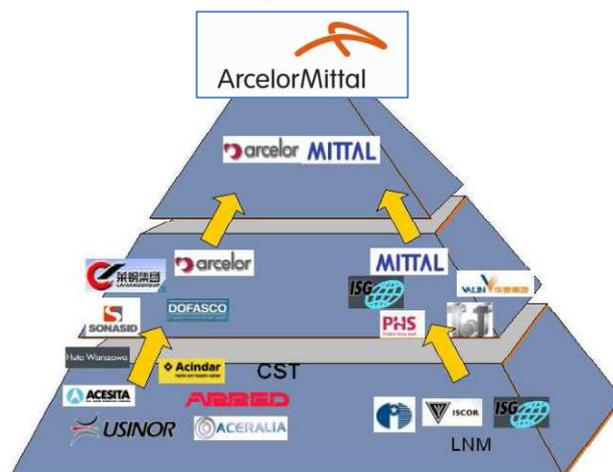


Figure 1 - Historique groupe Arcelormittal (Service, 2015)

Les activités d'ArcelorMittal vont de l'extraction minière jusqu'à la vente d'acier revêtu pour l'automobile, la construction ou l'emballage.

## 1.2 L'Usine de Basse Indre

---

Le site de Basse Indre (44) est situé en bord de Loire près de Nantes (Figure 2). Il fait partie de l'entité « ArcelorMittal Atlantique Loraine » qui comprend sept sites de production dans la moitié nord de la France et au Luxembourg.



Figure 2 - Photo aérienne Arcelormittal Basse Indre (Service, 2015)

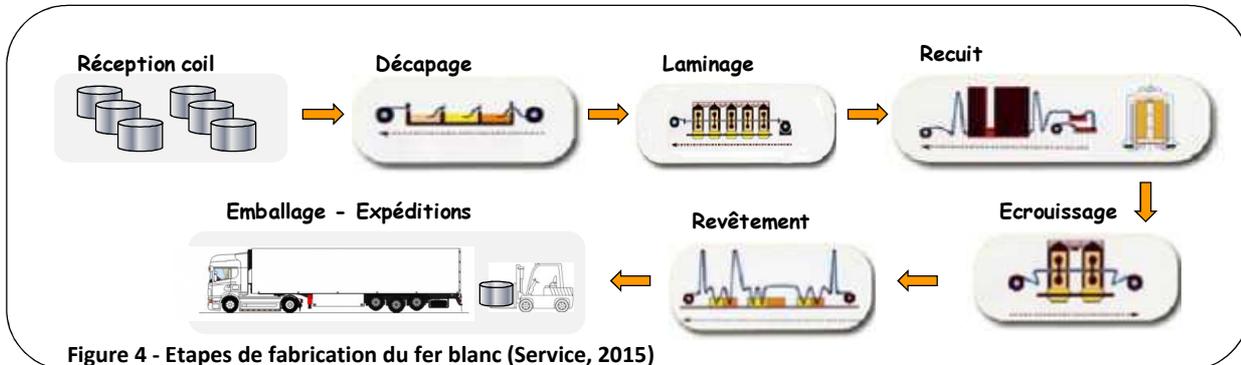
Sa spécialité est la production d'acier revêtu d'étain (Figure 3) destiné à la fabrication de boîtes de conserve. Ce produit est couramment appelé « Fer blanc ».



Figure 3 - Bobines d'acier revêtu d'étain

### 1.2.1 Les 5 étapes de la fabrication

L'usine est alimentée en bobine d'acier brut (ou Coil) depuis les aciéries de Dunkerque (59) et de Florange (57). Cinq grandes étapes y sont réalisées : Figure 4.



#### **DECAPAGE :**



Cette ligne élimine l'oxyde de fer formé sur la bande au cours du laminage à chaud et prépare ainsi au laminage à froid.

#### **LAMINAGE :**



Le laminage à froid a pour objectif de réduire l'épaisseur de la bande de 2 mm à 0.2 mm. A la sortie, la bande a perdu sa souplesse, elle est «cassante».

#### **RECUIT :**



Ce traitement thermique rend à la bande la plasticité qu'elle possédait avant le laminage à froid, en provoquant une recristallisation de l'acier.

#### **ECROUissage :**



L'écrouissage permet de redonner à la bande la raideur voulue ainsi que l'état de surface désiré par le client.

#### **REVETEMENT :**



Les lignes de revêtement, au nombre de deux, transforment le fer noir en fer blanc. La bande d'acier se voit revêtue d'étain ou de chrome. Ce revêtement protège l'acier de l'oxydation et facilite, par la suite, les opérations de soudage réalisées chez les clients.

## 1.2.2 Quelle utilisation du fer blanc ?

Doté d'un potentiel de 400 000 tonnes par an, ArcelorMittal Basse Indre produit les aciers destinés à la fabrication de : (Figure 5 et Figure 6)

- Fonds de boites et anneaux « ouverture facile » ;
- Corps de boites (soudés électriquement ou embouties) ;
- Capsules ;
- Bouchons couronne.



Figure 5 – Produits des clients d’Arcelormittal (mathisprost.lu, 2015)

Le site de Basse Indre, situé à proximité de Nantes, occupe une situation stratégique à proximité de ses clients en Bretagne (conserveries de poissons) et Pays de la Loire (Maraîchages). 70% de sa production est destinée à des clients locaux. Cependant, les 500 salariés du site ainsi que les 100 cotraitants contribuent à satisfaire 150 clients dans 50 pays : Crown, Ardagh, US Can, Franpac.



Figure 6 - Produits des clients d’Arcelormittal (cuisine.com, 2015)

### 1.2.3 Contexte économique

---

ArcelorMittal, comme de nombreuses industries, évolue dans un contexte économique mondialisé et fortement concurrentiel. Cet environnement, ajouté aux crises de ces dernières années, l'oblige à évoluer en permanence.

Afin d'optimiser la rentabilité des installations, une réorganisation industrielle a eu lieu en 2014. Celle-ci a abouti à la fermeture provisoire des lignes de décapage et de laminage de Basse Indre. L'usine est désormais alimentée en produits laminés depuis le site de Florange (57). Cette opération a été réalisée sans licenciement. Les personnes concernées ont été reclassées à Basse Indre sur d'autres lignes de production. Malgré tout, cette tranche de l'histoire de l'entreprise a été socialement difficile à vivre.

Même si ArcelorMittal est leader mondial dans sa spécialité, l'entreprise est confrontée aux enjeux de performance industrielle. La proximité des clients est un atout mais n'est pas une garantie pour l'avenir du site de Basse Indre. Chacun des salariés et cotraitants s'attache donc à améliorer les performances de l'usine. Le travail réalisé pour ce mémoire en fait partie.

## 1.2.4 L'organisation

Afin d'assurer les cinq étapes de fabrication, des équipes d'ouvriers, de techniciens et d'ingénieurs se relaient au sein de l'usine. Une partie des salariés travaille en poste (365 jours/an 24h/24h), l'autre partie travaille de jour (5j/7j) avec des périodes d'astreinte.

La structure de l'encadrement est pyramidale. L'usine est divisée en grands services et/ou départements sous la direction de Philippe PENNERAD (Figure 7).

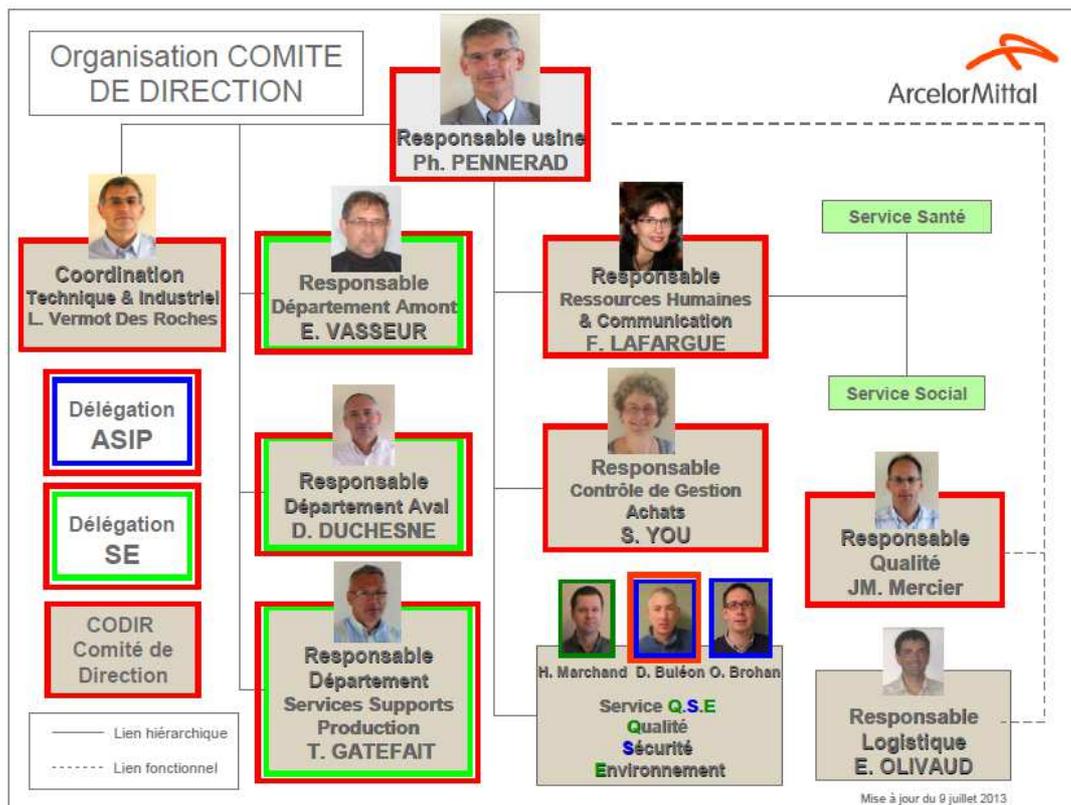


Figure 7 - Comité de direction d'ArcelorMittal Basse Indre (Arcelormittal S. c., 2015)

L'objectif de cette organisation est d'avoir des départements de production qui soient appuyés par les services et départements supports de production.

Les lignes de revêtement sont au cœur du département Aval. Didier Duchesne en est le responsable (Figure 8). Comme pour le niveau supérieur, l'organisation est basée sur l'assistance des fonctions supports aux fonctions de production, mais à l'échelle du département.

Les services de maintenance sont en grande partie intégrés aux départements de production. Une partie de la maintenance mécanique est même réalisée par les équipes d'exploitation. C'est une spécificité du site.

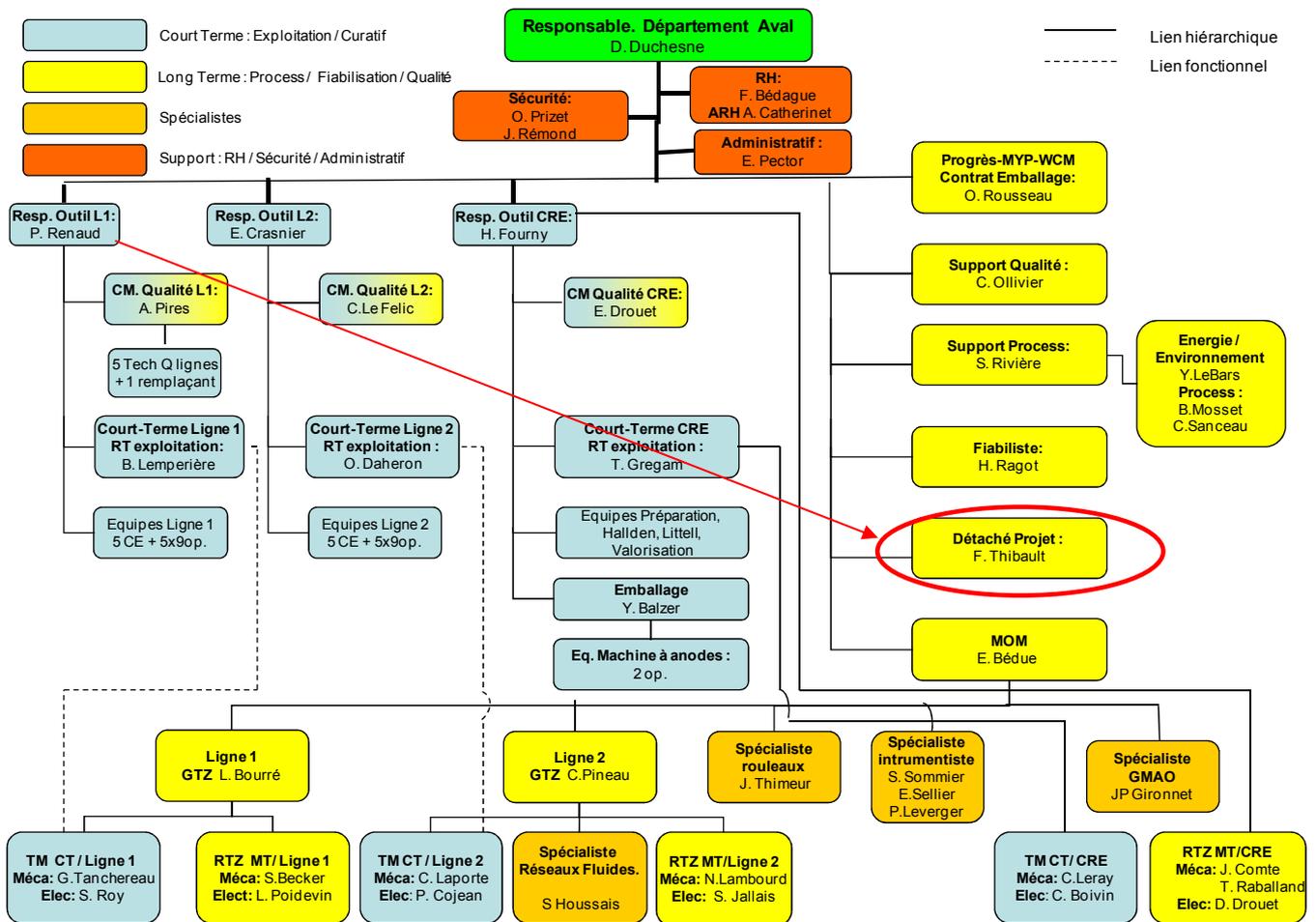


Figure 8 - Organigramme Département Aval ArcelorMittal Basse Indre (Service, 2015)

Pour la réalisation du mémoire, j'ai été détaché de mon poste de responsable d'outil de la Ligne de Revêtement Electrolytique N°1 (LRE1) afin de me consacrer entièrement à ce projet. C'est aussi sur cette ligne de production que se situe l'action du projet.

### 1.3 Etamer sur la Ligne de Revêtement Electrolytique N°1 (LRE1)

---

Le produit fini demandé par les clients d'Arcelormital répond à des spécifications précises, qu'elles soient dimensionnelles, alimentaires ou visuelles.

Tout d'abord, la bande d'acier doit avoir une épaisseur variable entre 0,13 mm et 0,49 mm en fonction de son utilisation future. De même, la largeur demandée varie entre 600 mm et 1050 mm.

Ensuite, les caractéristiques du revêtement sont détaillées. Pour l'étamage, les commandes vont spécifier des différences de taux d'étain en fonction des produits mais aussi en fonction des faces sur le même produit. Par exemple, la couche d'étain déposée sur la face extérieure d'une boîte de conserve est moins épaisse que pour l'intérieur soumis à l'agression du contenant (tomates, ananas,...). Ce dépôt varie de 1 g/m<sup>2</sup> à 15,1 g/m<sup>2</sup>. Il est régi par la norme ISO 2093.

Enfin, l'aspect visuel des produits doit être soigné puisque ces surfaces sont souvent directement soumises au regard du client final.

Pour satisfaire à ces spécifications, la LRE1 est composée d'une succession de processus permettant l'étamage des deux faces d'une bande d'acier à une vitesse maximale de 460 m/mn (environ 30 km/h). Le dépôt d'étain sur l'acier en est le cœur. Mais pour garantir un produit de qualité, il faut préparer la surface de la bande avant l'étamage (planage, dégraissage, décapage) et apporter des finitions à l'étain après le dépôt (fusion, traitement chimique, huilage) (Figure 9). Cette ligne de production est longue d'environ 250 m.



