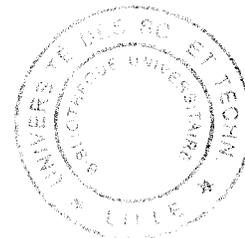


50376
1998
460

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

N° d'ordre : 2315

THÈSE



pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE I

en

AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

présentée et soutenue par

David DESCHAMPS

le 9 Septembre 1998

RÉGULATION D'UNE LIGNE D'ÉTAMAGE ÉLECTROLYTIQUE

Commission d'examen :

Président du jury :	M. S. MAUCHE	Professeur à l'Université de Lille I
Rapporteurs :	M. A. EL MOUDNI	Professeur à l'École Nationale de Belfort
	M. A. RICHARD	Professeur à l'Université de Nancy I
Directeurs de thèse :	M. P. BORNE	Professeur à l'École Centrale de Lille
	M. J.Y. DAUPHIN	Maître de conférence à l'École Centrale de Lille
Examineurs :	M. J.P. RICHARD	Professeur à l'École Centrale de Lille
	M. R. MIEZE	Ingénieur à Sollac Dunkerque
	M. D. HANNICQUE	Ingénieur à Sollac Mardyck

Thèse préparée au Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle de Lille
L.A.I.L URA CNRS D1440 - École Centrale de Lille

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été effectué dans le cadre d'une convention CIFRE entre SOLLAC et le Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille.

Je tiens à remercier Monsieur R. MIEZE, ingénieur à SOLLAC Dunkerque, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe du service DMTN/AI.

Je remercie tout particulièrement le Professeur P. BORNE d'avoir été mon directeur de recherche, et pour la confiance et les conseils qu'il m'a donnés durant ces trois années.

Merci à Monsieur J.Y. DAUPHIN, Maître de conférence à l'École Centrale de Lille pour sa participation au jury et pour l'aide bienveillante qu'il m'a offerte dans la rédaction de ce mémoire.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur S. MAOUCHE, Professeur à l'Université de Lille I d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je suis très reconnaissant envers Messieurs A. EL MOUDNI, Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Belfort, et A. RICHARD, Professeur à l'Université Henri Pointcaré de Nancy, pour l'honneur qu'ils me font en étudiant ce travail et en étant les rapporteurs.

J'adresse mes remerciements les plus vifs à Monsieur D. HANNICQUE, ingénieur à SOLLAC Mardyck, pour ses conseils, ses apports et ses encouragements pendant la réalisation de ce travail.

Je remercie également Monsieur J.P. RICHARD, Professeur à l'École Centrale de Lille, d'avoir bien voulu accepter de participer à ce jury.

Enfin, je ne saurai oublier toute l'équipe du STA de SOLLAC Mardyck pour la bonne ambiance dans laquelle j'ai passé ces trois années de recherche, qu'ils reçoivent ici le témoignage de ma profonde sympathie.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	1
SOMMAIRE.....	2
INTRODUCTION.....	6
CHAPITRE I : L'ÉTAMAGE ÉLECTROLYTIQUE.....	7
I/ LE FER BLANC ÉLECTROLYTIQUE.....	8
I/ 1. HISTORIQUE :	8
I/ 2. PRINCIPE DE L'ÉTAMAGE ÉLECTROLYTIQUE :	9
I/ 3. UTILISATION DU FER BLANC ÉLECTROLYTIQUE :	10
II/ LA LIGNE D'ÉTAMAGE DE SOLLAC MARDYCK	11
II/ 1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE :	11
II/ 2. DESCRIPTON D'UNE CELLULE D'ÉTAMAGE :	13
II/ 2.1. Structure :	13
II/ 2.2. Les anodes :	13
II/ 2.3. L'électrolyte :	15
III/ FONCTIONNEMENT DE LA RÉGULATION ACTUELLE	17
III/ 1. PRINCIPES GÉNÉRAUX :	17
III/ 1.1. Boucle rapide :	17
III/ 1.2. Boucle lente :	18
III/ 2. PERFORMANCES :	18
III/ 3. DÉFAUTS :	19
III/ 3.1. Réaction théorique de la régulation face à une accélération :	19
III/ 3.2. Commande des redresseurs :	20
IV/ PRÉSENTATION DE LA JAUGE DE REVÊTEMENT	22
IV/ 1. IMPLANTATION DU MATÉRIEL :	22
IV/ 1.1. Jauge en ligne :	22
IV/ 1.2. Jauge «LABO» :	22
IV/ 2. PRINCIPE PHYSIQUE DE LA MESURE :	23
IV/ 2.1. Description de la tête de mesure :	23
IV/ 2.2. Principe de la mesure :	23
IV/ 2.3. Fonctionnement du balayage et des cellules :	24
IV/ 2.4. Exemple d'un balayage :	25
CHAPITRE II : ÉTUDE D'UNE CELLULE D'ÉLECTRODÉPOSITION...27	
I/ RÉPARTITION DU COURANT SUR LA BANDE	28
I/ 1. INTRODUCTION :	28
I/ 2. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA BANDE :	29

SOMMAIRE

I/ 3. INFLUENCE DE LA RÉSISTIVITÉ DE L'ÉLECTROLYTE :	30
I/ 4. INFLUENCE DE LA DISTANCE ANODE-BANDE :	31
I/ 5. INFLUENCE DU NIVEAU D'ÉLECTROLYTE :	32
I/ 6. INFLUENCE D'UNE USURE IRRÉGULIÈRE DES ANODES :	33
I/ 7. CONCLUSIONS :	36
II/ MODÉLISATION DE L'EFFET DE SATURATION DES REDRESSEURS	37
II/ 1. ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE DE PONT :	37
II/ 1.1. Description des essais :	38
II/ 1.2. Interprétation des résultats :	38
II/ 1.3. Conclusions :	43
II/ 2. MODÉLISATION DE LA SATURATION DES REDRESSEURS :	44
II/ 2.1. Introduction :	44
II/ 2.2. Description de la saturation :	44
II/ 2.3. Mise en équation du cas général :	47
II/ 2.4. Ponts d'anodes insolubles :	48
II/ 2.5. Ponts en vis à vis hors service :	48
II/ 2.6. Influence de la section de bande :	49
II/ 2.7. Résultats du modèle :	50
CHAPITRE III : RÉOLUTION D'UN DÉFAUT D'ASPECT.....	52
I/ RECRUESCENCE D'UN DÉFAUT D'ASPECT	53
I/ 1. INTRODUCTION :	53
I/ 2. CAUSALITÉS DE L'APPARITION DU DÉFAUT :	53
II/ MÉCANISME DE FORMATION DU DÉPÔT D'ÉTAIN	55
II/ 1. LA GERMINATION :	55
II/ 2. LA CROISSANCE :	56
III/ MORPHOLOGIE DU DÉFAUT	59
III/ 1. ÉCHANTILLONS ANALYSÉS :	59
III/ 2. OBSERVATIONS DE L'ÉCHANTILLON DE RÉFÉRENCE :	60
III/ 2.1. Revêtement de 2.8 g/m ² :	60
III/ 2.2. Revêtement de 1 g/m ² :	61
III/ 3. OBSERVATIONS DU DÉFAUT :	61
III/ 3.1. Analyse micrographique de surface :	62
III/ 3.2. Répartition du revêtement présentant le défaut :	62
III/ 3.3. Aspect des cristaux d'étain :	63
III/ 4. CONCLUSION :	64
IV/ ACTIONS MENÉES POUR ÉLIMINER LE DÉFAUT	65
IV/ 1. CONDUITE DE LA LIGNE :	65
IV/ 2. MODIFICATION DU POINT DE FONCTIONNEMENT :	65
IV/ 3. DÉPOLARISATION RÉGULIÈRE DU DÉCAPAGE :	67
V/ RÉSULTATS	69
CHAPITRE IV : MODÉLISATION NEURONALE DU RENDEMENT.....	71
I/ INTRODUCTION	72
II/ ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE	73

CHAPITRE IV : MODÉLISATION NEURONALE DU RENDEMENT.....	71
I/ INTRODUCTION.....	72
II/ ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE.....	73
III/ DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE.....	74
III/ 1. VITESSE :.....	74
III/ 2. TAUX VISÉ (FACE SUPÉRIEURE ET INFÉRIEURE) :.....	74
III/ 2.1. Taux visé par face :.....	74
III/ 2.2. Influence des rendements différentiels :.....	75
III/ 3. LARGEUR ET ÉPAISSEUR DE BANDE :.....	76
III/ 4. $[SN^{2+}]$, $[H^+]$, TEMPÉRATURE DE L'ÉLECTROLYTE :.....	76
III/ 5. INTENSITÉ DES PONTS :.....	76
III/ 6. CONCLUSION :.....	77
IV/ APPROCHE LINÉAIRE.....	78
IV/ 1. INTRODUCTION :.....	78
IV/ 1.1. Formulation générale :.....	78
IV/ 1.2. Critères de précision :.....	78
IV/ 1.3. Premier modèle linéaire :.....	79
IV/ 1.4. Second modèle linéaire :.....	80
V/ MODÉLISATION PAR RÉSEAUX DE NEURONES.....	81
V/ 1. FONCTIONNEMENT D'UN NEURONE :.....	81
V/ 2. STRUCTURE DU RÉSEAU NEURONAL :.....	82
V/ 3. DÉTERMINATION DES POIDS DU RÉSEAU DE NEURONES :.....	83
V/ 3.1. Couche d'entrée :.....	83
V/ 3.2. Couche cachée et couche de sortie :.....	84
V/ 3.3. Description de la base d'apprentissage :.....	87
V/ 4. RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS :.....	87
V/ 4.1. Identification à partir de la base d'apprentissage :.....	87
V/ 4.2. Validation par la simulation sur la base de données :.....	90
V/ 4.3. Conclusion :.....	91
V/ 5. RÉSULTATS INDUSTRIELS :.....	92
 CHAPITRE V : PRÉSENTATION DE LA NOUVELLE RÉGULATION.....	 95
I/ ARCHITECTURE GÉNÉRALE.....	96
II/ MODULE DE STRATÉGIE.....	97
II/ 1. INTRODUCTION :.....	97
II/ 2. LIMITES DES INTENSITÉS DE RÉFÉRENCES :.....	97
II/ 3. CHOIX DES REDRESSEURS :.....	99
II/ 4. MODÉLISATION DE LA SATURATION DES REDRESSEURS :.....	99
II/ 5. MODÉLISATION DU RENDEMENT DE LA LIGNE :.....	100
II/ 6. DÉTERMINATION DE LA CONFIGURATION OPTIMALE :.....	100
II/ 6.1. Régulation sur le dernier redresseur utilisé :.....	101
II/ 6.2. Régulation en équirépartition totale du courant :.....	101
II/ 6.3. Régulation en équirépartition minimale :.....	102
II/ 6.4. Régulation en équirépartition partielle :.....	102
II/ 6.5. Exemples :.....	103