La bande d'acier est déroulée en continu pour passer successivement dans les différents processus de traitement. Elle est ensuite ré-enroulée en sortie de l'installation. A l'entrée de la ligne, on raccorde par soudure l'extrémité finale de la bobine qui vient de se terminer, avec le début de celle qui va commencer. De même, à la sortie, on coupe la bande et on évacue la bobine lorsque celle-ci a atteint la longueur demandée par le client.

Afin de permettre la continuité du traitement au moment des changements de bobine, sur le principe d'un buffer, des accumulateurs de bande sont situés en entrée et en sortie de ligne (Figure 10). Ils permettent au centre de la ligne de dérouler la bande en continu alors que les entrées et sorties fonctionnent de manière discontinue.

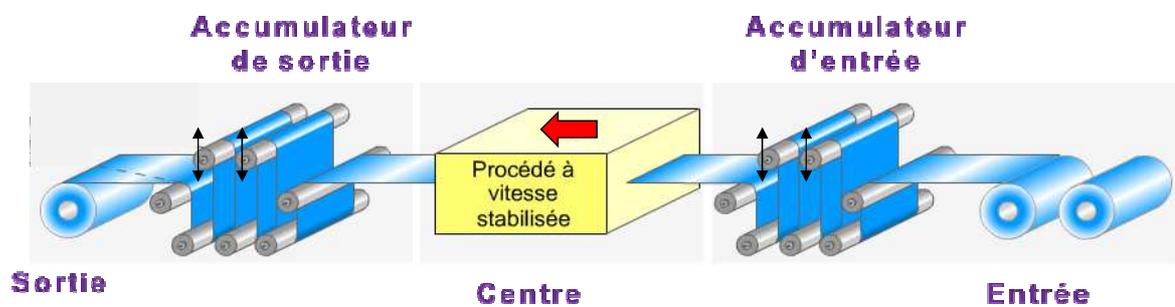


Figure 10 - Schéma d'une ligne avec accumulateurs de bande. (USP, 2015)

Malgré ce dispositif, il est nécessaire de ralentir le centre de la ligne lors des changements de bobines. L'unique bobineuse en sortie de ligne et l'accumulateur de petite taille nécessite une diminution de vitesse pour permettre de sortir une bobine sans arrêter la production. Nous verrons par la suite que ce point impacte fortement le fonctionnement de la régulation d'étamage.

### 1.3.1 La section étamage



Figure 11 - Photographie section étamage LRE1

La section (Figure 11) est composée de 10 bacs de traitement dans lesquels la bande passe successivement. Chaque bac contient un bain (l'électrolyte) nécessaire à la réaction d'électrolyse de l'étain. Des anodes en étain pur sont plongées dans les bacs face à la bande (Figure 12). Elles sont remplacées régulièrement par des opérateurs lorsqu'elles sont trop érodées.

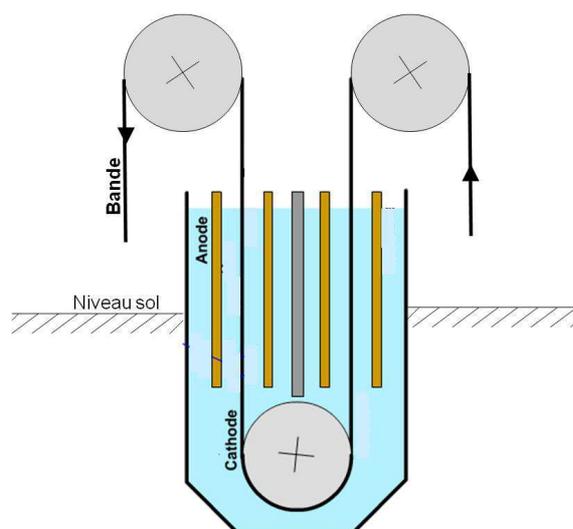


Figure 12 - Schéma d'un bac d'étamage LRE1

Enfin, pour réaliser l'électrolyse, chaque bac est alimenté en courant continu par un ou plusieurs redresseurs de courant. Les redresseurs sont mis en service ou non en fonction du taux d'étain demandé et de la vitesse de production.

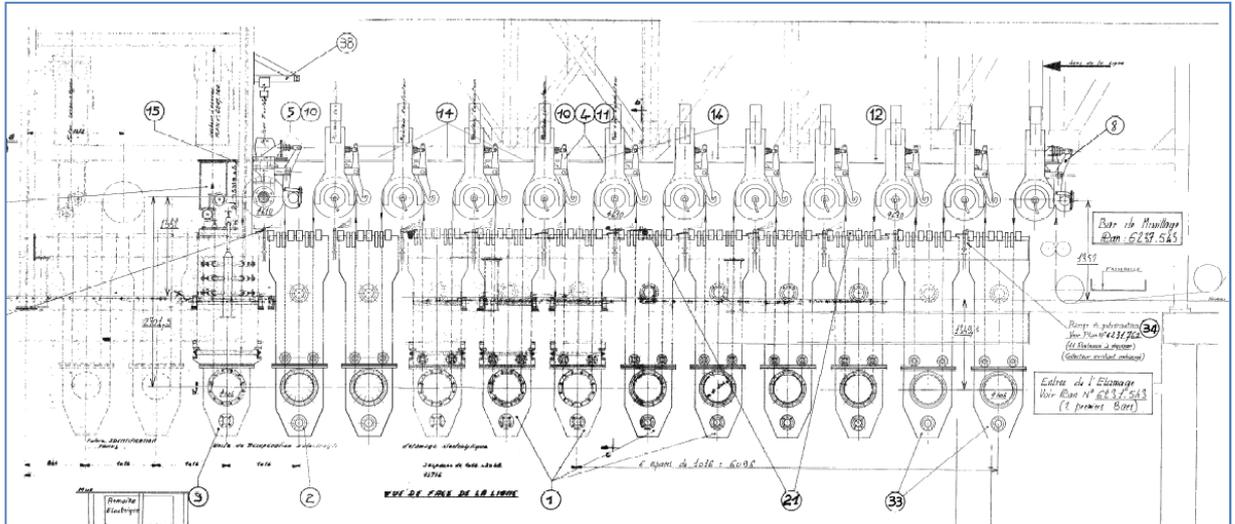


Figure 13 - Plan d'ensemble section étamage LRE1 (Arcelormittal S. c., 2015)

En prenant l'exemple d'une régulation d'étamage dans un seul bac, nous sommes en présence d'un système continu dont les principales lois physiques sont connues. La multiplication des bacs de traitement et la nécessité de les activer ou non, engendrent des discontinuités dans ce système. Le système de régulation doit gérer ces discontinuités.

### 1.3.2 Commande des systèmes

---

L'architecture du système de contrôle-commande de la LRE1 est composé de :

- 4 automates ALSPA C350 :  
Ils gèrent le séquentiel de commande et les affichages de défauts des sous ensembles « entrainement de bande » et « redresseurs ».
- 3 automates ALSPA 80MT :  
Ils calculent et distribuent les références aux variateurs de vitesse qui pilotent les moteurs de la ligne, et aux redresseurs de traitement de surface.
- 1 automate ALSPA 80HPCi :  
Il calcul et distribue les références de puissance à l'inducteur qui sert à la refusion de l'étain.
- 1 calculateur DIGITAL MicroVax :  
Il élabore la stratégie d'étamage et affiche les défauts en provenance des C350.
- 4 automates SCHNEIDER TSX-Premium :  
Ils équipent les sous ensembles independants (ex: positionnement cisaille de rives et compactage des rives, gestion des pompes et des vannes des circuits process,...)

Tous ces équipements communiquent directement ou indirectement avec un niveau supérieur chargé de l'enregistrement de données (Tracabilité du produit). De plus, douze postes de conduite sont répartis dans les différents pupitres de la ligne. Ce sont les Interfaces Homme / Machine (IHM).

La régulation d'étamage fonctionne grâce à trois de ces automates suivant le schéma fonctionnel Figure 14.

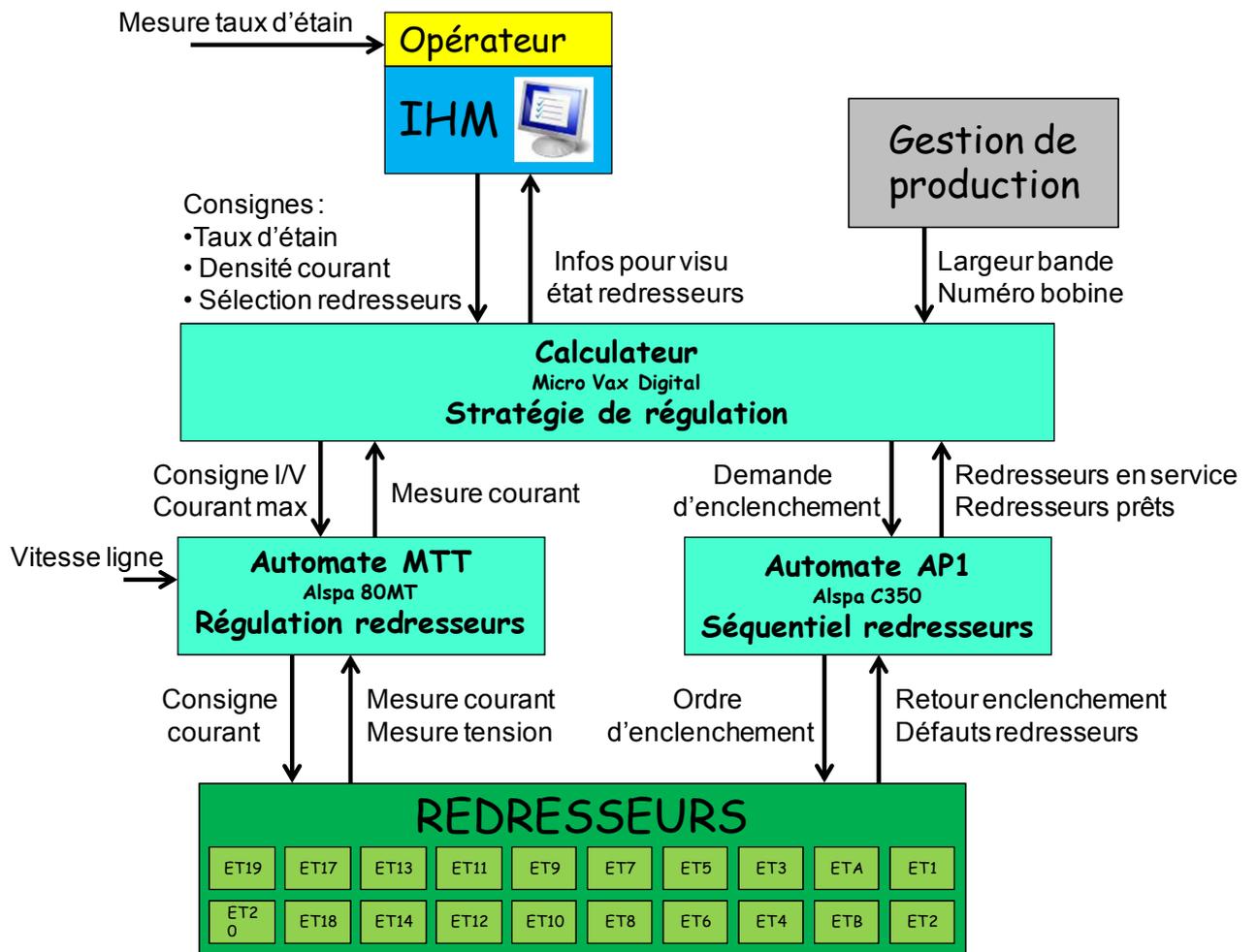


Figure 14 - Schéma fonctionnel Ex régulation d'étamage LRE1

## 1.4 Objectifs du projet

---

Le système de contrôle-commande d'étamage a été installé en 1989. Les choix faits lors de sa conception correspondaient à des besoins qui ont évolués au cours des années. De plus, les technologies actuelles permettent des performances en rapidité de calcul inatteignables auparavant.

Le besoin de moderniser en profondeur cette régulation est donc né petit à petit, devant l'impossibilité de faire évoluer le système actuel. Par l'analyse des points de vue des différents intervenants d'exploitation et de maintenance et par ma propre expérience de responsable de production sur cette ligne, j'ai identifié les points d'amélioration suivants et estimé les gains potentiels :

### 1) Boucler la régulation sur les mesures de taux d'étamage :

Il y a 5 ans, une jauge de mesure du taux d'étain a été installée sur la ligne. Cette mesure est exploitée par les opérateurs pour ajuster le taux d'étain à déposer et régler la position des anodes. En fermant cette boucle de régulation sans passer par l'opérateur, la régulation serait continue et le dépôt encore plus précis.

- ✓ Gain en consommation d'étain : 13,5 Tonnes /an (0,05 g/face)  
=> 238 k€/an

### 2) Augmenter la vitesse au passage de la soudure :

La conception du contrôle-commande ne prend pas en compte un changement de vitesse lors du passage d'une soudure dans la ligne. Or, la conception mécanique de la ligne impose un ralentissement à chaque changement de bobine et donc une accélération pendant que la soudure circule dans la ligne. En ré-accélérant plus tôt, sans attendre le passage de la soudure, les pertes de production sont limitées.

- ✓ Gain de productivité de 1,5 km/poste (100m/mn de plus 100m plus tôt)  
=> 52 k€/an

### 3) Augmenter les pentes d'accélération et de décélération en augmentant la dynamique des redresseurs :

- ✓ Gains non chiffrés : Cette amélioration n'apporte pas directement un gain à elle seule. L'augmentation de la dynamique des redresseurs permet de libérer une des contraintes qui empêche d'augmenter les pentes de la ligne. Mais ce n'est pas la seule.

#### 4) Permettre le dépôt de faible taux d'étain :

La précision insuffisante et la faible stabilité de la régulation ne permettent pas de déposer des taux d'étain très faible. Si l'opérateur vise le taux demandé, des défauts de sous étamage apparaissent. Il est donc obligé d'augmenter la consigne d'étamage. Un meilleur système de contrôle-commande doit permettre de diminuer la consommation d'étain.

- ✓ Gain consommation d'étain : 0,2 g/face sur 5% de la production (1,7 €/t)  
=> 12 k€/an

#### 5) Fiabiliser le modèle de régulation (Simplifier, rendre accessible) :

La grande majorité des programmes de la régulation sont en C ou en Fortran. L'accès au programme en dynamique est impossible. En ajoutant que la majorité des dépanneurs ont une formation électromécanique, le système est peu adapté à notre environnement. Les automates programmables utilisant un langage de programmation proche de la lecture d'un plan électrique sont plus adaptés.

- ✓ Gain de fiabilité 5 h/an  
=> 5 k€/an

#### 6) Former les intervenants maintenance et exploitation :

Les compétences et les connaissances sur la régulation d'étamage ont diminué au fur et à mesure des années. Ceci ralentit les interventions lors de la résolution d'anomalies et laisse la ligne plus longtemps à l'arrêt que si les intervenants étaient formés.

- ✓ Gains de fiabilité 5 h/an  
=> 5 k€/an

En dehors de ces 300 k€ de gains directs, je me suis attaché à simplifier au maximum l'exploitation par les opérateurs. L'objectif est de limiter les travaux de saisie répétitifs pour que l'opérateur puisse se concentrer sur des activités à plus forte valeur ajoutée, comme l'analyse de dysfonctionnements ou la recherche d'améliorations. Il n'y a pas de gains chiffrés sur ce point mais cet objectif est important.

Ce projet correspond parfaitement aux objectifs d'une étude conduisant à un mémoire CNAM tant dans la spécialité concernée (contrôle-commande) que dans le niveau d'intervention.

Le coût de la mise en œuvre de la modification est estimé à 50 000 euros en matériel et prestation de câblage, et à 270 jours d'étude interne (Tableau I).