SOMMAIRE

III/ MODULE DE RÉGULATION	106
III/ 1. INTRODUCTION :	106
III/ 2. FONCTIONNEMENT EN RÉGIME PERMANENT :	106
III/ 2.1. Suivi du dépôt d'étain :	107
III/ 2.2. Suivi de la saturation des redresseurs :	107
III/ 2.3. Mise à jour du rendement :	108
III/ 3. FONCTIONNEMENT EN RÉGIME TRANSITOIRE :	110
III/ 3.1. Introduction :	110
III/ 3.2. Changements de taux ou de redresseur :	110
III/ 3.3. Traitement d'une accélération:	113
 CHAPITRE VI : CONCLUSIONS.....	123
 BIBLIOGRAPHIE.....	127

INTRODUCTION

La protection contre la corrosion apportée par l'étain sur l'acier fait que le marché mondial de ce produit appelé Fer Blanc est essentiellement orienté vers la production d'emballages.

Parmi ses nombreuses utilisations, celle de la fabrication des boîtes boissons est en constante expansion, et concerne près de 80% de la production annuelle de fer blanc de l'usine de Sollac Mardyck qui fournit le tiers du marché européen.

Les exigences liées à ce produit sont très fortes, car il faut être capable de déposer sur une bande d'acier de grande largeur (>1m) qui défile à une vitesse élevée (la vitesse maximale de la ligne est de 720 m/mn) une couche d'étain de quelques grammes par mètre carré (un revêtement de 1 g/m² représente une couche d'étain de 0.15 µm). De plus, la régularité de ce revêtement doit être extrême car la marge d'erreur tolérée est inférieure à 10% du taux moyen demandé.

Bien que la ligne d'étamage de Sollac Mardyck, construite en 1973 ait su s'adapter aux évolutions continues des produits par des modernisations successives, la régulation par microprocesseur mise en place en 1987 demande à être améliorée. Ce mémoire présente donc un modèle de régulation d'une ligne d'étamage électrolytique qui répond aux critères stricts imposés par les produits nouveaux de l'emballage.

Après une présentation générale du fer blanc, le processus d'électrodéposition est expliqué en détail, suivi de la présentation détaillée de la ligne d'étamage de Sollac Mardyck.

Puis l'étude porte sur les phénomènes de répartition locale du courant dans les cellules d'électrodéposition et propose une modélisation des limitations du courant global causées par les conditions de production.

La troisième partie du mémoire définit les plages de fonctionnement optimal de la ligne à travers la résolution de l'apparition d'un défaut d'aspect engendré par une dérive du process.

Part ailleurs, la maîtrise de la quantité d'étain déposée sur une bande d'acier dépendant fortement du rendement du processus d'électrodéposition, un modèle prédictif de détermination de ce rendement est ensuite présenté, modèle construit à partir d'un réseau de neurones.

La synthèse de ces études débouche finalement sur la proposition d'une nouvelle architecture de la régulation de la ligne d'étamage, permettant un dépôt très précis de l'étain sur la bande d'acier, que ce soit en régime permanent ou lors des phases transitoires de fonctionnement.

CHAPITRE I :
L'ÉTAMAGE ÉLECTROLYTIQUE

I/ LE FER BLANC ÉLECTROLYTIQUE

I/ 1. Historique :

Le Fer Blanc est une mince feuille ou bande d'acier doux, d'une épaisseur inférieure à 0,50mm, recouverte électrolytiquement d'étain pur sur ses deux faces. Son histoire débute après la première guerre mondiale :

En 1925, l'Allemand Schoettler mit au point une technique d'étamage électrolytique dont l'épaisseur de la couche était de l'ordre d'une dizaine de microns. Mais la porosité de ce métal était supérieure à celle de l'étamé à chaud (par trempage dans un bain d'étain liquide).

C'est en 1931, avec la production industrielle (depuis 1929) d'acier par des laminoirs cinq cages, que l'intérêt d'une ligne d'étamage électrolytique en bobines (procédé en continu) fut relancé dans le but d'abaisser le prix de revient du fer blanc. En effet, ce type de fonctionnement avec le procédé d'étamage à chaud imposait des vitesses trop faibles pour être rentables.

En 1937, la première ligne industrielle Américaine licenciée "Ferrostan" (brevet U.S.Steel) démarra à Gary (Indiana) mais elle n'avait ni huilage, ni refusion (le brillantage du fer blanc était obtenu par des brosses).

En 1941, après des essais infructueux de refusion par induction (trop cher), la refusion par effet Joule remplace les brosses et, en 1943, l'essentiel du processus actuel est alors atteint.

La pénurie d'étain durant la seconde guerre mondiale accéléra le développement du fer blanc électrolytique aux U.S.A. et ce n'est qu'en 1948 que les premières lignes électrolytiques furent installées en Europe (à l'exception de l'Allemagne qui, dès avant la guerre, étamait électrolytiquement des bandes de fer blanc en discontinu).

Depuis lors, les lignes d'étamage électrolytique ont doublé leur capacité par augmentation de leur vitesse de fonctionnement (jusqu'à 700 m/mn) mais le processus lui-même est resté pour l'essentiel inchangé.

Actuellement trois techniques sont utilisées, dont seule la composition de l'électrolyte change :

- procédé acide "Ferrostan" pour lequel l'étain est dans l'électrolyte sous forme d'ions stanneux (Sn^{2+})
- procédé acide / halogène "Du Pont de Nemours" pour lequel l'étain est également sous forme d'ions stanneux (Sn^{2+}) mais dont l'électrolyte, très corrosif, nécessite un entretien important
- procédé alcalin, en voie de disparition, car l'étain dans l'électrolyte est sous forme stannique (Sn^{4+}) si bien que la consommation de courant est double par rapport aux deux autres méthodes.

I/ 2. PRINCIPE DE L'ÉTAMAGE ÉLECTROLYTIQUE :

L'étamage électrolytique est la technique permettant, comme son nom l'indique, de déposer de l'étain par un procédé électrochimique.

Sous l'effet du passage d'un courant électrique un atome de l'anode en étain perd deux électrons et devient ion stanneux Sn^{2+} dans une solution appelée électrolyte. Cette charge positive est attirée vers la cathode (la bande de fer) où elle gagne deux électrons. Elle est donc transformée en un atome d'étain et devient dépôt métallique.

Les deux demi réactions qui entrent en jeu sont :



Cette réaction d'oxydoréduction a un potentiel normal $E_0=0,14 \text{ V}$ (V par rapport à l'hydrogène).

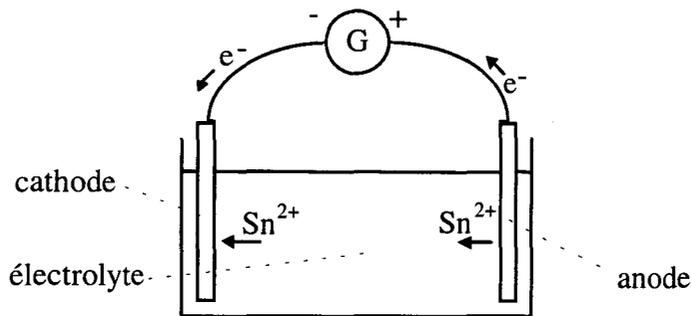


Figure I.1 : Dépôt électrolytique par anode soluble.

Ces phénomènes électrochimiques sont régis par la loi de Faraday qui postule que 96500 Coulombs représentent la quantité d'électricité nécessaire pour faire évoluer un équivalent gramme de substance. Dans notre cas, où la réaction aboutit à un dépôt, l'équivalent gramme est le rapport de la masse atomique M de l'étain au degré d'oxydation n .

La masse de substance réduite est donc obtenue par la relation suivante :

$$m = \frac{A \cdot Q}{96500 \cdot n} \quad (I.1)$$

avec pour le cas présenté:

- m (g) masse de substance réduite sur la cathode
- A (g) masse atomique (pour l'étain $M=118.71 \text{ g}$)
- Q (Coulomb) quantité de courant mise en jeu
- n degré d'oxydation (pour l'étain $n=2$).

Remarque : Étant donné qu'outre les atomes métalliques, bien d'autres atomes peuvent être libérés par le passage du courant, la quantité de métal déposé est inférieure à la quantité théorique. Ainsi l'hydrogène se dégage souvent lors d'une électrodéposition et la quantité d'électricité qui a servi à ce dégagement n'est plus disponible pour déposer le métal. La différence entre les quantités réelles et théoriques donne le rendement cathodique de la solution.

I/ 3. UTILISATION DU FER BLANC ÉLECTROLYTIQUE :

La protection contre la corrosion apportée par l'étain à l'acier présente l'avantage de donner au fer blanc une bonne soudabilité, indispensable pour la fabrication en continu. De plus, l'absence de toxicité de l'étain pour l'homme fait que le fer blanc trouve son utilité dans l'immense marché de l'emballage, alimentaire ou non [AUB-M7960].

Les applications principales de l'acier étamé à Sollac Mardyck sont :

✓ **Produits « conventionnels »** : Produits sous l'appellation SR (simple réduction) ou DR (double réduction), ils sont destinés à la fabrication de boîtes de conserves à caractères alimentaire ou non (capsules, aérosols, peintures,...). Ils représentent 20 à 30% de la production totale de la ligne d'étamage. L'acier, issu du train à chaud, subit un recuit (recuit continu ou recuit base suivant la ductibilité que l'on veut atteindre), puis un écrouissage visant à lui rendre ses caractéristiques mécaniques (élasticité, épaisseur, rugosité). Selon les situations, le taux d'étain déposé sur la bande varie de 1 g/m² (0,14 µm) à 12 g/m² (1,76 µm). Il est ensuite généralement refondu afin de donner l'aspect brillant et de renforcer l'étanchéité totale par la création d'une couche alliée entre l'étain et l'acier.

✓ **Produit pour la boîte boisson** : Marché en pleine expansion, les boîtes boissons représentent 70 à 80% de la production de la ligne de Sollac Mardyck (350 000 T/an) qui est la seule en France à pouvoir produire l'acier étamé dans les grandes largeurs nécessaires (1250 mm). Ces boîtes boissons sont fabriquées selon le procédé DWI (Drawn and Walled Iron), procédé d'emboutissage et d'étirage, et qui nécessite des aciers extrêmement doux et sans inclusions, des bandes de grandes largeurs de laminage (1200 mm), des épaisseurs de plus en plus faibles (0.2 à 0.25 mm), un profil de laminage " super square ", un recuit continu, et une rugosité forte. L'étain déposé n'est pas refondu car il sert plus de lubrifiant pour les machines d'emboutissage que de protection contre la corrosion (la protection anti-corrosive est apportée par des vernis alimentaires). C'est pourquoi les taux déposés sont très faibles (de 1g/m² à 4g/m²).

II/ LA LIGNE D'ÉTAMAGE DE SOLLAC MARDYCK

II/ 1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE :

La ligne d'étamage de Sollac Mardyck utilise, comme la grande majorité des lignes actuelles, le procédé Ferrostan, défini par U.S.Steel [USS-91]. La bande qui arrive au stade de l'étamage a subi en amont toute une série de phases préparatoires qui sont :

✓ **Le décapage** : il dissout les calamines d'aciers déposées par le train à chaud et qui constituent un dépôt préjudiciable à l'étamage final.

✓ **Le laminage à froid** : les taux de réductions forts pour le fer blanc nécessitent de répartir la déformation sur un nombre de cages important (5 pour Mardyck) et d'utiliser une émulsion de laminage faite à partir d'une huile à indice de saponification forte qui rend une opération de dégraissage obligatoire avant le recuit.

✓ **Le recuit** : deux techniques existent : soit le recuit base pour lequel les bobines restent dans des fours pouvant en contenir trois ou quatre superposées, soit le recuit continu où la bande est recuite au défilé, ce qui raccourci le temps de traitement mais nécessite des températures plus élevées.

✓ **L'écrouissage** : réalisé sur un laminoir à deux cages, son but est de rendre à l'acier ses caractéristiques mécaniques en terme d'élasticité, de créer le profil de rugosité, d'affiner la planéité. L'allongement de la bande peut être fait par une cage (simple réduction) ou réparti sur les deux cages (double réduction).

Les bobines ainsi traitées sont prêtes à être revêtues. L'enchaînement des opérations de traitement de la bande sur une ligne d'étamage est sensiblement le même quelles que soient les installations [BOR-96] et peut être découpé en les sept étapes suivantes (cf. figure I.2) :

✓ **Le déroulage** : partie composée de deux dérouleuses, d'une soudeuse à molettes, et d'une tour d'accumulation, son rôle est de constituer une bande sans fin qui justifie l'appellation de ligne continue. La tour d'accumulation sert de réservoir permettant le fonctionnement à vitesse constante pour les phases aval lors des arrêts de soudage.

✓ **La préparation du métal** : la mise à largeur du produit est faite par des cisailles de rives, puis le passage dans une planeuse sous traction permet de parachever la planéité de la bande. La zone de dégraissage a pour but d'éliminer les souillures grasses du fer noir (mélange d'huile de laminage et de poussières métalliques). Cette opération est réalisée par des lessives alcalines, par électrolyse. La dernière opération de préparation est le décapage électrolytique qui a pour but d'éliminer les oxydes superficiels et quelques pollutions minérales qui gêneraient un étamage régulier. La solution utilisée est de l'acide sulfurique, avec un procédé électrolytique qui alterne passes cathodiques et anodiques, la dernière passe étant de préférence cathodique afin d'éviter l'oxyde superficiel que laisserait une passe anodique. La bande est ensuite rincée afin d'éviter un entraînement d'acide dans les équipements suivants.

✓ **Zone d'étamage** : l'étamage est réalisé par le passage de la bande dans une succession de douze bacs verticaux dont le fonctionnement sera expliqué en détail ultérieurement. L'épaisseur d'étain déposé est contrôlée par une régulation du courant débité dans les cellules d'électrodéposition. Cette section s'achève par un rinçage dans une solution diluée de l'électrolyte.

✓ **Refusion** : À la sortie de la zone d'étamage, le revêtement a un aspect gris mat, terne et il se raye facilement. Pour certaines gammes de produits il est procédé à une fusion de l'étain par conduction et induction suivie par une trempe, qui donne sa brillance et améliore l'adhérence de l'étain par la création d'une interface d'alliation entre le fer et l'étain.

✓ **Traitements de surface** : Un traitement de passivation est ensuite réalisé sur la couche d'étain afin d'améliorer la résistance du fer blanc à la rouille. Il a comme effet de stabiliser l'oxydation de l'étain à l'air, d'améliorer l'adhérence des vernis et d'éviter la sulfuration de l'étain avec certains produits alimentaires. Le traitement couramment réalisé est fait par passes cathodiques dans un bain de bichromate de soude, qui s'achève par un rinçage. Enfin, l'huilage permet de prévenir les rayures et facilite l'engagement dans les machines.

✓ **Contrôles et mesures** : Le revêtement terminé, la bande transite par l'accumulateur de sortie et un contrôle de défaut visuel et automatique est effectué. Il s'accompagne des mesures nécessaires à la vérification du produit fini (largeur, épaisseur, longueur).

✓ **Enroulage** : La bande est enfin enroulée et découpée afin de former des bobines de poids en correspondance avec les attentes des clients.

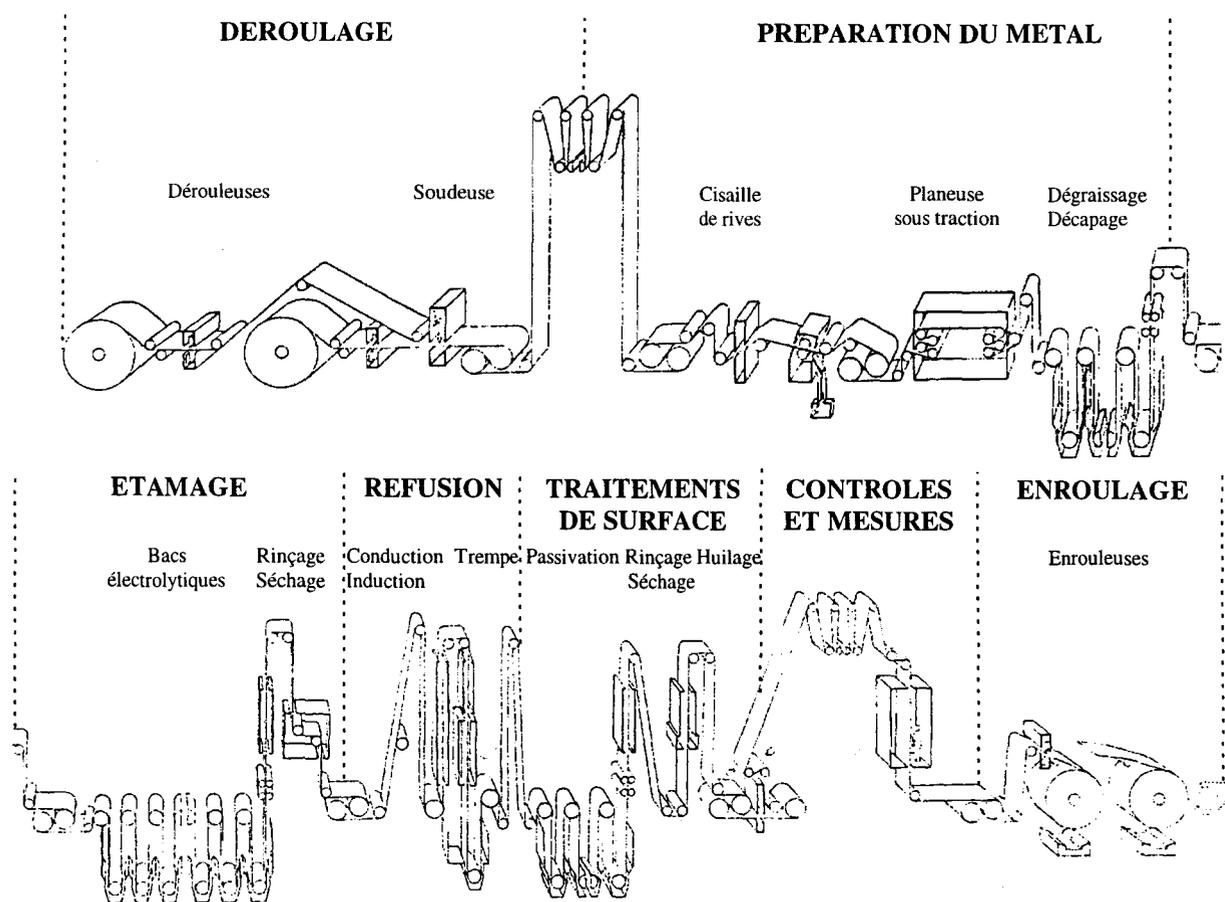


Figure I.2 : Descriptif de la ligne d'étamage.