**Tableau I - Suivi coût réfection régulation étamage**

|                             | <b>Estimation</b> | <b>Réalisé</b> |
|-----------------------------|-------------------|----------------|
| Cablage E/S automate        | 20 000 €          | 22 470 €       |
| Cablage platines thyristors | 15 000 €          | 15 300 €       |
| Fouriture thyristors        | 5 000 €           | 4 617 €        |
| Etude Régulation            | 220 j             | 230 j          |
| Etude IHM                   | 10 j              | 8 j            |
| Etude réseaux               | 3 j               | 3 j            |
| Dépose inutile              | 10 000 €          |                |
| Etude programmes inutiles   | 40 j              |                |

Le retour sur investissement est d'environ 6 mois.

Afin d'atteindre ces objectifs en limitant les impacts d'intervention sur la ligne, j'ai développé un simulateur. Ensuite, j'ai encodé le nouveau contrôle-commande et je l'ai mis en service.

## 2 Etude et simulation

---

Cette étude s'est déroulée en plusieurs phases. Dans un premier temps, j'ai recherché et analysé la bibliographie existante. En parallèle, j'ai interviewé les utilisateurs pour définir leurs besoins. Ensuite, j'ai commencé à développer un simulateur afin de reproduire les phénomènes physiques de l'étamage. Enfin, après validation de celui-ci, je l'ai utilisé pour analyser et comparer les performances des différents modes de régulation. Ceci a permis de rédiger le cahier des charges du nouveau système.

### 2.1 Qu'existe t-il ?

---

J'ai recherché de la documentation en m'appuyant d'une part sur les autres lignes d'étamage du groupe, et d'autre part sur les publications existantes.

Avec l'appui d'un bibliothécaire, force a été de constater qu'il n'y a pas beaucoup de publications dans ce domaine. Nous avons trouvé quelques documents décrivant le principe de l'étamage mais aucun concernant la difficulté d'asservir et/ou réguler un dépôt électrolytique en plusieurs étapes. Les industriels semblent vouloir garder ce savoir faire. Par contre, j'ai pu utiliser des notices de fonctionnement, des études et des notes de mes collègues d'ArcelorMittal.

Dans cette période, j'ai aussi eu l'opportunité de visiter le site d'un de nos concurrents : ThyssenKrupp Rasselstein (Allemagne). Pendant 3 jours, nous avons pu échanger et comparer les caractéristiques techniques de nos installations. Dans le cadre du droit à la concurrence, les informations recueillies se limitent à des prises de note car très peu de documents ont pu être échangés.

La comparaison a donc porté sur les lignes suivantes :

- ArcelorMittal - Etamage N°1 de Basse Indre (France) / Sujet du mémoire
- ArcelorMittal - Etamage N°2 de Basse Indre (France)
- ArcelorMittal - Etamage de Florange (France)
- ArcelorMittal - Etamage de Tilleur (Belgique)
- ArcelorMittal - Etamage N°3 d'Avilès (Espagne)
- Rasselstein – Etamage N°9 et N°12 (Allemagne)

## 2.2 Le point de vue des utilisateurs

---

En plus de l'étude comparative des lignes d'étamage, j'ai consulté les exploitants, les techniciens de maintenance et les techniciens de process pour recueillir leurs remarques. Initialement, j'ai utilisé ma propre expérience de responsable d'exploitation de la ligne pour bâtir une proposition de fonctionnement. Ils l'ont ainsi enrichie soit en influant sur la conception même du cœur de régulation, soit en demandant des ajouts pour la gestion d'une problématique périphérique au projet. Par exemple :

- Demande de création d'un outil de gestion d'usure des anodes ;
- Demande de modification des vues de conduite pour raison ergonomique ;
- Demande de simplification des chaînes de mesure par les mainteneurs ;
- Demande d'adaptation de gestion des anodes insolubles par les techniciens process ;
- ...

Au fur et à mesure de la récolte des données, j'ai enrichi le cahier des charges des modifications à apporter.

*Remarque : Chaque changement, quel qu'il soit amène des inquiétudes et des réserves de la part de ceux qui sont concernés. Il est donc important d'intégrer les demandes d'améliorations même si elles ne sont pas au cœur du projet. C'est une opportunité pour répondre à des attentes vieilles parfois de plusieurs années et cela ne représente souvent qu'un faible effort supplémentaire. J'ai constaté aussi, que par ce biais l'adhésion au projet était beaucoup plus large.*

*Pour répondre à une des demandes périphérique au projet qui nécessitait un gros travail d'étude, j'ai sollicité un stagiaire. Pendant six mois, Rayan Djaballah, stagiaire en fin de cycle d'ingénieur génie des matériaux, a travaillé, sous ma responsabilité directe, sur la réfection de la commande d'une partie des redresseurs de courant. Son travail est décrit dans son mémoire qu'il a soutenu le 3 septembre 2015 à l'école Polytech de Clermont-Ferrand.*

## 2.3 Le simulateur

Un des avantages d'un simulateur est qu'il permet de faire des essais dans les conditions proches du réel mais en supprimant les coûts et les risques liés à l'exploitation d'une installation physique. Dans le cas présent, j'ai pu concevoir et ajuster le système de contrôle-commande sans risque de dégrader le produit, sans utilisation d'étain ou d'acier et sans perte de production.

Cependant, un simulateur, même très fidèle, n'est pas la réalité du fonctionnement dans tous ses détails. Il est donc indispensable de faire des essais réels lors de la mise en service. Ceux-ci sont plus limités grâce aux résultats obtenus par la simulation préalable.

Le simulateur est composé de cinq sous-ensembles (Figure 15) :

- Un générateur de consignes ;
- Un générateur de perturbation ;
- Le process électrique : les redresseurs ;
- Le process Chimique et mécanique : les bacs d'électrolyse ;
- Le régulateur.

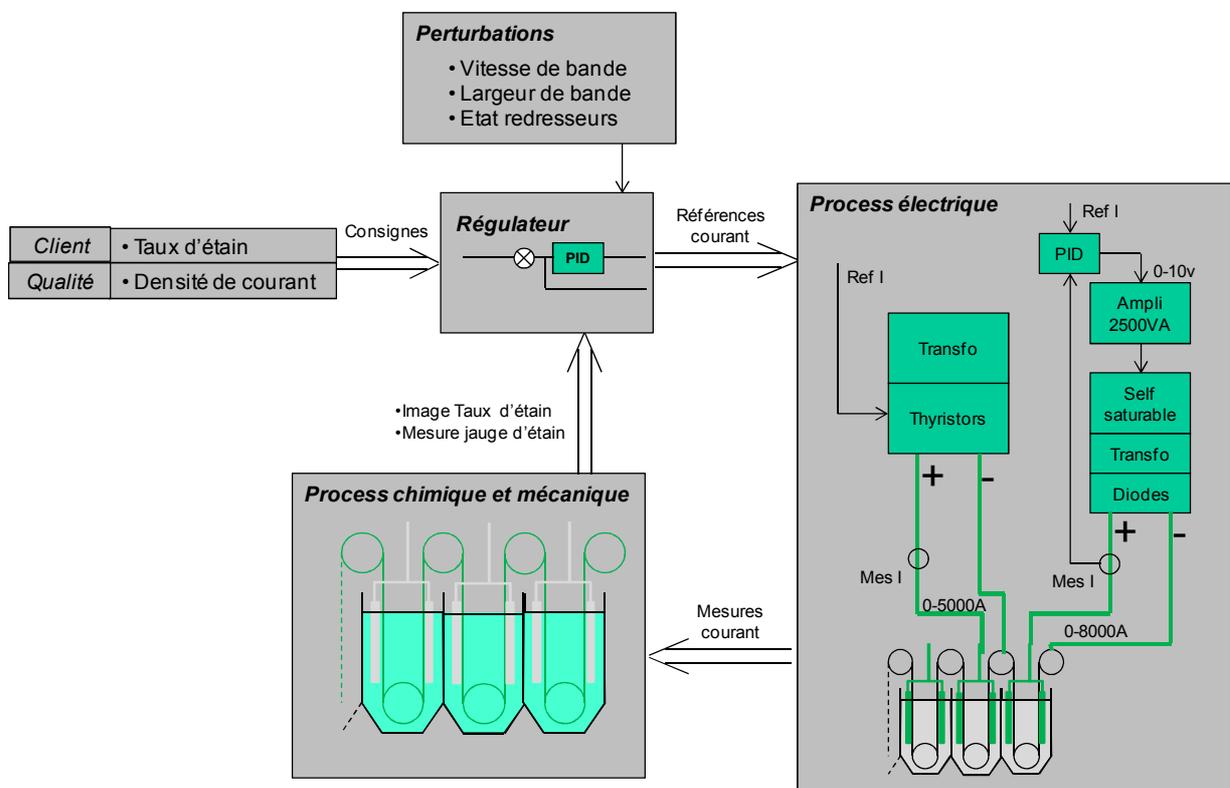


Figure 15 - Schéma de principe du simulateur

Le simulateur est construit en mettant en équation mathématique des phénomènes physiques et/ou chimiques ainsi que leur commande. Dans le commerce, il existe plusieurs logiciels permettant de réaliser ceci. Pour ma part, j'ai utilisé Scilab 5.5.1 puis Matlab R2014b. J'ai connu ces deux logiciels dans le cadre de mon cursus d'ingénieur. J'ai commencé à utiliser Scilab pour des raisons économiques. C'est un logiciel libre de droit et gratuit. Malheureusement, il est aussi limité dans ses capacités. J'ai notamment eu des difficultés à faire cohabiter des sous-ensembles continus avec des commandes discrètes. J'ai finalement utilisé Matlab qui n'a pas ce frein mais qui est onéreux.

### 2.3.1 Générateur de références et de perturbations

Cette partie réalise les consignes de taux d'étain ( $\text{g/m}^2$ ) et de densité de courant ( $\text{A/dm}^2$ ), mais aussi les perturbations. Ce module est composé de valeurs réelles ou binaires évoluant sous forme d'échelon ou de rampe (Exemple Figure 16).

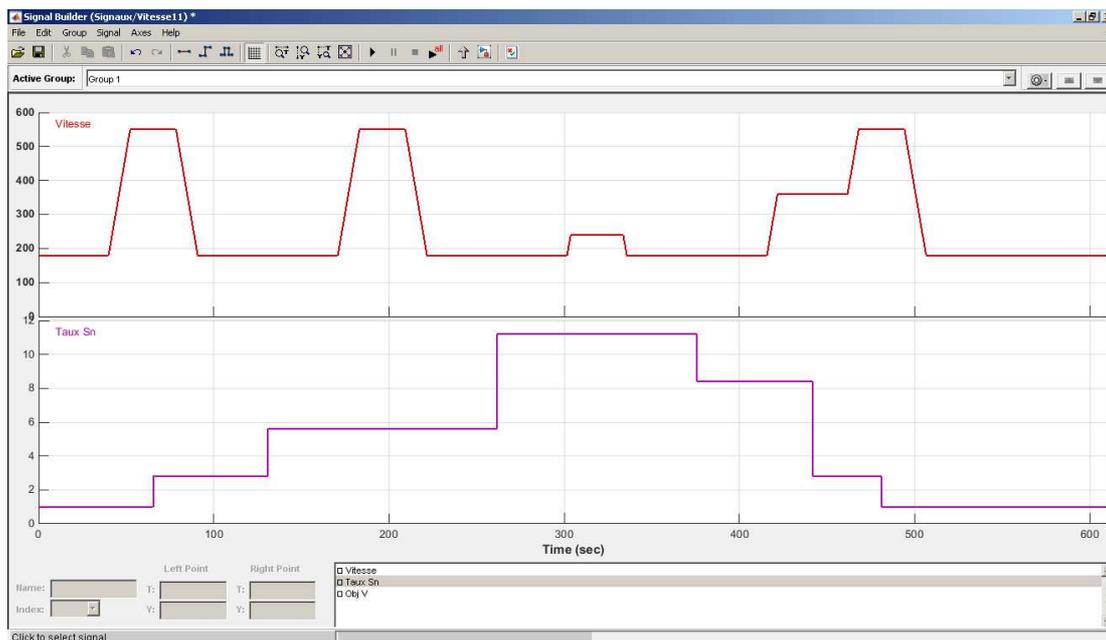


Figure 16 - Générateur de référence (Taux Sn) et perturbation (Vitesse)

Les signaux sont construits pour être représentatifs d'un maximum de situations réelles, sur le principe d'une Séquence Binaire Pseudo Aléatoire (SBPA ou PRBS) réaliste.

### 2.3.2 Process mécanique

Les dix bacs d'étamage sont identiques. Ils contiennent 7 m 20 de bande répartis comme indiqué Figure 17. Il y a donc 72 m de bande en défilement présent dans la section étamage.

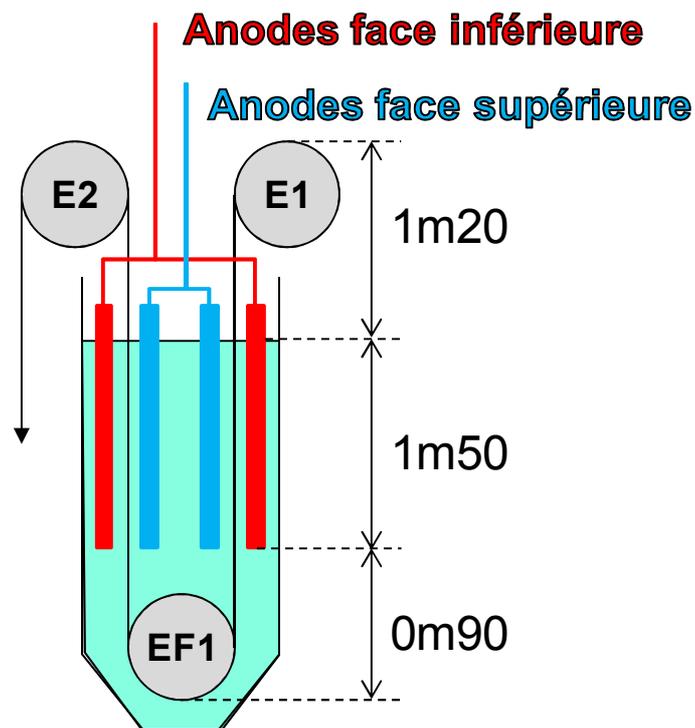
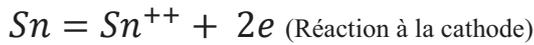


Figure 17 – Schéma d'un bac d'étamage

Seuls les tronçons de bande situés devant les anodes reçoivent de l'étain, c'est à dire 3 m par face et par bac.

### 2.3.3 Process chimique

L'électrolyse de l'étain (Sn) fait appel à une transformation chimique forcée (Figure 18):



Le taux d'étain déposé sur la bande répond à la loi d'étamage suivante :

$$T = \frac{I * r}{k * l * v}$$

Avec :

- T : Taux d'étain déposé en g/m<sup>2</sup>
- I : Courant en A.
- r : Rendement de l'électrolyse.
- l : Largeur de la bande en m.
- v : Vitesse de la bande en m/s
- k : Coefficient physico chimique.

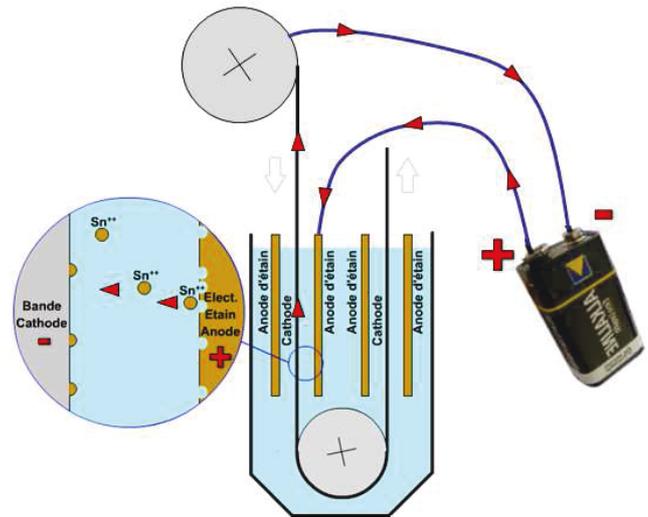


Figure 18 - Electrolyse de l'étain (USP, 2015)

$$k = \frac{\text{Valence Sn} * K_{Faraday}}{\text{Masse atomique Sn}} = \frac{2 * 96485.3365 \text{ C/mol}}{118.71 \text{ g/mol}} = 1625.56 \frac{\text{C}}{\text{g}}$$

Cependant, la réaction d'électrolyse n'est pas parfaite. Une partie de l'étain arraché à l'anode par les électrons ne termine pas sa course sur la bande, mais reste sous forme dissoute (Sn<sup>2+</sup> ou Sn<sup>4+</sup>) dans l'électrolyte. Ce phénomène a des conséquences sur le rendement. Il est variable et est défini suivant une table construite empiriquement depuis plusieurs années.