II/ 2. DESCRIPTON D'UNE CELLULE D'ÉTAMAGE :

II/ 2.1. Structure :

Elle suit rigoureusement les plans imposés par le procédé Ferrostan [USS-91]. Toutes les cellules (bacs) d'étamage sont identiques à l'exception de la première qui peut être totalement isolée des autres. Ceci est dû à la nécessité d'un pré trempage spécial dans le premier bac en cas d'étamage d'inox (en moyenne une campagne par mois).

La ligne d'étamage de Sollac Mardyck se décompose en douze bacs d'électrodéposition, équipés, pour chacun d'eux, de quatre ponts d'anodes :

- deux pour la face supérieure de la bande
- deux pour la face inférieure de la bande

La bande passe dans des réservoirs accolés contenant un rouleau en fond de bac. Le passage d'un bac au suivant se fait par un rouleau conducteur qui transfère le courant à la bande maintenue ainsi cathodique [CHA-96].

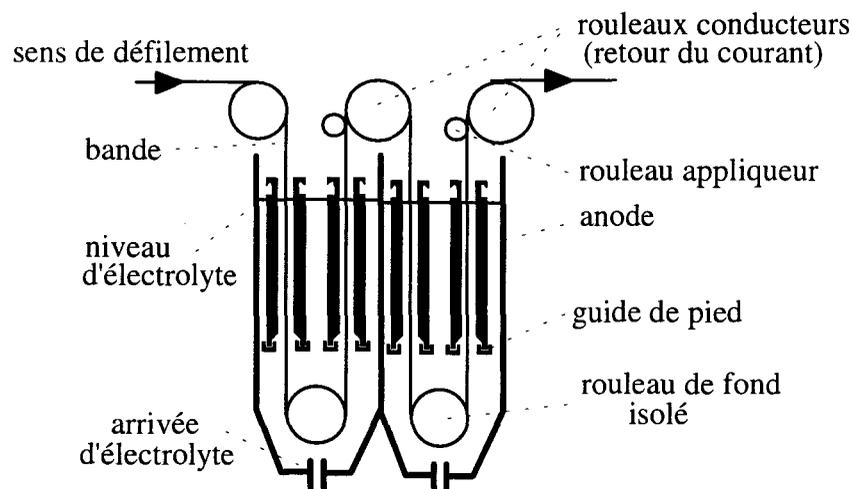


Figure I.3 : Cellules d'étamage

II/ 2.2. Les anodes :

Les anodes en étain sont disposées de chaque côté de la bande. Leurs dimensions ($L \times l \times h$) sont de 180 cm \times 8 cm \times 5 cm, leur longueur immergée utile est de 150 cm et neuves elles font près de 50 Kg. Elles viennent se loger, en tête et en pied, dans des guides, afin de maintenir leur position et de les empêcher de heurter la bande.

Afin de s'affranchir de la chute de tension le long de la bande par effet Joule, les ponts d'anodes sont légèrement inclinés (un demi degré) vers le bas, de sorte que la distance entre les électrodes (Gap) soit de 42 mm en tête et de 25 en pied (Figure I.4).

La densité de courant étant environ trois fois plus élevée sur les rives de la bande, on évite les sur épaisseurs de dépôts à ces endroits en positionnant les anodes en retrait d'environ 10 mm de chaque côté de la bande (cf Figure I.6 page 7).

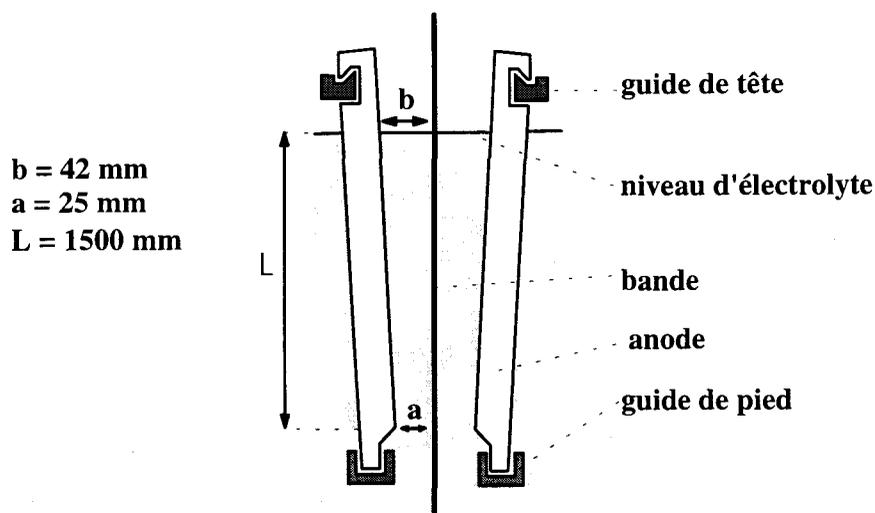


Figure I.4 : Inclinaison d'un pont (vue de profil).

Il faut distinguer deux types d'anodes:

✓ les solubles : composées d'étain pur à 99,95%, elles se dissolvent sous le passage du courant et fournissent les ions Sn^{2+} qui servent à l'étamage

✓ les insolubles: elles jouent le rôle d'électrodes auxiliaires. Sous leur effet, seuls les ions Sn^{2+} présents dans la solution servent à l'étamage. Ces anodes jouent un rôle de régulateur de concentration des ions Sn^{2+} dans l'électrolyte. Elles sont composées soit de Silicium soit de Titane.

La ligne de Sollac Mardyck est équipée d'anodes solubles pour 44 ponts et d'anodes insolubles pour les 4 ponts restants (2 par face). Chacun des ponts est alimenté par un générateur 24V/4500A. Deux géométries sont possibles pour les ponts d'anodes :

✓ ponts classiques (figure I.5) : les anodes sont introduites à une extrémité du pont et sont poussées au fur et à mesure de leur usure sur un guide incliné de façon à garder le gap constant. L'avantage de ce principe est d'une part de garder le pont en permanence en état de fonctionner, et d'autre part d'avoir l'intervalle entre la bande et la anodes constant en théorie. En pratique, il est assez difficile pour les opérateurs de réaliser une poussée des anodes très précise. De plus, cette manipulation, qui se fait à l'aide d'une perche, augmente le risque pour les anodes de sortir de leur guide de pied. Dans un tel cas, l'anode vient alors frotter sur la bande et provoque des griffes. Enfin, l'estimation de l'usure progressive des anodes est relativement peu précise et le profil du pont ne reste pas parfaitement parallèle à la bande, ce qui influe sur la régularité transversale du dépôt sur la bande.

✓ ponts parallèles (figure I.6) : les guides d'anodes sont parallèles à la bande, toutes les anodes suivent la même usure. Lorsque la cote d'usure maximale est atteinte (20 à 25 mm), il faut retirer toutes les anodes et les changer pour des neuves. Cette opération qui demande une demi heure de travail pour deux opérateurs et l'arrêt total du pont en question nécessite un suivi d'usure des ponts de la ligne afin de ne pas avoir tous les ponts usés en même temps. Par contre l'amélioration très nette de la régularité transversale du dépôt sur la bande et la meilleure estimation de l'état d'usure des anodes issues de cette disposition font que c'est cette géométrie qui est adoptée sur la ligne de Mardyck.

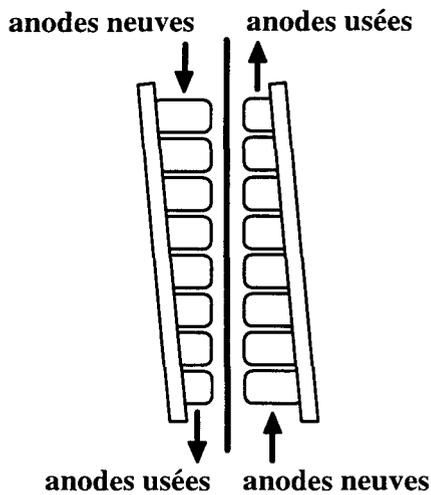


Figure I.5 : Pont non parallèle (vu de dessus)

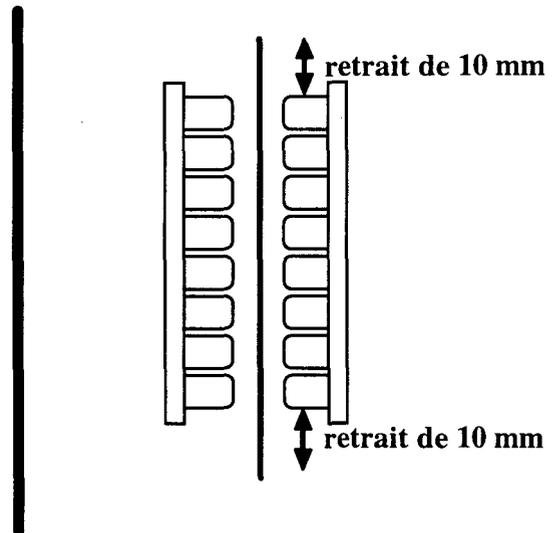


Figure I.6 : Pont parallèle (vu de dessus)

II/ 2.3. L'électrolyte :

L'électrolyte définit complètement la plage idéale de fonctionnement de la ligne. Il se compose de :

✓ Eau condensée

✓ Solution conductrice:

Il s'agit pour la ligne de Mardyck d'Acide Phénol Sulfonique (APS) libre puisqu'en excès dans l'électrolyte et du sel qu'il forme avec l'étain (qu'il dissout à chaud).