Afin de garantir un aspect visuel satisfaisant du fer blanc, il est aussi important de respecter une certaine densité de courant lors de dépôt d'étain. La densité de courant idéale doit se situer dans une plage dont les limites répondent à une loi fonction de la vitesse de la bande.

$$D = a * v + b$$

Avec

D : Densité en A/dm<sup>2</sup>.

v : Vitesse de la bande en m/s.

a et b sont réglés pour obtenir une densité de 10 A/dm<sup>2</sup> à 50 A/dm<sup>2</sup>

En cas de non respect de cette règle, les défauts visuels provoqués sont rédhibitoires pour les clients.

En combinant les équations des process chimique et mécanique, et à partir du courant des redresseurs, le simulateur reconstitue le taux d'étain tous les 30 cm de bande comme décrit Figure 19.

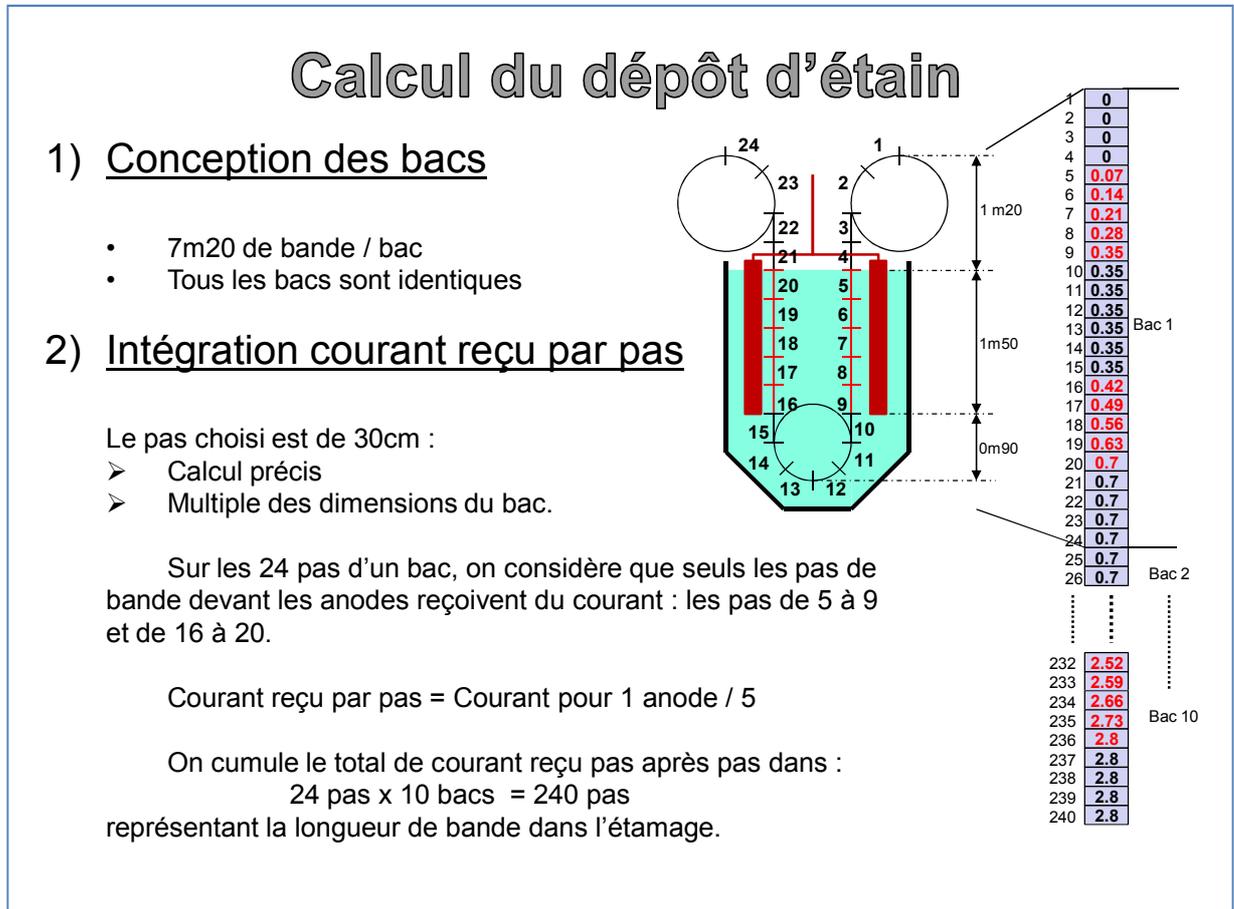


Figure 19 – Détail calcul dépôt d'étain (Arcelormittal F. , 2015)



Afin de les modéliser, il a été nécessaire d'étudier le comportement dynamique de chaque version.

### 2.3.4.1 Modélisation des redresseurs à thyristors

Expérimentalement, j'ai déduit que les redresseurs à thyristors (les deux versions) ont le comportement d'un système du premier ordre dont la constante de temps est de 0,4 seconde.

$$G(p) = \frac{1}{1 + 0,4p}$$

Pour exemple, la réponse à un échelon de courant du redresseur A est présentée Figure 21.

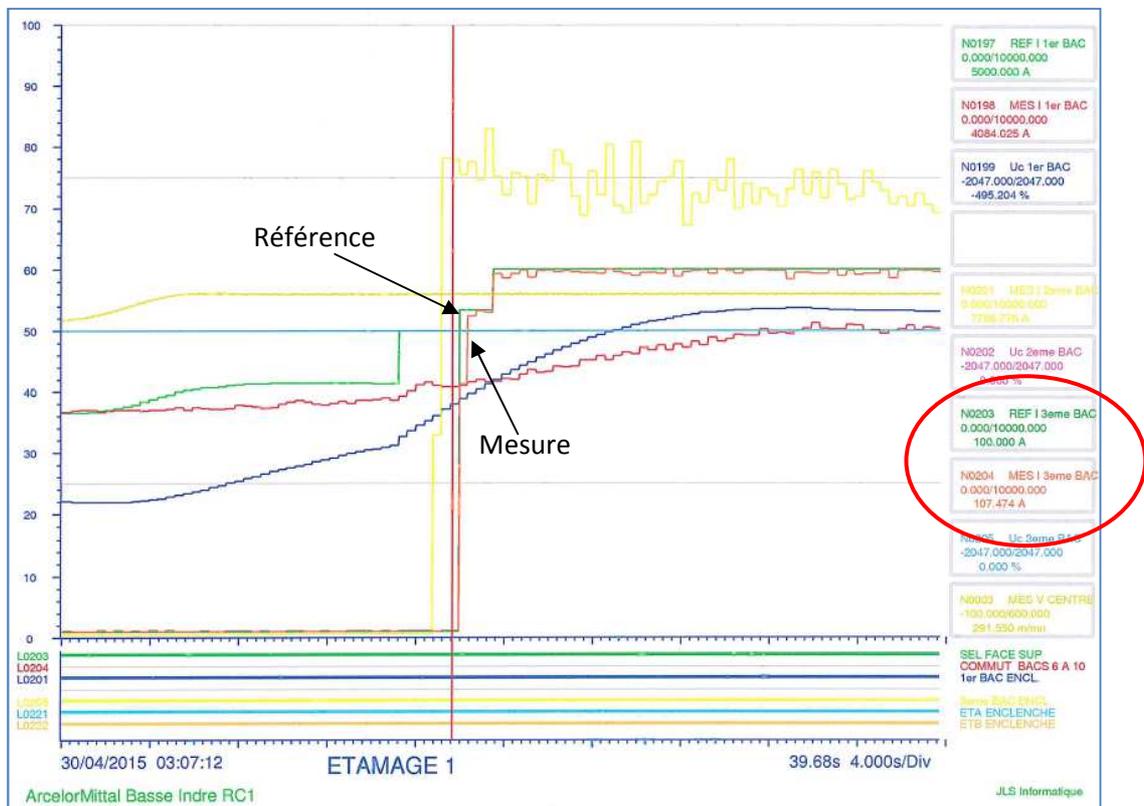


Figure 21 - Enregistrement courant redresseur A

Pour compléter la modélisation, j'ai bridé les plages d'évolution de ce système avec les limitations correspondant aux capacités réelles en courant et en tension de chaque modèle de redresseur.

### 2.3.4.2 Modélisation des redresseurs à self saturable

La technologie dite « à self saturable » date des années 1960, époque où l'électronique de puissance n'était pas aussi avancée qu'aujourd'hui. Ces redresseurs ont l'inconvénient d'être peu précis en bas d'échelle et surtout d'avoir un temps de réponse long.



Figure 22 - Selfs + transformateurs + ponts redresseurs LRE1

A la différence des redresseurs à thyristors, la commande des redresseurs à self saturable est composée de plusieurs étages (Figure 23):

- Un régulateur P.I.D. (Proportionnel Intégral Dérivée) dans l'automate MTT (§1.3.2)
- Un ampli magnétique de commande (Ampli 2500VA)
- Un ampli magnétique de puissance (Self saturable).

J'ai effectué deux séries de mesures sur les courants des redresseurs : une en boucle fermée (Figure 24) et une en boucle ouverte. L'entrée du système étant la référence courant du redresseur et la sortie la mesure.

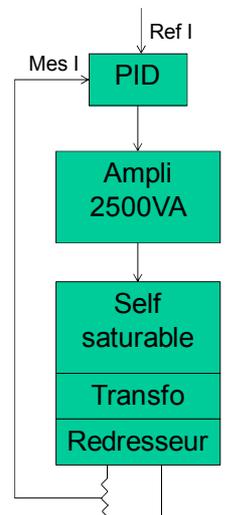


Figure 23 – Principe redresseur à self saturable

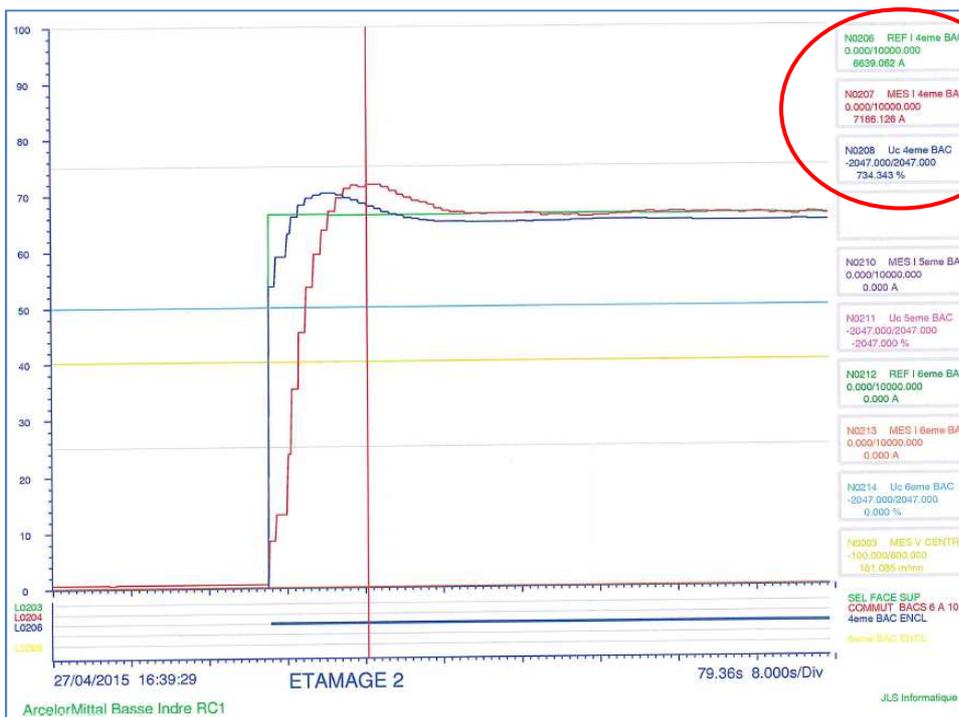


Figure 24 - Enregistrement courant ET3 en BF

En théorie, le système en boucle fermée avec PID est d'un degré supérieur au système en boucle ouverte. Pour simplifier la comparaison, j'ai identifié les deux systèmes sur la base d'un second ordre. La précision supplémentaire qu'amène l'identification à un ordre supérieur est inutile pour cette application.

En boucle fermée :

$$G(p) = \frac{0,01}{p^2 + 0,17p + 0,01}$$

avec  $K = 1$ ;  $\omega = 0,1 \frac{\text{rd}}{\text{s}}$ ; Amortissement = 0,831;  $\text{Tr}_{5\%} = 35,6\text{s}$

En boucle ouverte :

$$G(p) = \frac{0,26}{p^2 + 0,83p + 0,26}$$

avec  $K = 1$ ;  $\omega = 0,5 \frac{\text{rd}}{\text{s}}$ ; Amortissement = 0,819;  $\text{Tr}_{5\%} = 6,93\text{s}$

On constate dans les 2 cas que la réponse est précise avec un faible dépassement. Par contre, le temps de réponse à 5% est plus lent sur la boucle fermée que sur la boucle ouverte. C'est une surprise. En général, un PID, quand il est inséré dans une boucle de régulation, a pour effet de diminuer le temps de réponse. Pour ce cas, c'est le contraire, les réglages du PID ralentissent la réponse. Quelle est la raison de ce réglage surprenant ?

Après recherche, je n'ai pas réussi à y répondre. Cependant, pour les spécialistes en électrotechnique que j'ai consultés, les enroulements des ampli-magnétiques sont sensibles aux fortes variations de tension (du/dt). En effet, avec le temps les vernis des enroulements vieillissent et sont moins isolants. Cependant, il est possible d'augmenter la dynamique sans dégrader la durée de vie des enroulements. En accord avec eux, nous avons décidé de régler les PID pour ne pas dépasser le temps de réponse en boucle ouverte. Nous visons donc un temps de réponse de sept secondes. C'est ce réglage qui est utilisé pour la simulation et pour l'utilisation réelle.

### 2.3.5 Validation du modèle

Une fois le simulateur développé, il a été validé en comparant ses résultats avec plusieurs situations réelles enregistrées. Par exemple, sur la Figure 25, les courbes rouges issues du simulateur sont très proche des courbes noires issues de l'enregistrement réel.

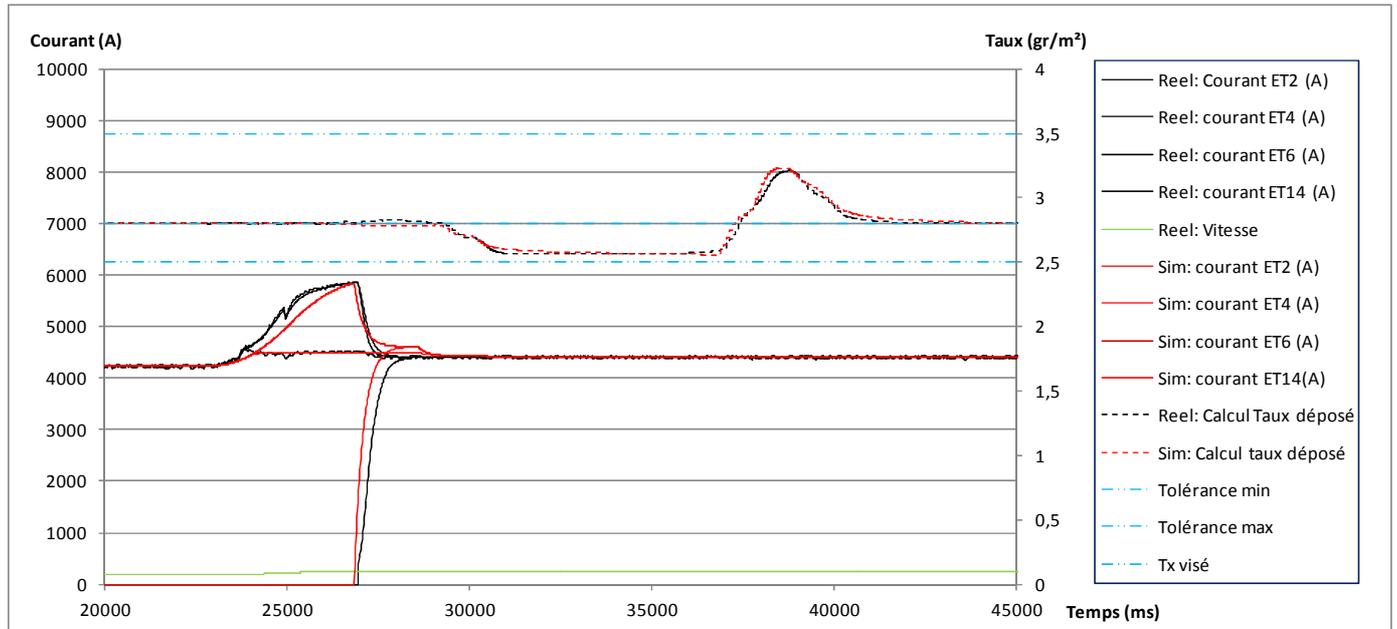


Figure 25 - Comparaison courants et taux d'étain réel et simulés lors d'une accélération

Ces résultats ont permis d'ajuster puis de valider le modèle. A partir de cette validation, j'ai pu utiliser le simulateur pour développer le nouveau contrôle-commande.

Tableau II - Comparatif réglations d'étamage  
(Chrostowski, 2001) (Avilès, 2012) (SEDP, 2014) (Pailloud, 1989) (Savourey, 2007)

|                                | BI - Etamage 1   | BI - Etamage 2   | FL - Etamage 3  | TI - Etamage   | AV - Etamage 3   | Rasselstein   |
|--------------------------------|--|--|---|--|--|---|
| Nb de bacs                     | 10   | 7  | 9   | 12   |  |   |
| Position anodes insolubles     | Bac 3  | Bac 6  |   | Bac 12   |  | Indifférent   |
| Accélération                   | 0,12m/s <sup>2</sup>                                   | 0,5m/s <sup>2</sup>                                    |   | 0,35m/s <sup>2</sup>                                   |  |   |
| Décelération                   | -0,2m/s <sup>2</sup>                                   | -0,5m/s <sup>2</sup>                                   |   | -0,35m/s <sup>2</sup>                                  |  |   |
| Bouclage sur mesure jauge Sn   | Non  | Pas de jauge   | Oui   | Oui  | Oui  | Oui   |
| Pilotage redresseur            | I/V  | I/V  | I/V   | I/V  | I/V  |   |
| Ordre d'enclenchement des bacs | Premier, Dernier puis dans le sens du défilement de la | Premier, Dernier puis dans le sens du défilement de la | Premier, Dernier puis dans le sens <b>inverse</b> du défilement de la | Premier, Dernier puis dans le sens du défilement de la | Premier, Dernier puis dans le sens <b>inverse</b> du défilement de la                  | Indifférent   |
| Principe de régulation         | Correction à chaque bac des erreurs du passé           | Régulation du I Total théorique                        |   | Correction à chaque bac des erreurs du passé           | Régulation du I Total théorique. Offset de 0,8gr/m <sup>2</sup> lors des accélérations |   |
| Mode de répartition du courant | Au plus proche de la loi de densité demandé            | Egale pour chaque redresseur                           |   | En fonction du potentiel de correction de chaque       |  |   |
| Suivi                          | Suivi du taux visé, largeur et taux déposé             | Blocage ref I/V au changement de taux                  |   | Suivi du taux visé, largeur et taux déposé             | Suivi du taux visé, largeur et taux déposé   |   |
| Pas du calcul                  | 1 bac (7m20) sauf vernier 30cm                         | 1 bac (7m30)   |   | 1 bac (7m90)   |  |   |
| Vitesse max autorisée          | Calculée par dichotomie pour chaque face               | Calculée en dynamique sans possibilité                 |   | Calculée entrée et sortie étamage pour chaque face     |  |   |
| Gestion anodes insolubles      | Tout ou rien   | Tout ou rien   |   |  |  | Régulation automatique du taux d'étain stanneux dans          |
| Gestion de la barbe d'étain    | Programmation de changement de bac à la bobine         | Changement de bac manuel sans possibilité              |   |  |  | Maintien d'un faible courant sur les ponts d'anode inutilisés |
| Language de programmation      | Fortran  | API  | API   | API  | API  |   |

### 3 Le régulateur

Le modèle construit pour le simulateur a servi ensuite à l'élaboration du nouveau système de contrôle-commande. Ceci s'est déroulé en trois étapes. Après avoir défini le type de contrôle-commande à utiliser, il a été soumis à une grosse perturbation de vitesse pour améliorer sa dynamique. Ensuite, cette solution a été affinée en lui appliquant le signal construit sur le principe d'un SBPA.

#### 3.1 Conception

Pour la première étape, j'ai compilé les informations recueillies auprès des autres lignes d'étamage dans le Tableau II. Il est mis en évidence que toutes les régulations fonctionnent avec la même architecture. Mais, il y a des différences dans le détail de celles-ci, notamment pour calcul des références courant.

Le système de contrôle commande est divisé en trois modules (Figure 26) :

- le premier détermine le courant total nécessaire à partir de la loi d'étamage ;
- le second calcul le nombre de redresseurs ;
- Le troisième déduit les références à appliquer à chaque redresseur.

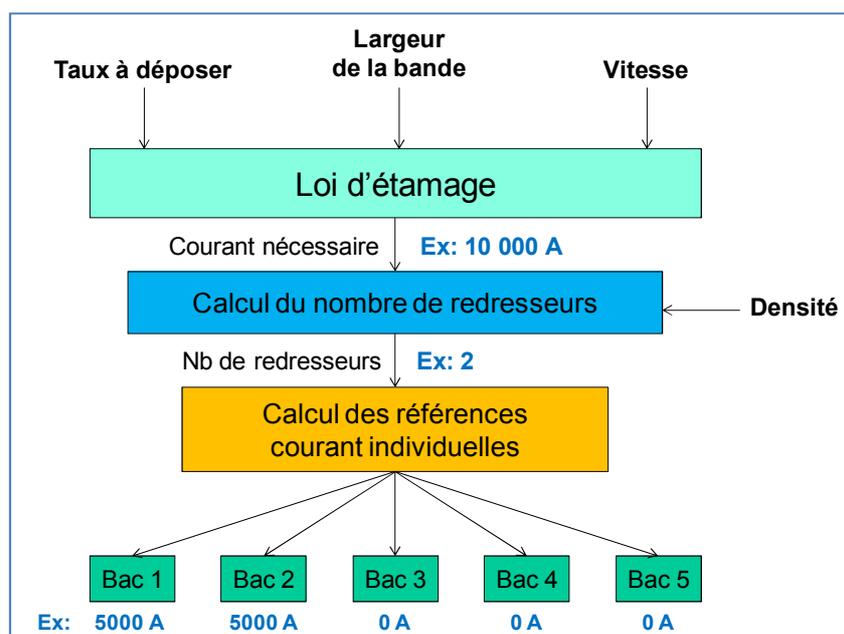


Figure 26 - Schéma de principe du régulateur d'étamage

### 3.1.1 Loi d'étamage

---

A partir de la loi d'étamage (§ 2.3.3), il est possible de calculer le courant total nécessaire pour déposer le taux d'étain demandé :

$$I_{total} = \frac{T * k * l * v}{r}$$

Avec :

- $I_{total}$  : Courant en A.
- T : Taux d'étain à déposer en g/m<sup>2</sup>
- l : Largeur de la bande en m.
- v : Vitesse de la bande en m/s
- k : coefficient physico chimique.
- r : Rendement de l'électrolyse.

Chaque pas de bande en défilement dans la ligne doit recevoir ce courant pour que le taux demandé soit réellement déposé. Cependant, lorsque le courant total est supérieur à la capacité d'un redresseur, il doit être réparti sur plusieurs d'entre eux.

### 3.1.2 Choix des redresseurs

Cette partie du contrôle commande sélectionne les redresseurs à utiliser. Deux éléments influent sur le choix :

- La densité de courant à respecter (§ 2.3.3).
- La priorité des redresseurs.

#### 3.1.2.1 Densité de courant

Sans cette contrainte, il suffirait d'avoir en permanence tous les redresseurs en service, et de faire varier leur courant de zéro au courant maxi en fonction de la loi d'étamage. Mais la densité à respecter limite la plage d'utilisation des redresseurs. Principalement, elle interdit le fonctionnement des redresseurs à bas courant (Figure 27). Il est donc indispensable de mettre en service et de couper les redresseurs en fonction des évolutions des paramètres (taux, largeur et vitesse).

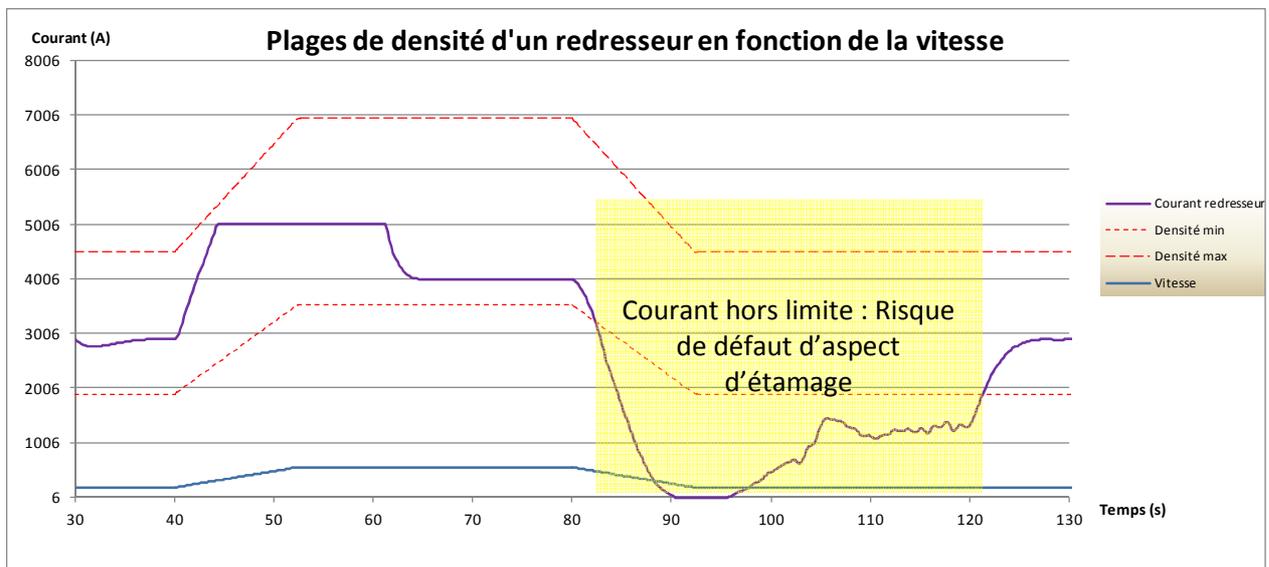


Figure 27 – Evolution du courant d'un redresseur en fonction de la vitesse

A partir du courant total, et en fonction des capacités des redresseurs, ce module détermine donc le nombre de redresseurs à utiliser pour respecter la densité de courant, garant d'un bon aspect visuel de la bande étamée.

### 3.1.2.2 Ordonnement des redresseurs

---

Le nombre de redresseurs est important mais insuffisant pour choisir précisément le bac à commander et par conséquent le redresseur à mettre en service. Pour ceci, il est nécessaire de définir une stratégie d'utilisation.

Dans l'exemple Figure 26, les deux premiers bacs ont été choisis mais nous pourrions aussi utiliser les deux derniers, ou deux au milieu. En théorie ceci ne changerait rien à l'étamage. En réalité, cette stratégie d'utilisation est dictée par le process. Pour la LRE1, la priorité d'enclenchement est la suivante :

- 1) Bac 1 : En étamant dès le premier bac, on évite la dissolution de fer dans l'électrolyte. Au-dessus de 20gr/l, le fer provoque des défauts d'étamage irrécupérables ;
- 2) Bac 10 : Les redresseurs de ce bac sont les plus rapides. Ils permettent un dépôt précis. Sans eux le dépôt est plus aléatoire ;
- 3) Bac 3 : Les anodes insolubles qui sont dans ce bac doivent avoir un temps d'utilisation important pour qu'elles soient efficaces ;
- 4) Le reste des bacs est enclenché dans le sens de défilement de la bande.

L'ordre utilisé est donc : 1-10-3-2-4-5-6-7-8-9.

Dans les faits, le calcul du nombre de redresseurs et le choix de ceux-ci sont réalisés en même temps. Ils prennent en compte les contraintes suivantes :

- Le courant maximum disponible des redresseurs.
- Le courant maximum calculé à partir de la densité d'étamage.
- La limitation de courant éventuelle de l'opérateur.
- L'état des redresseurs (Prêt, en défaut, autorisé ou condamné).
- La priorité d'enclenchement des redresseurs (Défini par le process).

A l'aide de ces données, on construit une table (Figure 28). On y trouve dans la première colonne, les numéros des redresseurs dans l'ordre d'enclenchement demandé et dans la seconde, le courant disponible par redresseur. Ce courant est cumulé avec la ligne précédente.

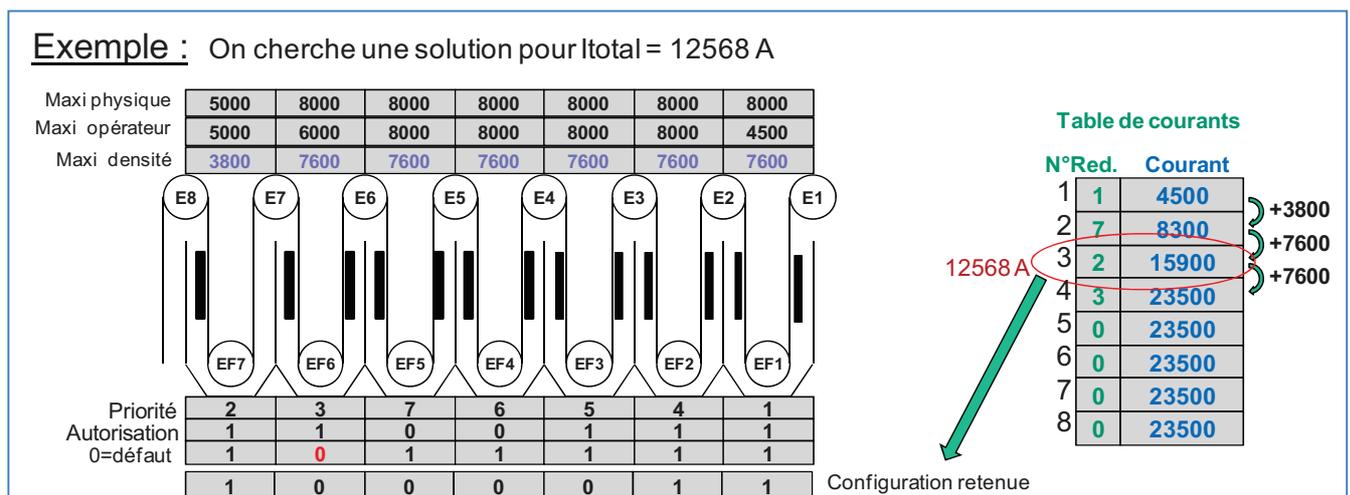


Figure 28 – Détail stratégie redresseurs (Arcelormittal F. , 2015)

En recherchant dans le tableau le courant juste supérieur au courant d'étamage total, on trouve le nombre et les numéros de redresseurs nécessaires pour étamer le pas de bande traité.

En somme, cette seconde partie du système de contrôle commande limite les risques de défaut d'aspect de la bande étamée en respectant la loi de densité et un ordonnancement précis de mise en service des redresseurs. Ces choix retenus, calculons les références courant.