Ce constituant a pour but de :

- Rendre l'électrolyte très conducteur (par H^+) afin de diminuer les pertes par effet Joule.
- D'inhiber l'oxydation de l'étain stanneux en étain stannique au contact de l'air.
- D'améliorer le rendement cathodique en réduisant le dégagement d'hydrogène sur la cathode (réaction électrochimique parasite).

✓ Étain stanneux :

L'étain stanneux (Sn^{2+}) est renouvelé dans l'électrolyte par dissolution anodique. En effet, le rendement cathodique de l'électrodéposition (95%) étant inférieur au rendement anodique d'électrolyse (100%), il y a plus d'étain dissout à l'anode que d'étain déposé à la cathode. Il est donc inutile de faire des ajouts d'ions stanneux (au contraire il est nécessaire d'utiliser quelques ponts d'anodes insolubles afin de limiter les montées de concentration de Sn^{2+}).

✓ Produit d'addition :

Le rôle du produit d'addition est :

- d'affiner le grain afin de donner un dépôt adhérent et compact.
- d'augmenter la souplesse de l'électrolyte en élargissant la plage de densité de courant donnant un dépôt correct.

La ligne de Mardyck utilise comme produit d'addition l'ENSA (Ethoxylated alpha-Naphtol Sulfonic Acid) qui à l'avantage de se solubiliser facilement à température ambiante. Par contre, il est plus sensible à la présence d'ions étrangers tels que les ions ferreux.

✓ Les impuretés :

Des ions étrangers peuvent être apportés par la dissolution des anodes, d'où l'importance d'avoir de l'étain pur (99.95%). Si le rinçage après le décapage de la bande est mal effectué il peut y avoir une pollution de l'électrolyte par apport d'ions ferreux ou ferriques. Ces derniers peuvent également résulter d'une attaque du fer noir par l'APS si les premières passes d'étamage ne sont pas utilisées. Si la concentration en fer est trop importante, il y a oxydation de l'étain stanneux en étain stannique (Sn^{4+}).

Le contrôle des concentrations d'étain stanneux et d'acide est fait de façon automatique sur la ligne par des titrimètres qui calculent en boucle, toutes les vingt minutes. Face au débit important de l'électrolyte ($450 \text{ m}^3/\text{heure}$) les possibilités de réajustement de la concentration en Sn^{2+} sont soit d'utiliser des évaporateurs (afin d'augmenter la concentration), soit de transférer une partie du volume total dans des bacs annexes qui resservent plus tard, soit d'utiliser les ponts d'anodes insolubles.

D'autre part, l'usage d'échangeurs thermiques permet de faire redescendre une température d'électrolyte devenue trop forte. Toutes ces actions manuelles sont à l'initiative des opérateurs.

Un contrôle régulier des boues qui se déposent au fond des bacs permet un suivi des impuretés dans l'électrolyte.

III/ FONCTIONNEMENT DE LA RÉGULATION ACTUELLE

Ce chapitre explique les grands principes de la régulation mais n'aborde pas les questions de dialogues entre les différents calculateurs, ni la description des installations électriques utilisées. La régulation du taux d'étain sur la bande peut se décomposer en deux boucles de fonctionnement, l'une rapide et l'autre lente [BAC-87] :

III/ 1. PRINCIPES GÉNÉRAUX :

III/ 1.1. Boucle rapide :

Pour le suivi précis du taux d'étain, la bande présente dans la section des bacs d'électrodéposition est décomposée en portions de 4m, longueur séparant deux ponts d'anodes.

A chaque déplacement de la bande entre deux ponts, le programme calcule le dépôt d'étain sur chaque pont en fonction de l'intensité débitée par le redresseur correspondant, de la vitesse de la ligne, et du rendement. Ce rendement, dépendant lui même de l'intensité sur le pont et de la quantité d'étain préalablement déposée, est calculé à partir de courbes expérimentales.

Chaque longueur de 4m est donc suivie séparément tout le long de la section d'étamage, en cumulant les dépôts successifs selon la formule issue de la loi de Faraday :

$$\tau_i = \frac{\eta_i}{K.L} \cdot \frac{I_i}{V} \quad (I.2)$$

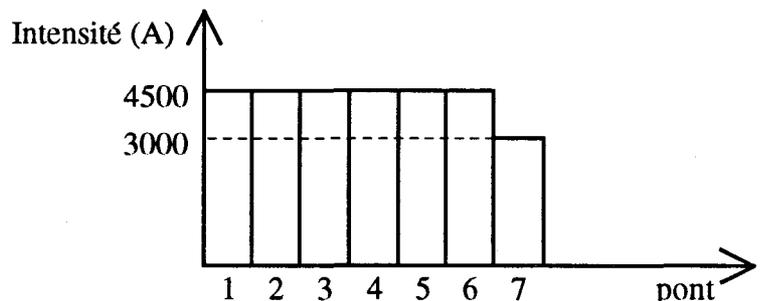
- τ_i : le taux déposé par le pont d'anode i (g/m²)
- η_i : le rendement du pont i
- I_i : le courant débité par le redresseur i sur le pont i (A)
- V : la vitesse de la ligne (m/min)
- K : constante liée à la loi de Faraday
- L : largeur de la bande (mm)

Le bilan est fait pour la longueur située sous le dernier pont débitant du courant afin de déterminer l'intensité nécessaire pour compléter le dépôt d'étain. Le courant global est distribué suivant les ponts disponibles de la façon suivante: les n-1 premiers régulateurs nécessaires débitent au maximum autorisé par l'opérateur et l'appoint est fait sur le n-ième régulateur.

Exemple : $I_G = 30000A$ et l'intensité maximale autorisée est 4500A par pont.

La répartition du courant se fera de la façon suivante:

$$I_G = 6 \times 4500A + 3000A$$



III/ 1.2. Boucle lente :

La fonction de cette boucle de régulation est de prendre en compte les mesures que donne la jauge. L'utilisation de ces données ne peut être faite dans la boucle précédente. En effet, de part sa position reculée (cf. figure I.7), la jauge lit le revêtement déposé sur la bande avec un certain retard incompatible avec le suivi intermédiaire de la bande.

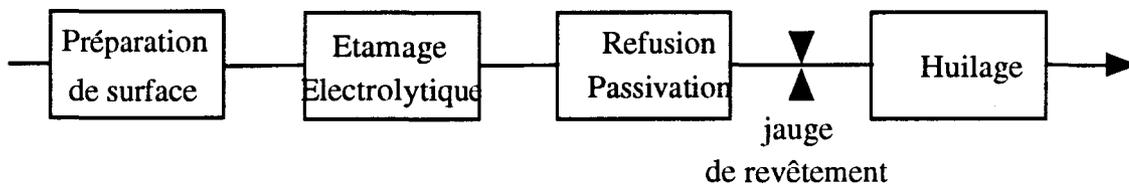


Figure I.7 : Partie centrale de la ligne d'étamage.

A chaque acquisition d'une mesure moyenne sur toute la largeur de la bande par la jauge, le programme calcule, en tenant compte de la distance de transfert, l'écart entre cette valeur moyenne et la consigne en déterminant un coefficient correcteur appelé « rendement jauge » qui corrige les rendements théoriques du dépôt d'étain sous chaque pont.

III/ 2. PERFORMANCES :

Les taux garantis aux clients en tous points de la bande sont compris entre -15% et +20% par rapport au taux visé.

Le tableau figure I.8 présente les capacités statistiques de la ligne (de Janvier à Septembre 95) pour les deux fourchettes étudiées : [-15%;+20%] (fourchettes actuelles) et [-10%;+10%] (objectif à atteindre).

Ces résultats sont calculés à partir des mesures faites par la jauge tout au long des bobines.

Taux (g/m ²)	Face Supérieure					Face Inférieure				
	1.2	1.6	2.2	2.4	3	2	2.2	3	3.5	4.4
[-15%;+20%]	0.92	1.35	1.64	1.58	1.82	1.95	1.85	2.22	2.83	2.97
[-10%;+10%]	0.4	0.61	0.67	0.76	0.9	0.73	0.74	1.09	1.33	1.42

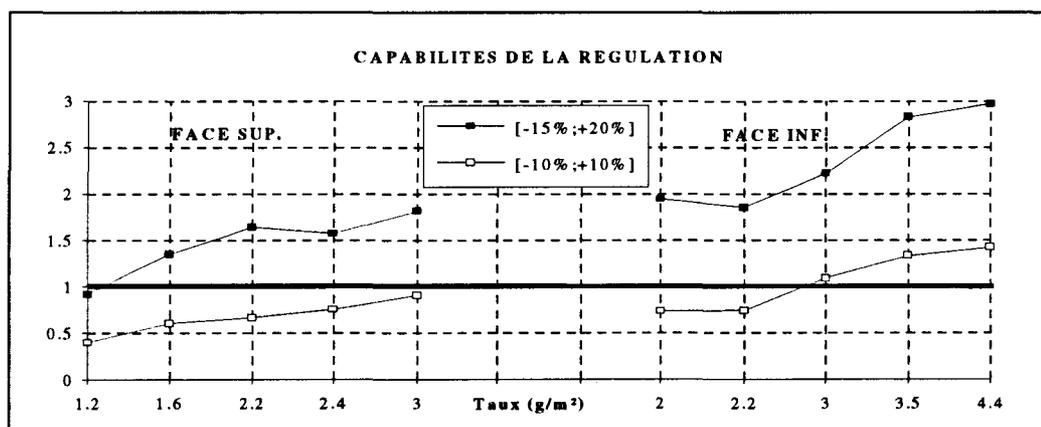


Figure I.8 : Capabilités de la ligne d'étamage

La conclusion est que la ligne est "capable" dans les conditions actuelles de latitude pour tous les revêtements supérieurs à 1.2 g/m².