### 3.1.3 Calcul des références

Le principe de fonctionnement des régulations d'étamage analysées est commun mais des différences sont perceptibles quand nous zoomons sur le module de calcul des références individuelles des redresseurs. Deux principes se distinguent.

- Le premier principe distribue équitablement le courant sur les redresseurs (Figure 29). Le courant issu de la loi d'étamage est réparti uniformément sur les redresseurs choisis.

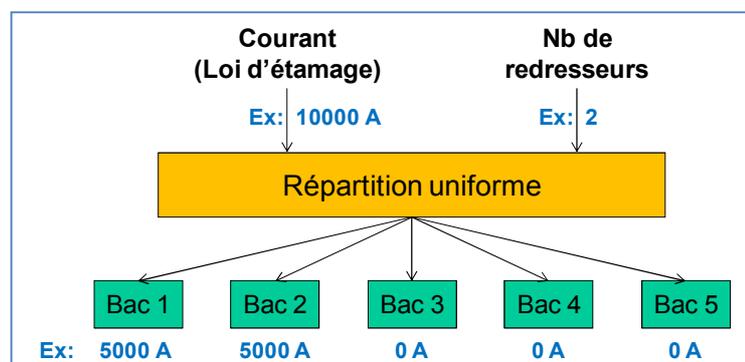


Figure 29 - Calcul référence courant par répartition uniforme.

- Le second calcule le courant nécessaire en fonction du « reste à déposer » sur un pas de bande donné (Figure 30).

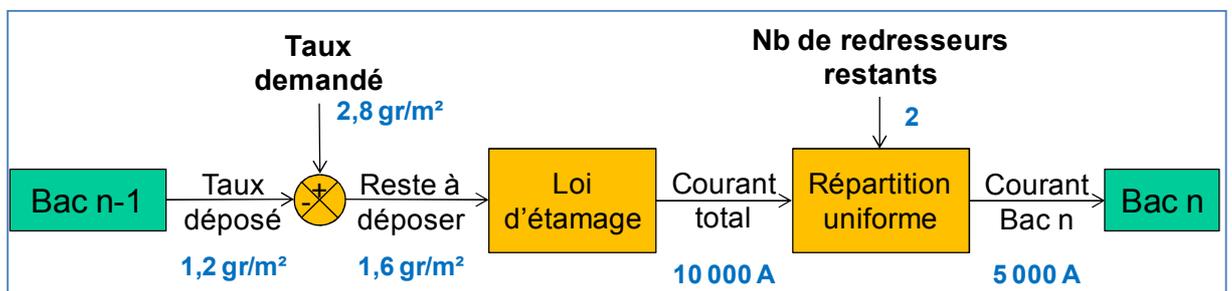


Figure 30 - Calcul référence courant en fonction du "reste à déposer"

Afin d'en comparer les performances, j'ai simulé le comportement de l'étamage LRE1 soumis à trois versions différentes de contrôle-commande pendant un transitoire de vitesse (Figure 31) :

- Distribution équitable du courant (Courbe bleue) ;
- Suivi du « reste à déposer » avec pas d'un bac (Courbe noire) ;
- Suivi du « reste à déposer » avec pas court (Courbe rouge).

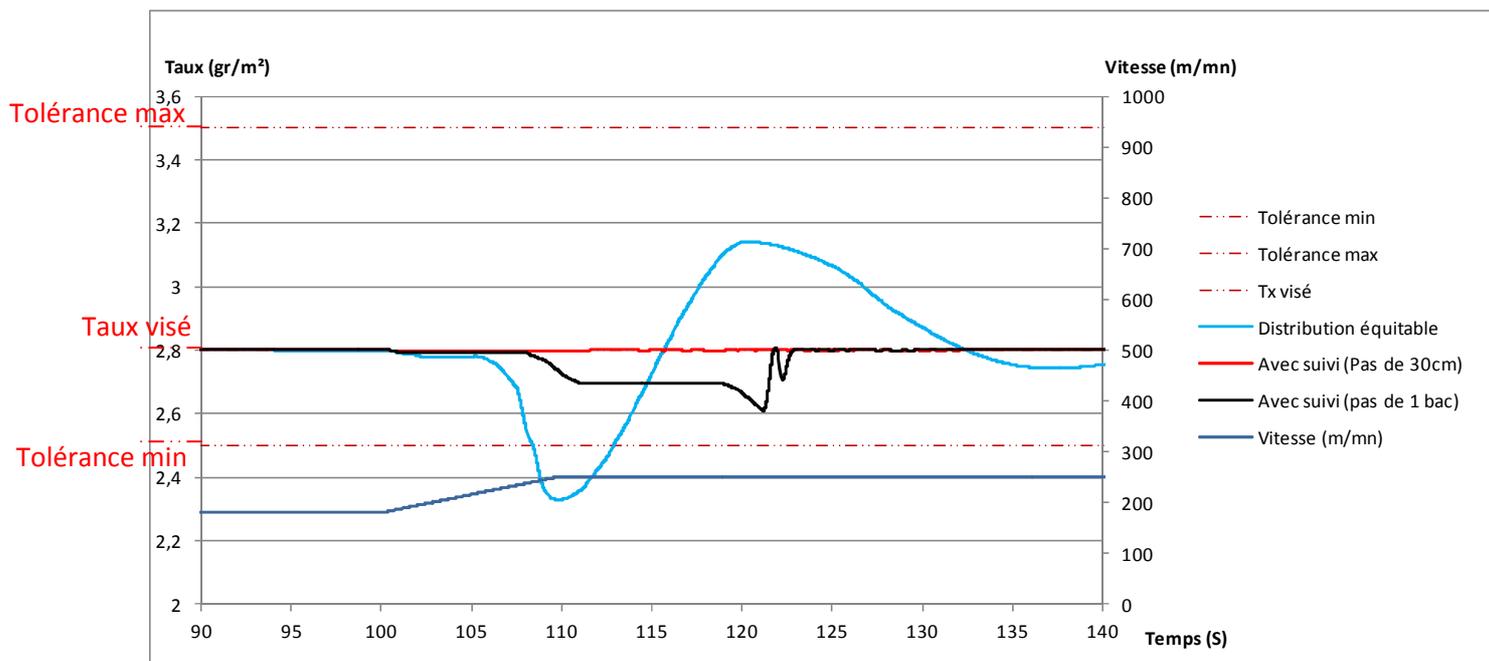


Figure 31 - Comparatif des réponses de trois régulateurs lors d'un transitoire de vitesse

Plus simple de conception, le contrôle-commande avec distribution équitable (Figure 31 – Courbe bleue) considère la totalité de la section d'étamage comme un seul bac. Il ne tient pas compte de la position de la bande au moment de l'application du courant et donc de l'étain. Il en résulte un manque d'étain lors de l'accélération et une sur-déposition lors des ralentissements, ceci sur une trentaine de mètres de bande. Ce point est très pénalisant sur la LRE1 où les ralentissements sont obligatoires à chaque bobine. Ce contrôle-commande est donc inutilisable sur la LRE1.

Par contre, le contrôle-commande avec suivi (Figure 31 – Courbe noire) est précis et permet de rester dans les tolérances client. En augmentant la fréquence de calcul de celui-ci (Figure 31 – Courbe rouge), on arrive même à des performances optimales.

J'ai donc choisi d'utiliser un contrôle-commande avec suivi du taux déposé à pas de bande court.

Ce type de contrôle-commande avec suivi du taux déposé considère chaque bac comme le début d'une nouvelle section. La loi d'étamage §3.1.1 devient :

$$\text{Courant bac } n = \frac{(T \text{ à déposer} - T \text{ bac } n-1) * k * l * v}{r * N}$$

Avec :

- Courant bac n : Référence courant redresseur en A
- T à déposer : Consigne Taux d'étain total à déposer en g/m<sup>2</sup>
- T bac n-1 : Mesure du taux d'étain total déjà déposé en g/m<sup>2</sup>
- k : Coefficient physico chimique.
- l : Largeur de la bande en m.
- v : Vitesse de la bande en m/s
- r : Rendement de l'électrolyse.
- N : Nombre de redresseurs restants à utiliser.

Afin de pouvoir effectuer ce calcul à chaque pas de bande, nous avons besoin de faire suivre les données susceptibles d'évoluer avec l'avance de la bande :

- Référence du taux à déposer (variable en fonction des demandes client) ;
- Mesure du taux déjà déposé ;
- Largeur de la bande (variable en fonction des demandes client) ;
- Rendement (issu d'une table construite empiriquement).

Les références, largeur et rendement sont connus en fonction du produit. Par contre, il n'y a pas d'outil de mesure du taux déposé tout au long de l'étamage. Puisqu'il est impossible techniquement d'en mettre en place, on utilise le taux d'étain calculé à partir des courants (§2.3.3) pour alimenter la variable « T bac n-1 ».

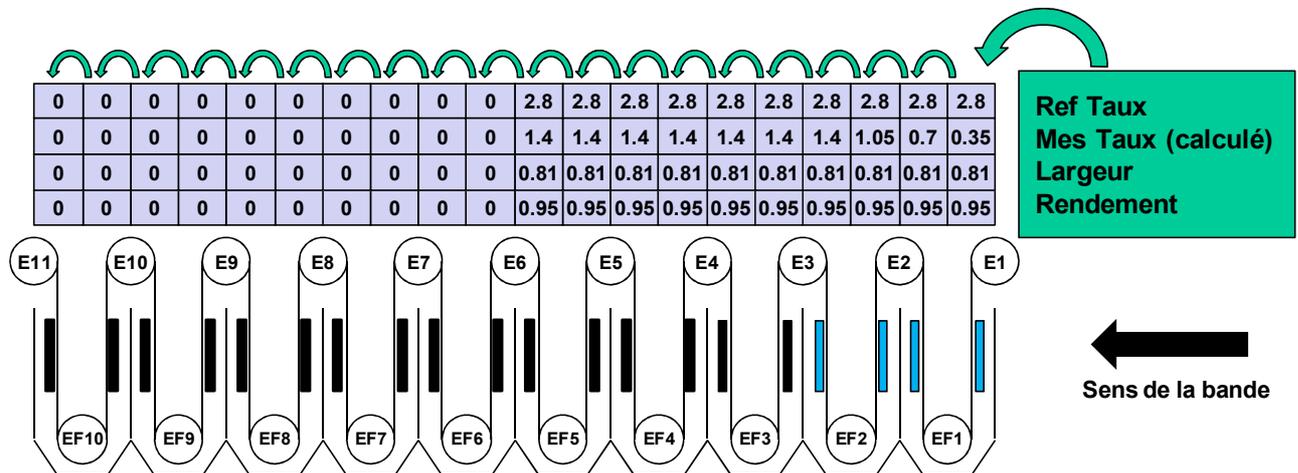


Figure 32 – Détail suivi étamage (Arcelormittal F. , 2015)

A chaque pas de 30 cm, ces données sont déplacées d'un cran dans une table qui représente celles de chaque pas de bande présent dans l'étamage. Il suffit d'alimenter le premier pas et les décalages successifs permettent de mémoriser les données.

On obtient donc un suivi à pas fixe en fonction de la bande mais à fréquence variable en fonction de la vitesse de défilement. Pour une vitesse de ligne extrême de 550 m/mn, le calcul doit être fait toute les 33 ms. Ce temps de cycle est compatible avec la grande majorité des automates actuels.

En résumé, cette troisième partie permet de calculer les références courant à appliquer aux redresseurs. En choisissant un régulateur avec suivi du taux restant à déposer, on obtient une régulation et un asservissement précis du dépôt d'étain.

L'ensemble des trois parties constitue le système de contrôle commande construit pour la LRE1. Analysons ses performances.

## 3.2 Limites du régulateur

---

Afin de tester ce régulateur, je l'ai soumis à une grosse perturbation. J'en ai ainsi amélioré les performances en adaptant la conception initiale.

Par expérience, la perturbation la plus importante est la vitesse de défilement de la bande. J'ai choisi une modification de vitesse extrême de 180 m/mn à 550 m/mn avec une pente de 0,5 m/s<sup>2</sup>. J'ai aussi choisi de simulé l'étamage d'un taux moyen de 5,6 g/m<sup>2</sup>. En effet, sur les taux faibles ou forts, il n'y a que peu de changement de redresseurs. Le taux de 5,6 g/m<sup>2</sup> permet de voir le comportement dynamique du système face à de nombreux changements du nombre de redresseurs à utiliser.

Trois modifications ont été nécessaires avant d'arriver à un compromis qui limite les saturations tout en respectant au maximum les plages de densité :

- 1) Augmentation la consigne de courant total.
- 2) Modification de la répartition du courant sur les bacs.
- 3) Anticipation du démarrage des redresseurs pendant les changements de vitesse.

### 3.2.1.1 Augmentation de la consigne de courant total

Dans le cas où le courant total issu de la loi d'étamage augmente et que le point de fonctionnement est déjà proche de la saturation de tous les redresseurs en service, il faut démarrer un nouveau redresseur. Malheureusement, celui-ci ne démarre pas instantanément et les redresseurs en service saturent avant que le redresseur supplémentaire n'ait démarré. En gardant en permanence une « réserve » de courant par rapport au besoin réel, le temps de démarrage d'un nouveau redresseur est compensé.

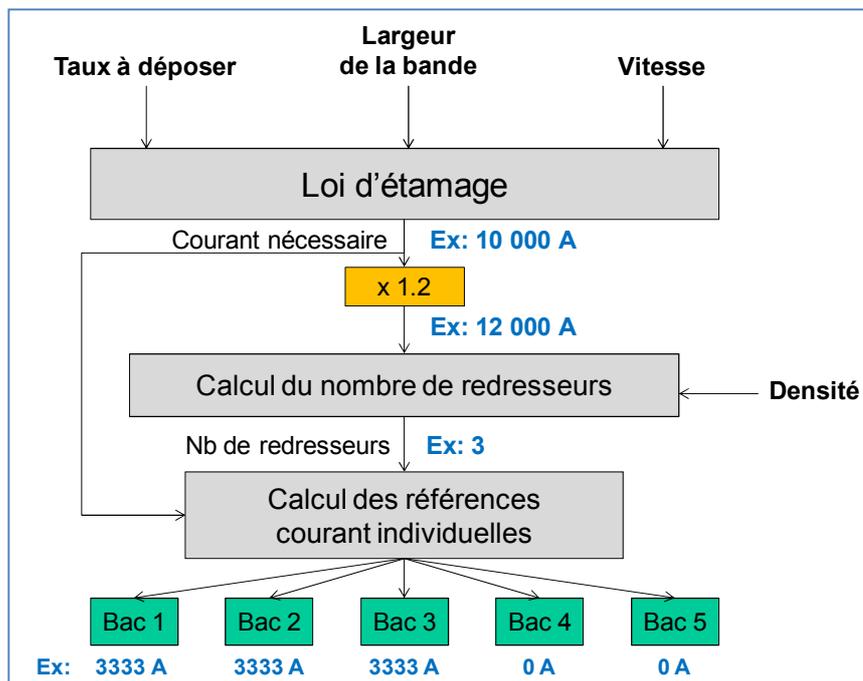


Figure 33 - Principe régulation étamage avec réserve de courant

Cette « réserve » est créée en augmentant le courant qui sert à calculer le nombre de redresseur (Figure 33). Ainsi, en cas d'augmentation du courant total, on démarre le nouveau avant que les autres saturent.

Ce paramètre est à ajuster en fonction du temps de démarrage des redresseurs.

### 3.2.1.2 Modification de la répartition du courant sur les bacs.

La faible dynamique des redresseurs à self saturable combiné à la conception du contrôle-commande rend le dernier bac très important pour la régulation. D'une part, les redresseurs rapides du bac 10 assurent une régulation fine du taux d'étain. D'autre part, la conception de la régulation permet à chaque bac de corriger les erreurs du passé. Dans le cas du bac 10, il n'y a plus de bac après lui pour corriger ses erreurs. Il doit donc garder de la marge pour pouvoir réagir. Sans marge par rapport à sa butée de courant, il sature vite.