Par contre les limites sont largement dépassées si l'on considère un intervalle plus resserré. Comme la tendance de la clientèle est au revêtement de plus en plus fin et de plus en plus régulier, la précision du dépôt d'étain se doit d'être encore plus performante afin de ne pas dépasser plus ou moins 10% du taux visé.

Pour parvenir à améliorer le processus il faut déterminer les causes qui engendrent des irrégularités de revêtement, et notamment les défauts de la régulation.

III/ 3. DÉFAUTS :

Pour trouver les points à améliorer, il faut regarder plus précisément le comportement de la régulation lors des phases transitoires de fonctionnement, car si la marche en régime permanent donne une régularité correcte du revêtement le long de la bande, c'est surtout lors des changements de vitesse ou les changements de taux que les écarts s'accroissent.

En ce qui concerne les défauts inhérents aux changements de taux, le problème sera étudié au chapitre IV car il s'agit d'un problème lié à la connaissance des rendements. Les deux points abordés ici se rapportent à la réaction de la régulation face à une accélération d'une part, et d'autre part aux limites causées par la commande des redresseurs. Seules les causes sont expliquées, les solutions seront apportées au fur et à mesure dans les chapitres suivants.

III/ 3.1. Réaction théorique de la régulation face à une accélération :

La régulation actuelle fait un traitement tous les 4m de bande environ. Elle calcule le courant à appliquer et le communique à l'organe de régulation des générateurs via un répartiteur.

Lors d'une accélération constante, la consigne théorique du courant devrait évoluer suivant une droite proportionnelle à l'accélération (au variations de rendement près) suivant la relation (I.2). Or la consigne réelle, elle, n'évolue que tous les 4m de bande sans tenir compte de la continuité du changement de vitesse (figure I.9).

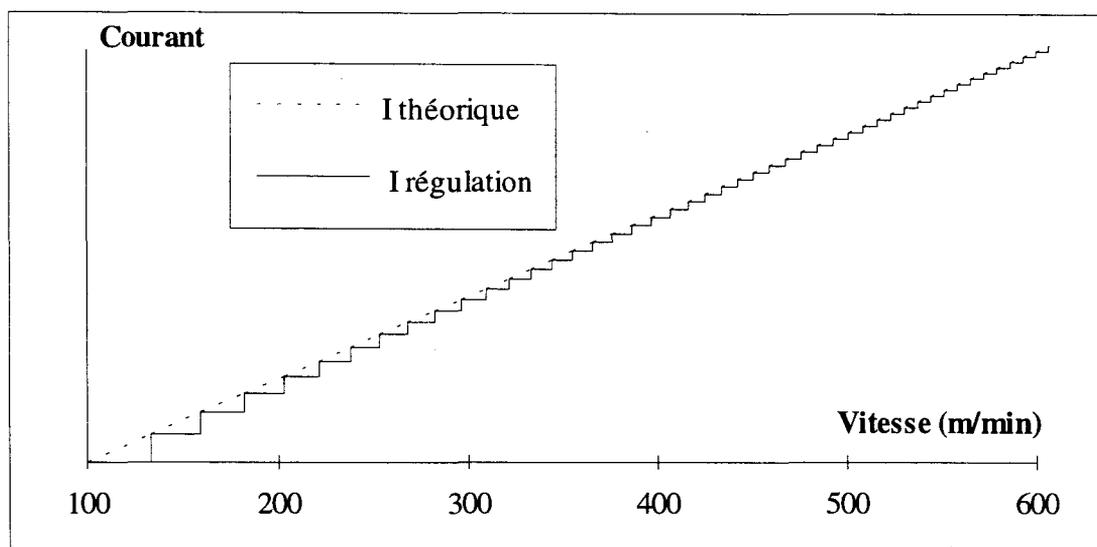


Figure I.9 : Evolutions théorique et réelle du courant lors d'une accélération de 100 à 600 m/min

La régulation ne peut pas faire face au manque de courant engendré par l'échantillonnage de la régulation, écart qui est tout d'abord important, et qui diminue progressivement jusqu'à devenir très faible, sans toutefois pouvoir s'annuler tant que continue l'accélération.

La répercussion de cette erreur se retrouve en terme de dépôt sur la bande suivant la répartition montrée par la figure I.10.

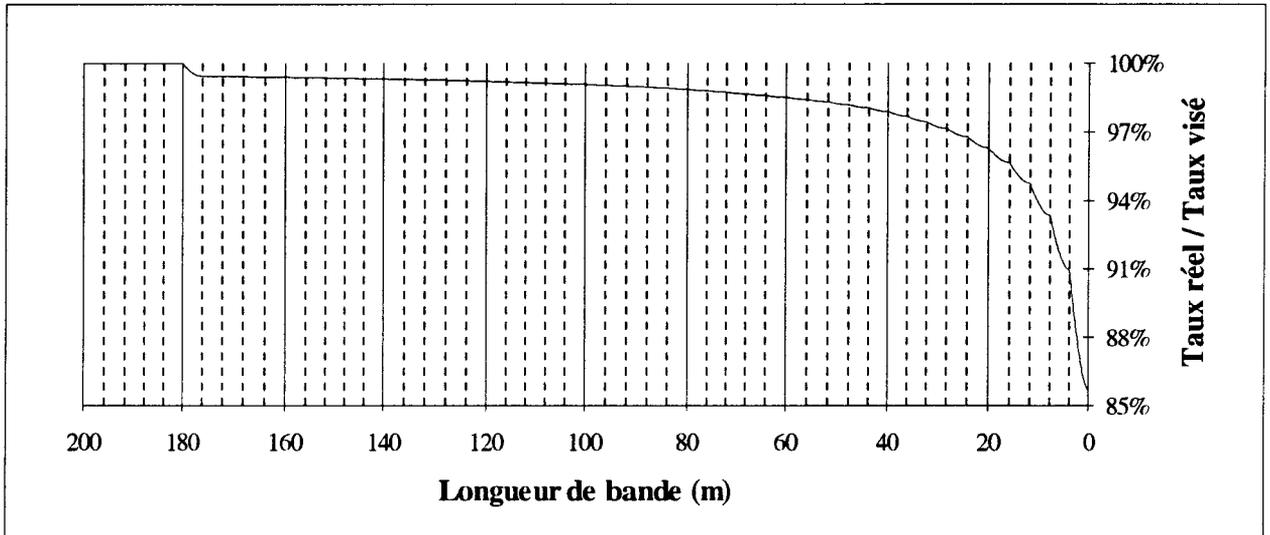


Figure I.10 : Évolution du revêtement de chaque incrément lors d'une accélération

Bien que cette irrégularité intrinsèque à la régulation diminue vite par rapport à d'autres défauts (inférieure à 3% pour une vitesse initiale supérieure à 250m/mn) elle est réelle durant toutes les phases transitoires de vitesse (la dualité existe lors des ralentissements).

III/ 3.2. Commande des redresseurs :

La technique de répartition du courant nécessaire pour déposer sur la bande la quantité d'étain voulue consiste à appliquer une référence maximale (réglable pour respecter les densités de courant acceptables) sur les n-1 premiers ponts utiles et de réguler le complément sur le dernier pont (figure I.11).

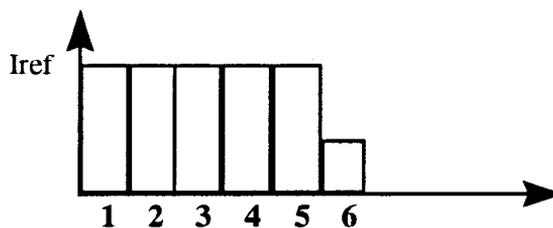


Figure I.11 : Répartition du courant sur les ponts

La particularité de cette méthode est que l'intensité du dernier pont peut varier en théorie de 0 à I_{ref} . Or, si l'on regarde figure I.12, l'allure du courant débité par un redresseur en fonction de l'intensité de consigne, on remarque qu'il y a une non linéarité dans le fonctionnement de celui-ci. En effet, pour une consigne inférieure à un courant d'enclenchement I_{enc} de l'ordre de 500A, le courant débité est nul.

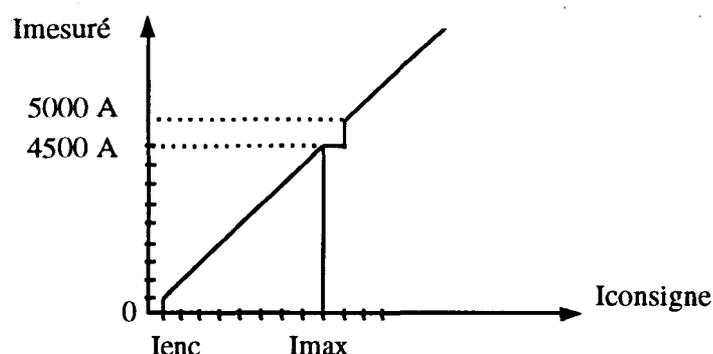


Figure I.12 : Courant débité par un redresseur en fonction de la consigne

Cette non linéarité dans le fonctionnement provoque pour certaines configurations de la ligne un pompage du dernier redresseur qui s'enclenche et se déclenche à chaque pas de la régulation, ce qui crée des irrégularités dans le dépôt le long de la bande. L'exemple suivant explique en détail le phénomène.

Exemple de pompage : Considérons le fonctionnement suivant : Le courant maximum à appliquer sur les redresseurs est de 4500 A, et le courant total nécessaire au dépôt est de 9300 A.

Étape 1 : La répartition du courant se fait, normalement, sur les ponts 1, 2 et 3 de la façon suivante :

Pont	1	2	3
Intensité de consigne	4500	4500	300
Intensité réelle mesurée	4500	4500	0

L'intensité de consigne du redresseur 3 étant inférieure à l'intensité d'enclenchement, le courant réellement débité par le pont 3 sera nulle, le redresseur 3 ne s'enclenche pas.

Étape 2 : le dépôt sur la bande est inférieur au dépôt visé puisque le courant total débité n'est que de 9000 A au lieu de 9300 A. La réaction de la régulation face à cela est donc d'augmenter le courant de consigne total à, par exemple 9800A, afin de rétablir la situation. La répartition est alors :

Pont	1	2	3
Intensité de consigne	4500	4500	800
Intensité réelle mesurée	4500	4500	800

Le courant de consigne sur le pont 3 est supérieur au courant d'enclenchement, le redresseur 3 s'enclenche, et le courant mesuré est équivalent à sa consigne.

Étape 3 : Le courant total débité est de 9800 A, ce qui est supérieur au courant initial devant donné le taux visé (9300 A). Cela se traduit sur la bande par un sur étamage. Pour corriger cet excès, la régulation va réagir en diminuant le courant total nécessaire qui va revenir à 9300 A. On est revenu à l'étape 1, le redresseur 3 qui venait de s'enclencher va se couper.

Cette alternance d'enclenchement et d'arrêt d'un redresseur est appelé pompage du pont.

IV/ PRÉSENTATION DE LA JAUGE DE REVÊTEMENT

La jauge de mesure présentée dans cette partie est une jauge DMC, installée en 1997 en remplacement de l'ancienne moins performante.

IV/ 1. IMPLANTATION DU MATÉRIEL :

La dénomination de jauge comprend en fait deux éléments distincts : d'une part la jauge ligne qui est l'instrument de lecture en temps réel du taux d'étain déposé sur la bande, et d'autre part une jauge fixe, appelée jauge « labo », située à côté de la ligne de production. L'intérêt de la présence de ces deux instruments est expliqué maintenant.

IV/ 1.1. Jauge en ligne :

Elle est située avant la zone d'huilage pour ne pas perturber la mesure par la présence d'huile sur le produit, et sa position après refusion permet une lecture la plus proche possible du produit fini. La jauge fait des allers et retours ininterrompus sur toute la largeur de la bande pendant la période de mesures.

L'ensemble de l'installation relative à la jauge ligne est composé de :

- ✓ Deux têtes de mesure (une par face de bande sup. / inf.).
- ✓ Un chariot de déplacement qui supporte les têtes de lecture.
- ✓ Deux supports d'échantillons fixes (un support par face).
- ✓ Un écran de contrôle sur ligne.
- ✓ Un écran de contrôle en cabine d'inspection (avec clavier et souris).
- ✓ Un groupe réfrigérant pour la régulation en température des têtes de mesure.
- ✓ Une mesure instantanée de chaque face avec visualisation métrique de la position de la tête sur la bande.

IV/ 1.2. Jauge «LABO» :

Elle est implantée en dessous du poste d'inspection sortie ligne.

Elle se compose de :

- ✓ Une tête de mesure fixe (mesure d'une seule face).
- ✓ Un groupe réfrigérant.
- ✓ Un écran de contrôle de la mesure avec armoire process.

IV/ 2. PRINCIPE PHYSIQUE DE LA MESURE :

IV/ 2.1. Description de la tête de mesure :

Le dispositif de mesure est composé d'un générateur de rayons X et d'un détecteur dont la forme du faisceau est rectangulaire [LES-96]. La surface du faisceau qui atteint la bande est un rectangle de 30mm×45mm (figure I.13).

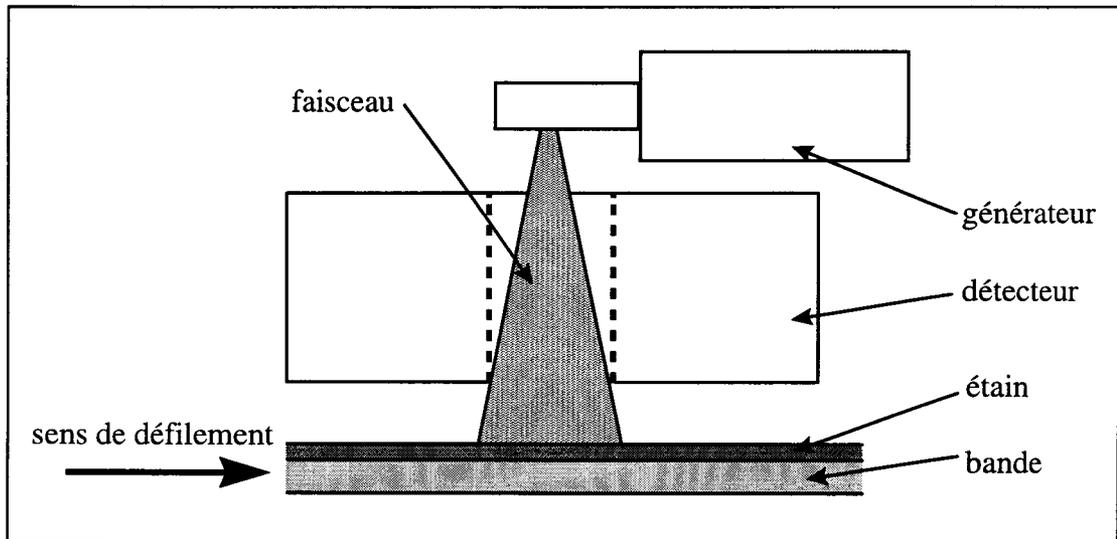


Figure I.13 : Coupe transversale du dispositif de mesure

IV/ 2.2. Principe de la mesure :

Le faisceau primaire, après avoir traversé la couche d'étain, atteint le substrat. Le faisceau doit être assez puissant pour exciter un électron de la couche K de l'atome atteint qui se libère. Pour le remplacer, un électron de la couche L libère de l'énergie sous forme de rayonnement X (figure I.14).

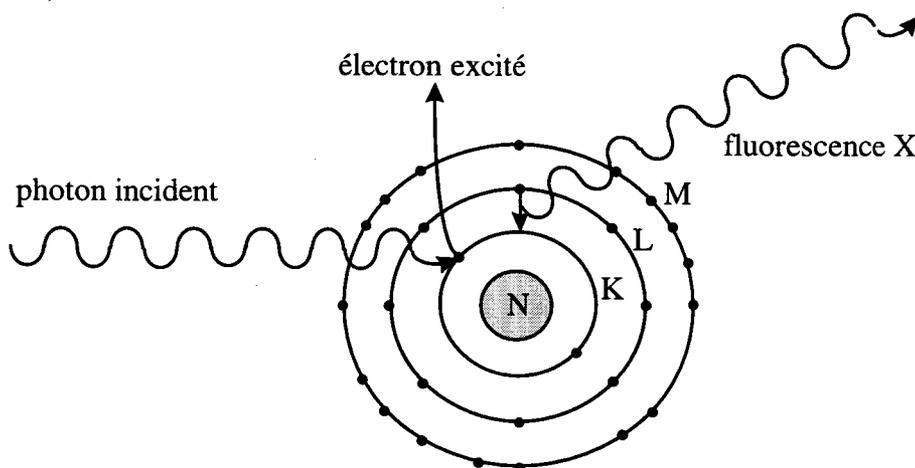


Figure I.14 : Principe de la fluorescence X

Cette ionisation émet un rayonnement caractéristique qui est mesurée par le détecteur de la tête de lecture de la jauge (figure I.15).

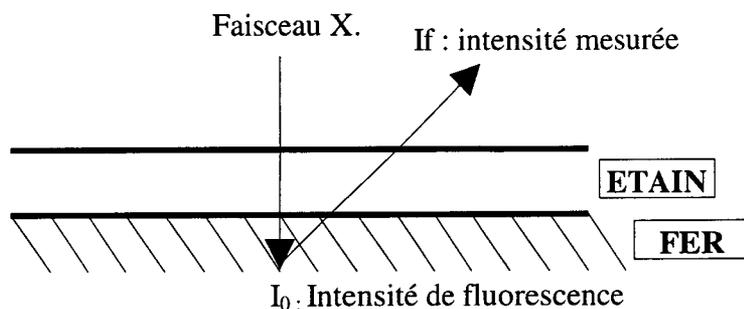


Figure I.15 : Mesure du signal non absorbé

Le faisceau renvoyé correspond au faisceau émis par fluorescence sous l'effet de la source moins l'absorption causée par la couche d'étain. Cette différence causée par l'absorption, est convertie en terme de taux d'étain présent sur la surface du faisceau.

En théorie, l'absorption du rayonnement est une fonction exponentielle de l'épaisseur d'étain traversée du type :

$$I_f = I_0 \cdot e^{-u \cdot t}$$

avec u le coefficient d'absorption de l'étain et t l'épaisseur traversée.

En pratique pour l'étalonnage de la jauge, cette fonction est estimée par un polynôme du cinquième degré.

IV/ 2.3. Fonctionnement du balayage et des cellules :

Pour le premier balayage (figure I.16), la tête de mesure sort de sa position garage, se positionne au milieu de la largeur de la bande et commence son déplacement sur un demi profil afin de repérer l'extrémité de la bande. A cet endroit elle repart dans l'autre sens jusqu'à la détection de l'autre bord. Une fois les positions limites acquises, le balayage commence de façon régulière à la vitesse de 100 mm/s.