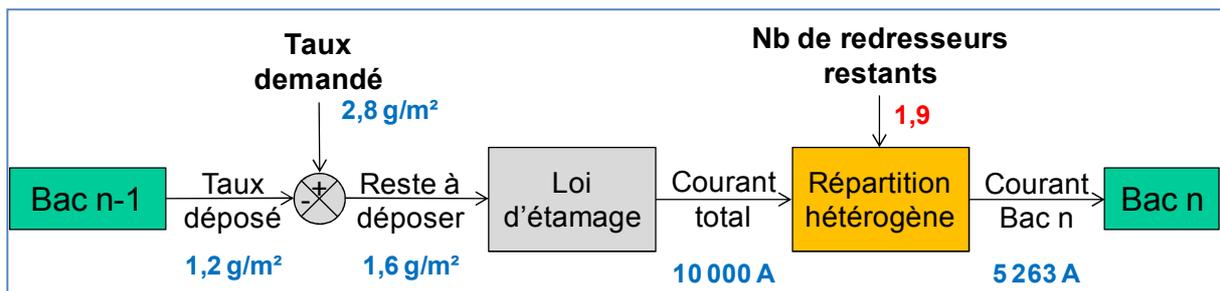


Figure 34 - Principe d'étamage avec modification de répartition bac 10

Concrètement, on modifie la répartition en considérant le dernier bac non pas comme un bac identique aux autres mais comme un peu moins ( $0,9$  dans l'exemple de la Figure 34). Ceci a pour effet d'augmenter un peu le courant de tous les bacs en service et de baisser un peu celui du bac 10. La marge est créée.

Ce paramètre est à ajuster pour limiter les saturations du bac 10.

### 3.2.1.3 Anticiper le démarrage des redresseurs

La dernière modification consiste à anticiper le démarrage des redresseurs lors des accélérations mais aussi d'anticiper leurs arrêts lors des ralentissements de la bande.

Malgré les améliorations précédentes, la régulation n'est pas satisfaisante. De plus, les densités de courant sont souvent en dehors des plages définies. L'analyse précise des enregistrements met en évidence que les changements de redresseurs sont trop tardifs.

Nous avons la chance de pouvoir connaître la vitesse par anticipation. En effet, lorsqu'un changement de vitesse est demandé, on sait quelle est la vitesse finale souhaitée. J'ai alors utilisé l'objectif de vitesse (vitesse finale) pour anticiper les calculs sur les événements à venir.

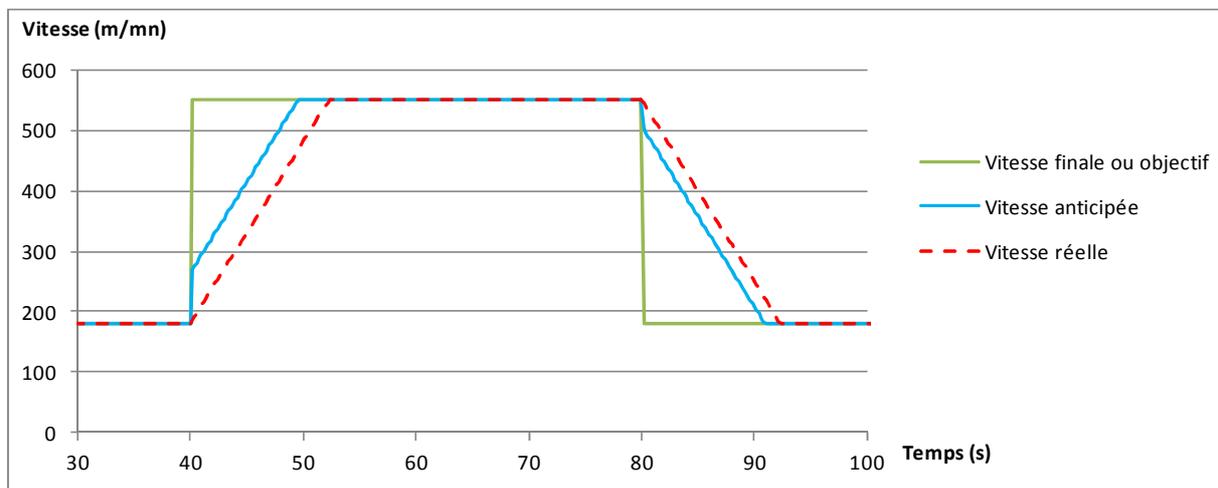


Figure 35 - Représentation graphique vitesse anticipée

Deux variables permettent d'ajuster le point de fonctionnement en fonction de la pente d'accélération choisie. Sur la Figure 35, l'anticipation dans la phase d'accélération est réglée à 1,4 m/s et à -0,7 m/s en phase de décélération.

En ajustant ces variables, il est possible de recaler le courant des redresseurs dans les plages de densité lors des phases transitoires.

Les résultats de ces trois modifications sont visibles sur la Figure 36. J'ai choisi d'observer deux variables : Le taux d'étain calculé et le courant du dernier redresseur. D'une part, le taux d'étain correspond à la demande du client et répond à une norme. Il est donc primordial de le respecter. D'autre part, l'aspect visuel du produit est dépendant de la densité de courant. J'ai vérifié ce point pour tous les bacs mais pour des raisons de lisibilité, seul l'évolution du courant du dernier bac est présentée. Celui-ci est d'autant plus intéressant, qu'il assure la précision et la finition du dépôt.

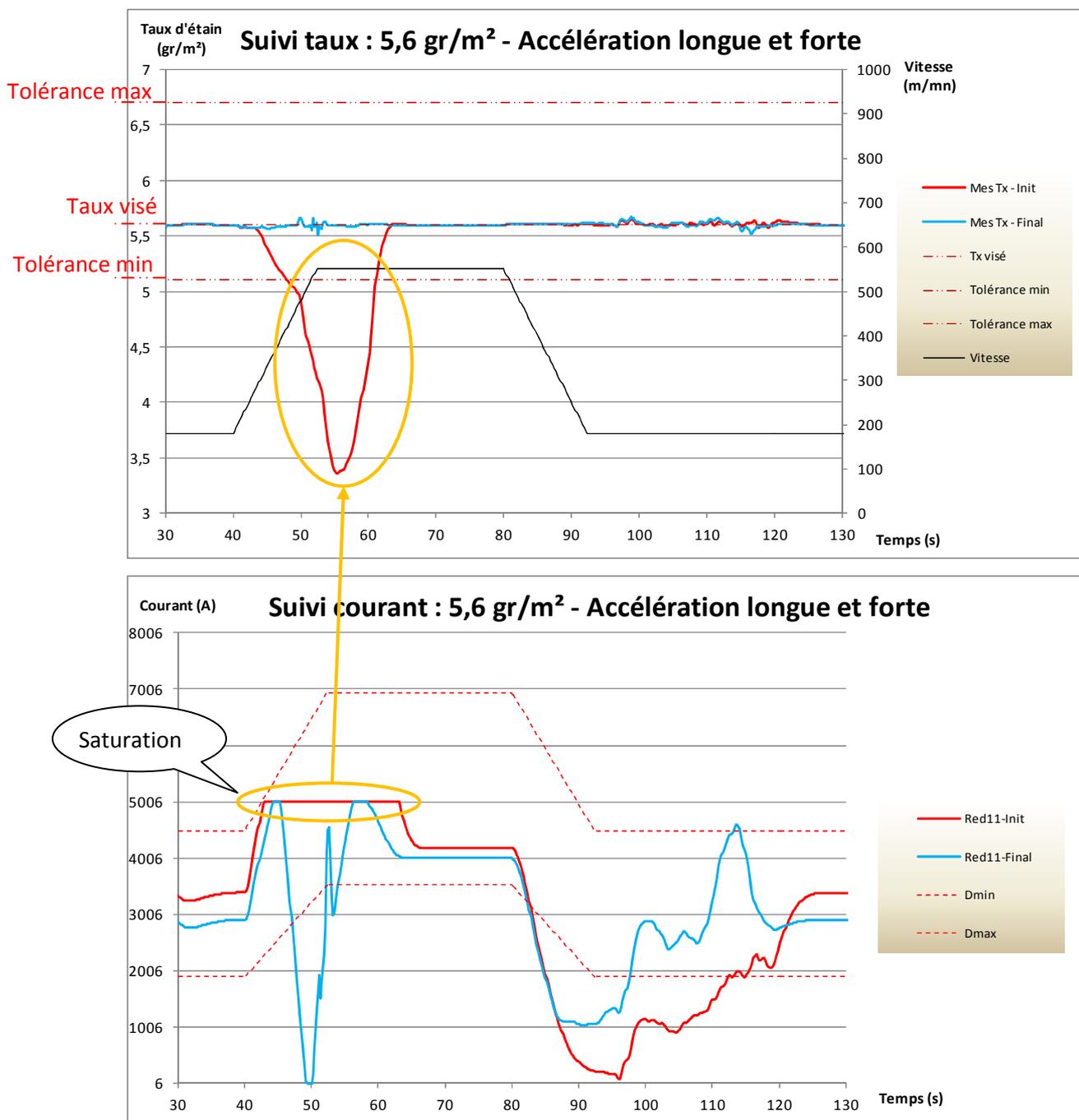


Figure 36 - Comparatif régulateur avant/après modifications

Sur la version finale, on observe que la régulation du taux d'étain est satisfaisante mais que le courant sort parfois des plages densité. Par contre, il y a beaucoup moins de saturations. Pour rester dans les plages de densité, il faut adapter les pentes d'accélération aux constantes de temps des redresseurs, en les diminuant. Sur la LRE1 les pentes sont de 0,12 m/s<sup>2</sup> donc très largement inférieures à la valeur de 0,5m/s<sup>2</sup> utilisé pour l'essai.

### 3.3 Amélioration de la solution

Enfin, j'ai soumis ce régulateur amélioré au signal représentatif d'un maximum de cas réel, proche d'un SBPA.

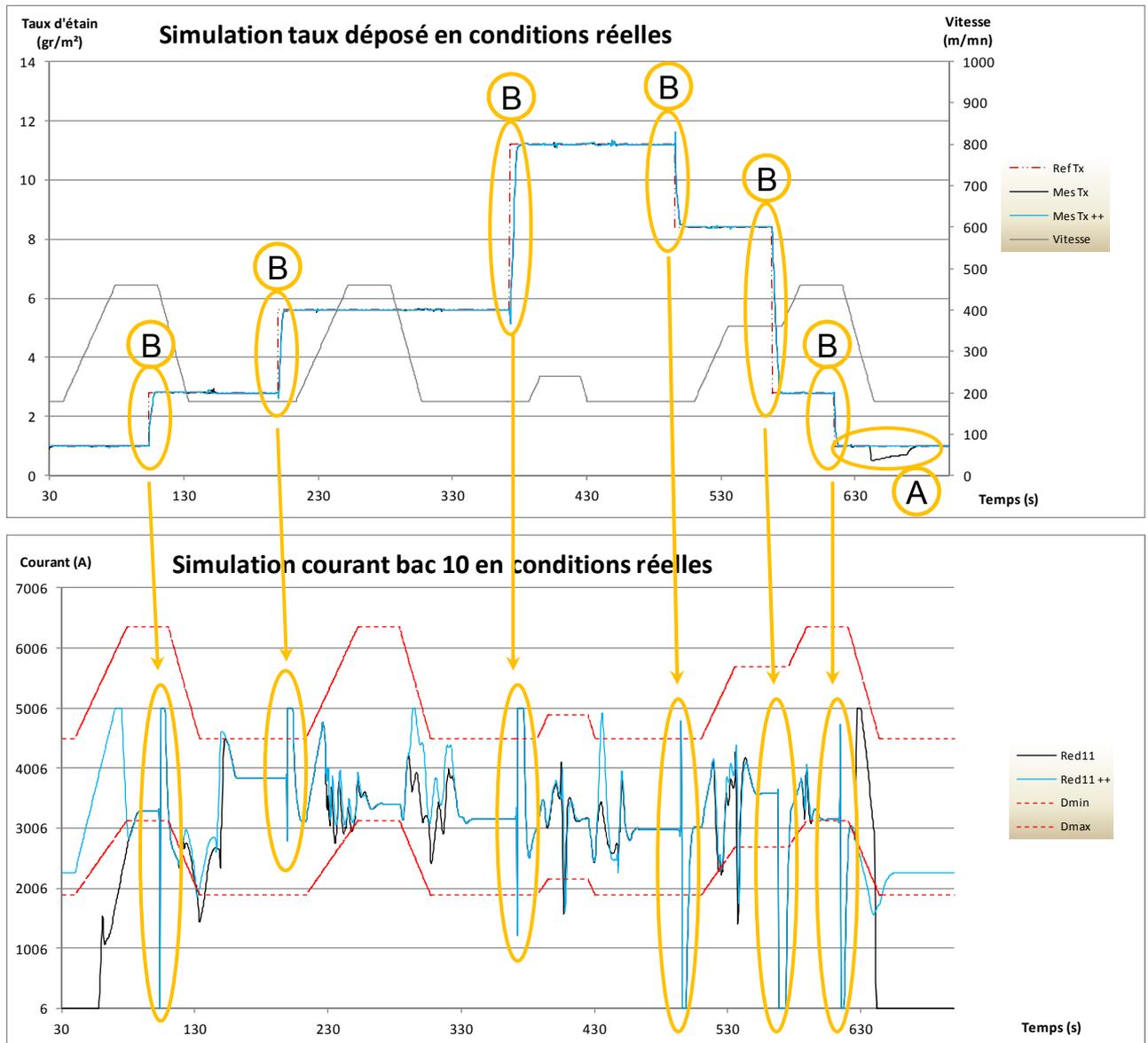


Figure 37 - Simulation régulateur soumis au SBPA

On observe que la régulation du taux d'étain est satisfaisante dans la grande majorité des cas. De même, la densité d'étamage est respectée. Seuls la régulation de faible taux **A** et les changements de référence **B** posent problème.

Lors d'un changement de taux, nous cherchons à passer de l'ancien au nouveau taux le plus rapidement possible pour avoir le minimum de longueur de bande touchée par la transition. Le temps de réponse des redresseurs est pénalisant dans ce cas. Nous avons peu d'action possible sur ce point (§2.3.4.2). Une consigne existe déjà pour limiter la vitesse de bande au minimum, c'est à dire 180 m/mn lors des changements de taux. Elle est reconduite.

Reste les difficultés de régulation des faibles taux. Elles sont principalement dues à l'ordre d'enclenchement des redresseurs. En effet, lorsque le taux est faible et que la vitesse est lente, un seul bac est en service, le bac 1. C'est un bac équipé de redresseur à self saturable, donc lent. Pour remédier à ce problème, j'ai proposé aux techniciens process de modifier l'ordonnancement, en commençant par le bac 10 avant le bac 1. D'après les techniciens process, cette modification n'aura que peu d'impact. Elle est acceptable. Après vérification sur le simulateur, elle n'a pas d'impact négatif sur la régulation non plus. Le nouvel ordre d'enclenchement des bacs est donc 10-1-3-2-4-5-6-7-8-9.

En résumé, grâce à la bibliographie récoltée et à l'outil logiciel Matlab, j'ai conçu un système de contrôle-commande. Par simulation, il a été possible d'optimiser son fonctionnement et de définir quatre paramètres de réglage :

- Le coefficient de réserve de courant total ;
- La marge de courant du bac 10 ;
- Les deux valeurs d'anticipation de vitesse.

Le système est donc prêt à être implanté sur une installation réelle.

## 4 Mise en œuvre

---

En parallèle de la conception du contrôle-commande, j'ai préparé son intégration sur la LRE1. J'ai redéfini l'architecture des automatismes, pris contact avec des fournisseurs et construit un planning d'intervention avec eux. Enfin, j'ai formé les intervenants de maintenance et d'exploitation préalablement à la mise en service.

### 4.1 Architecture des automatismes

---

L'architecture des automatismes est redéfinie afin de garder une cohérence entre les différents projets en cours sur la LRE1. Certains concernent des modifications de process, d'autres de gestion de pérennité du matériel. Dans tous les cas, elle tient compte des objectifs de ces projets ainsi que de critères d'exploitation et de maintenabilité.

Par exemple, nous avons choisi d'utiliser la machine MTS (ALSPA 80HPCi) pour accueillir le cœur de la régulation, puisque dans une précédente modification sur la partie fusion, c'est cet automate qui a été choisi pour exercer une fonction similaire. Ce choix a aussi été influencé par une problématique de pérennité qui concerne les automates de type ALSPA 80MT utilisés dans l'ancienne régulation. Ils sont en fin de vie et ne sont plus maintenus par le constructeur. A terme, cette modification va permettre de supprimer cet automate et créer des pièces de rechange pour ceux encore en service dans l'usine.

D'autre part, pour respecter l'objectif de simplification, il est important de pouvoir accéder facilement aux programmes et aux données. Le 80HPCi répond tout à fait à ce critère. Il est aisément possible de voir le programme animé de ses données en dynamique. De plus des fonctions d'historisation des signaux sont simples à mettre en œuvre.

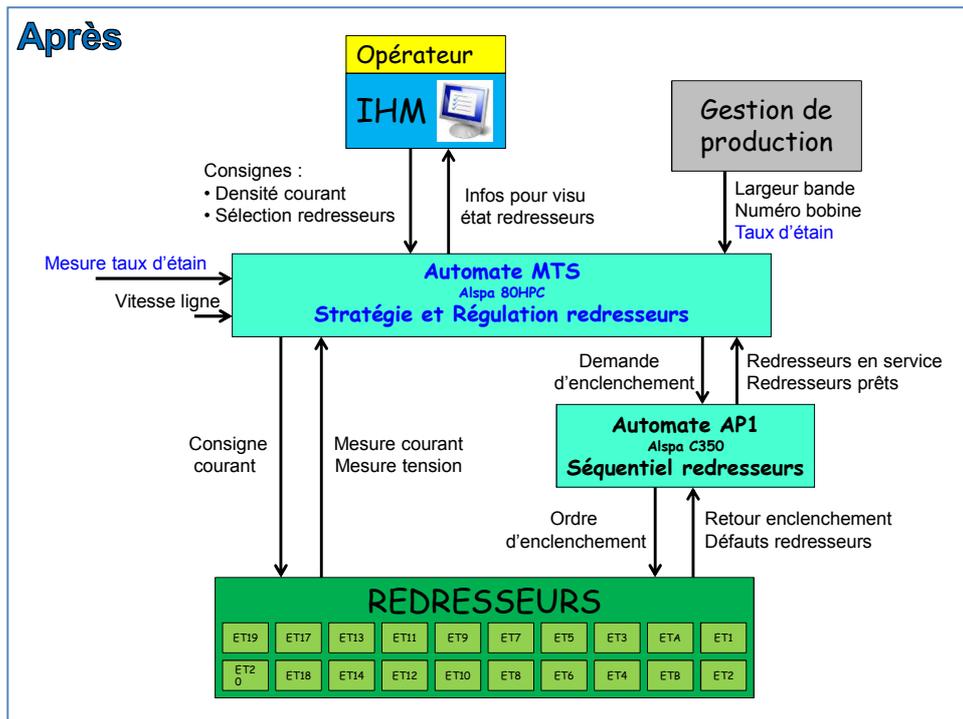
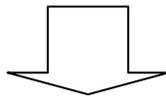
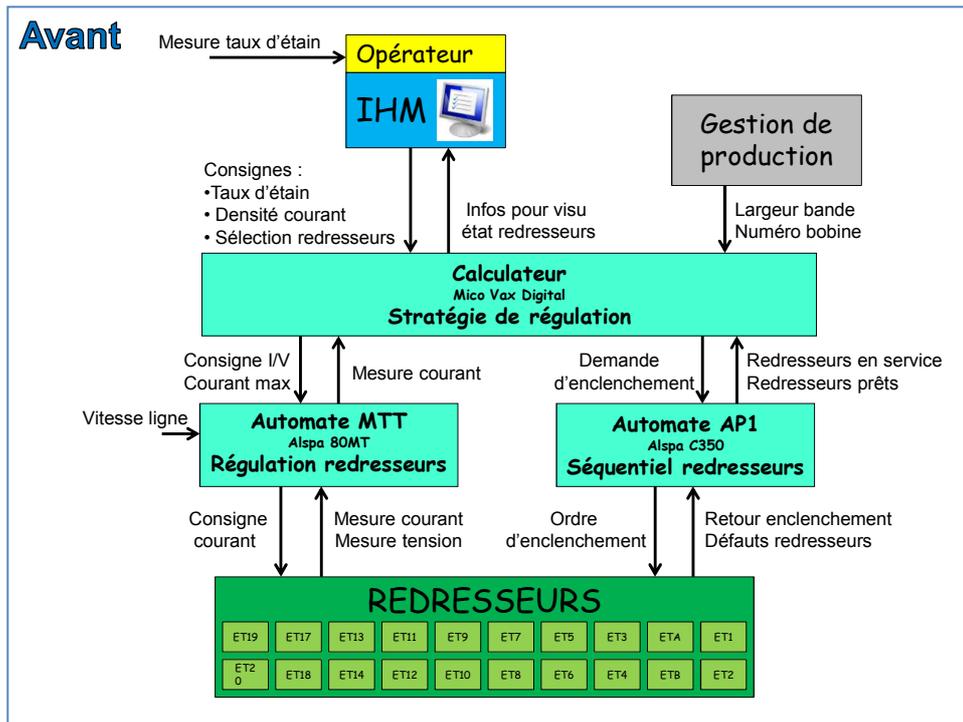


Figure 38 - Evolution architecture automatismes LRE1

La configuration retenue permet de remplacer les fonctions contenues dans le calculateur et l'automate MTT par un nouveau développement dans l'automate MTS (Figure 38).



### 4.3 Formation et accompagnement technique

---

Tous ces changements ont fait apparaître un besoin de formation. En effet, chaque intervenant, qu'il soit exploitant ou mainteneur, va perdre les repères qu'il avait. Pour exemple, les mainteneurs qui connaissent bien l'architecture des automatismes de la ligne doivent réactualiser leur connaissance avec cette nouvelle structure. Pour les exploitants, nous avons essayé de limiter les modifications des vues de supervision. Malgré tout, les modifications, même minime, peuvent avoir des impacts importants. Elles doivent être expliquées.

J'ai donc préparé deux modules : Un de trente minutes destinée aux exploitants de la ligne et un autre de trois heures pour les mainteneurs.

Le temps de formation est divisé en deux parties : un rappel théorique du contexte et des modifications, suivi d'une visite terrain permettant de visualiser concrètement les éléments.

Ces sessions se sont déroulées de mai 2015 à septembre 2015. Elles ont touché 17 exploitants ainsi que 35 techniciens de maintenance en 11 sessions.

## 4.4 Mise en service

---

Les études, la simulation et la formation des intervenants sont souvent des préalables indispensables à un projet. Cependant, les oublis ou erreurs réalisés à chacune de ces étapes sont bien souvent révélés quand on appuie sur le bouton marche. Il est donc indispensable d'anticiper ces problèmes en organisant des essais en amont de la mise en service. Ils se sont déroulés en trois phases :

- Essais des interfaces :  
Afin de s'assurer que les données entrant et sortant du système de contrôle-commande sont fiables, chaque entrée, sortie ou échange réseau a été testé individuellement ;
- Test du contrôle commande en parallèle de l'ancien système.  
Avant la mise en service définitive, les entrées de l'ancien système ont été dupliquées pour alimenter le nouveau. Le fonctionnement a pu être testé dans les conditions du réel permettant une partie du débogage de l'application en temps masqué ;
- Essais dynamiques en conditions réelles.  
Enfin, lors de la mise en service définitive, les sorties du nouveau contrôle commande ont été raccordées aux actionneurs. Lors du démarrage, chaque redresseur a été testé individuellement afin de s'assurer de son bon fonctionnement.

A l'issue de ces essais, la mise en service sur le LRE1 d'ArcelorMittal Basse Indre s'est déroulée du 10 au 14 septembre 2015. Le nouveau contrôle-commande est opérationnel.

## 5 Conclusion

---

L'usine ArcelorMittal de Basse Indre, de part son contexte économique, est contrainte d'évoluer. Le travail sur la régulation d'étamage de la LRE1 permet de répondre à ce besoin d'évolution, par réduction de la consommation d'étain et par augmentation de la productivité. En utilisant un simulateur, il est possible de concevoir et de tester un contrôle commande sans impact sur la production. Le simulateur, construit sur la base des connaissances du système réel, doit être validé en comparant ses résultats à la réalité.

Dans notre cas, la construction du régulateur s'est appuyée sur la documentation récoltée sur d'autres lignes d'étamage en Europe ainsi que sur l'expérience des exploitants et des mainteneurs. Ensuite, grâce à la simulation, cette version de base a été améliorée en la soumettant à une perturbation extrême, ce qui a rendu le système plus robuste. Enfin, une simulation finale avec un signal pseudo aléatoire représentant une grande variété de cas de figure a permis d'apprécier le fonctionnement satisfaisant du système.

En parallèle de la conception du contrôle-commande, la réalisation sur site a été préparée. Après avoir sélectionné les fournisseurs, les entrées et sorties du système ont été raccordées. Enfin, après une série d'essais, la mise en service a eu lieu.

Grâce aux formations dispensées, les exploitants et mainteneurs qui opèrent désormais sur la régulation d'étamage LRE1, auront un temps d'adaptation plus court que s'ils avaient eu tout à découvrir par eux même. Mais comme avec l'ancienne régulation datant de 1989, il est possible que ces connaissances s'épuisent si on ne prend pas soin de les entretenir. Il est aussi fort probable, qu'avec le temps, ils trouveront des idées pour améliorer encore ce système, et ainsi utiliserons leur intelligence pour rester compétitifs face à leur concurrents.

## Table de figures

---

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 - Historique groupe Arcelormittal (Service, 2015).....                                | 7  |
| Figure 2 - Photo aérienne Arcelormittal Basse Indre (Service, 2015).....                       | 8  |
| Figure 3 - Bobines d'acier revêtu d'étain.....   | 8  |
| Figure 4 - Etapes de fabrication du fer blanc (Service, 2015).....                             | 9  |
| Figure 5 – Produits des clients d'Arcelormittal (mathisprost.lu, 2015).....                    | 10 |
| Figure 6 - Produits des clients d'Arcelormittal (cuisine.com, 2015).....                       | 10 |
| Figure 7 - Comité de direction d'ArcelorMittal Basse Indre (Arcelormittal S. c., 2015).....    | 12 |
| Figure 8 - Organigramme Département Aval ArcelorMittal Basse Indre (Service, 2015).....        | 13 |
| Figure 9 - Schéma d'ensemble LRE1 (Service, 2015).....   | 15 |
| Figure 10 - Schéma d'une ligne avec accumulateurs de bande. (USP, 2015).....                   | 16 |
| Figure 11 - Photographie section étamage LRE1.....   | 17 |
| Figure 12 - Schéma d'un bac d'étamage LRE1.....  | 17 |
| Figure 13 - Plan d'ensemble section étamage LRE1 (Arcelormittal S. c., 2015).....              | 18 |
| Figure 14 - Schéma fonctionnel Ex régulation d'étamage LRE1.....                               | 20 |
| Figure 15 - Schéma de principe du simulateur.....  | 26 |
| Figure 16 - Générateur de référence (Taux Sn) et perturbation (Vitesse).....                   | 27 |
| Figure 17 – Schéma d'un bac d'étamage.....   | 28 |
| Figure 18 - Electrolyse de l'étain (USP, 2015).....  | 29 |
| Figure 19 – Détail calcul dépôt d'étain (Arcelormittal F. , 2015).....                         | 31 |
| Figure 20 - Schéma bacs et redresseurs LRE1.....   | 32 |
| Figure 21 - Enregistrement courant redresseur A.....   | 33 |
| Figure 22 - Selfs + transformateurs + ponts redresseurs LRE1.....                              | 34 |
| Figure 24 – Principe redresseur à self saturable.....  | 34 |
| Figure 23 - Enregistrement courant ET3 en BF.....  | 34 |
| Figure 25 - Comparaison courants et taux d'étain réel et simulés lors d'une accélération.....  | 36 |
| Figure 26 - Schéma de principe du régulateur d'étamage.....                                    | 38 |
| Figure 27 – Evolution du courant d'un redresseur en fonction de la vitesse.....                | 40 |
| Figure 28 – Détail stratégie redresseurs (Arcelormittal F. , 2015).....                        | 42 |
| Figure 29 - Calcul référence courant par répartition uniforme.....                             | 43 |
| Figure 30 - Calcul référence courant en fonction du "reste à déposer".....                     | 43 |
| Figure 31 - Comparatif des réponses de trois régulateurs lors d'un transitoire de vitesse..... | 44 |
| Figure 32 – Détail suivi étamage (Arcelormittal F. , 2015).....                                | 46 |
| Figure 33 - Principe régulation étamage avec réserve de courant.....                           | 48 |
| Figure 34 - Principe d'étamage avec modification de répartition bac 10.....                    | 49 |
| Figure 35 - Représentation graphique vitesse anticipée.....                                    | 50 |
| Figure 36 - Comparatif régulateur avant/après modifications.....                               | 51 |
| Figure 37 - Simulation régulateur soumis au SBPA.....  | 53 |
| Figure 38 - Evolution architecture automatismes LRE1.....                                      | 56 |
| Figure 39 - Evolution câblage mesures courant redresseurs LRE1.....                            | 57 |

## Bibliographie

---

Avilès. (2012). *ArcelorMittal : Gestión del recubrimiento de estaño.*

Chrostowski. (2001). *ALSTOM Power conversion : Principes du controle du revetement.*

*cuisine.com.* (2015, Sept). Récupéré sur <http://cuisine.journaldesfemmes.com>

F.Thibault. (2015, avril). ArcelorMittal : Document de formation étamage LRE1.

*mathisprost.lu.* (2015, Sept). Récupéré sur [http://www.mathisprost.lu/fr/wine\\_2\\_2.html](http://www.mathisprost.lu/fr/wine_2_2.html)

Pailloud, B. (1989). *CGEE Alsthom : Modernisation étamage numéro 1 CARNAUD Basse Indre.*

Savourey, M. (2007). *Converteam : Cahier des charges régulation étamage LRE2.*

SEDP. (2014). *ArcelorMittal : Formation étamage LRE1.*

Service, c. (2015, Juin). *Intranet ArcelorMittal Basse Indre.*

USP. (2015, Avril). *ArcelorMittal : usp-formation.* Récupéré sur <http://web-usp-formation>

L'usine ArcelorMittal de Basse Indre (44) fabrique des aciers pour emballage. Sa spécialité, le fer blanc, est constituée d'acier recouvert d'étain. Celui-ci est déposé par électrolyse sur la bande d'acier en défilement.

Dans une logique d'amélioration continue, l'ancien procédé de régulation du dépôt d'étain ne donne plus satisfaction, il est décidé de le moderniser. Un nouveau système de contrôle-commande est conçu en s'appuyant sur l'expérience des utilisateurs et en comparant d'autres installations similaires. Pour limiter l'impact du développement de cette modernisation sur les performances de la ligne de production, un simulateur est créé. Ainsi, grâce à la simulation, les essais réalisés permettent d'obtenir une solution satisfaisante avec un minimum de gêne de production.

La mise en œuvre de cette solution est facilitée grâce à la simulation mais n'exclut pas les essais préalables à la mise en service définitive. Une fois les essais réalisés et les intervenants formés, le nouveau contrôle-commande a été installé sur place et est complètement exploitable.

Mots clés : Fer blanc – Electrolyse – Etain – Simulateur - Contrôle-commande

The ArcelorMittal plant of Basse Indre (44) manufactures packaging steel. Its specialty – tinfoil – is made of tin coated steel. This material is electrodeposited on a running steel strip.

In a logic of continuous improvement, the previous tin sediment control system no longer gave satisfaction, so upgrading it seemed to be the right solution. A new control system is designed built first on experience of users and then comparing it to other similar plants.

To limit the impact of the modernization on the performance of the production line, a simulator is created. So, thanks to simulation, the tests that have been undertaken provide a satisfactory solution with less perturbation of the production as possible.

The implementation of this solution is facilitated thanks to simulation but do not exclude any previous test to final commissioning. Once the tests undertaken and the stakeholders trained, the new control system is set up and can be fully used.

Keywords: Tinfoil - Electrolysis - Tin - Simulator – Control system