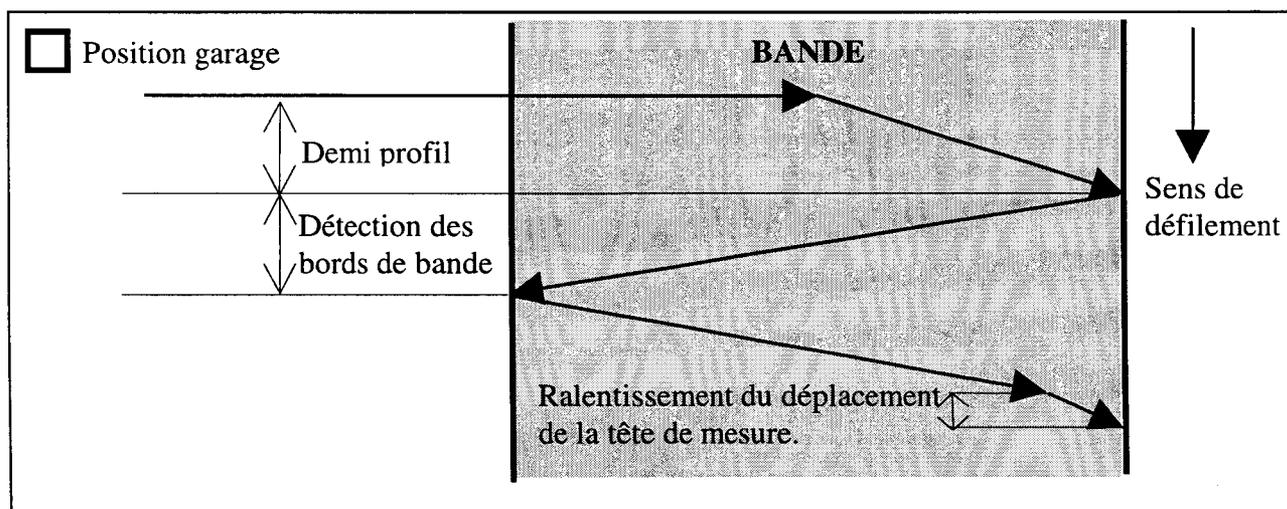


Figure I.16 : Phase de premier balayage (après relance de la jauge ou tarage)

La mesure est opérationnelle durant les phases d'aller et retour des têtes. Une mesure est effectuée tous les 10 mm, et à la fin d'un balayage, le profil complet de la bande est envoyé au calculateur ainsi que sur l'écran de contrôle.

Remarque : Une mesure étant effectuée tous les 10 mm, et le faisceau faisant 30 mm de large, il y a un phénomène de recouvrement des mesures.

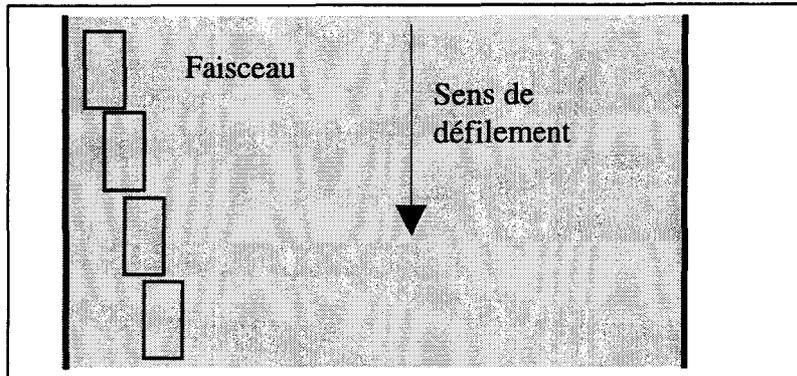


Figure I.17 : Recouvrement des mesures

IV/ 2.4. Exemple d'un balayage :

La figure I.18 montre un exemple d'un profil de la bande tel qu'il est présenté dans la cabine de contrôle de la ligne d'étamage pour un taux visé de 1 g/m² sur la face supérieure et 2,8 g/m² pour la face inférieure.

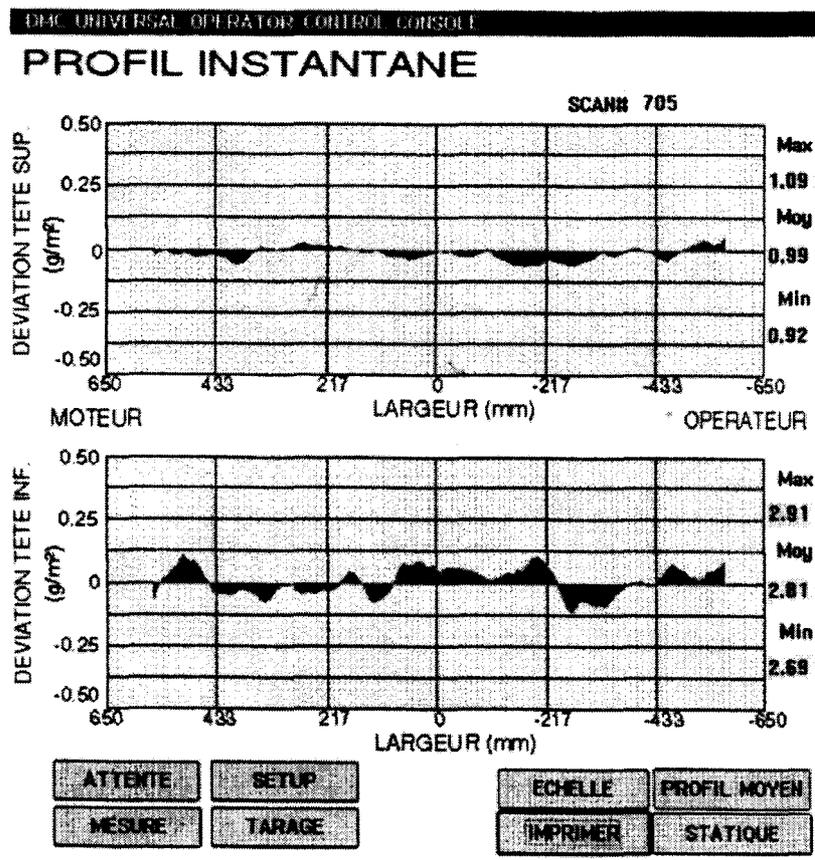


Figure I.18 : Profil instantané de la bande vu par la jauge

CHAPITRE II :

ÉTUDE D'UNE CELLULE D'ÉLECTRODÉPOSITION

I/ RÉPARTITION DU COURANT SUR LA BANDE

I/ 1. INTRODUCTION :

La régularité du dépôt d'étain, de part sa morphologie et sa quantité, est fortement liée à la répartition du courant sur la bande. Le but de cette étude est de montrer l'évolution de cette répartition du fait des facteurs influents de l'environnement, que ce soit vis à vis du produit ou du processus d'électrodéposition.

Les différents paramètres explorés sont :

- ✓ Influence de l'épaisseur de la bande.
- ✓ Influence de la résistivité de l'électrolyte.
- ✓ Influence de la distance anode-bande.
- ✓ Influence du niveau d'électrolyte.
- ✓ Influence d'une déformation non uniforme des anodes.

Tous ces paramètres sont amenés à évoluer au cours du fonctionnement de la ligne, soit par obligation, soit par dérive naturelle, ou encore à cause de phénomènes cinétiques propres à la structure de la ligne.

La répartition primaire du courant le long de la bande est estimée en décomposant le système présenté Fig.1 en tranches élémentaires dz :

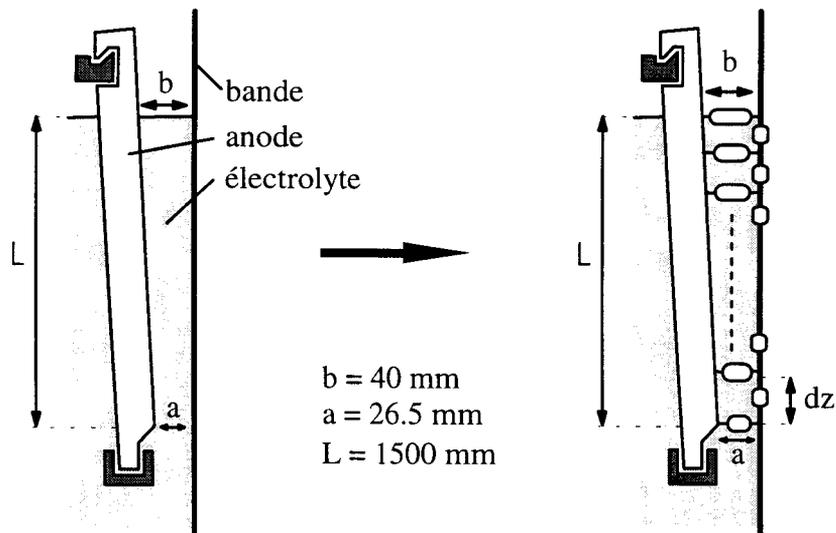


Figure II.1: Décomposition du système.

Cette étude est basée sur les hypothèses suivantes [VAN-80] :

- ✓ Le processus d'étamage est stationnaire
- ✓ Les anodes et l'électrolyte sont de compositions homogènes
- ✓ Les anodes forment une surface équipotentielle.
- ✓ Les résistances de transfert de masse ainsi que les dégagements gazeux

sont négligés.

Dans toutes les courbes présentées, les courants élémentaires sont ramenés à leur pourcentage par rapport au courant élémentaire moyen.

I/ 2. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA BANDE :

La gamme des produits étamés sur ligne s'étend de 0.15 mm à 0.4 mm. L'épaisseur de tôle la plus courante pour le produit DWI est de 0.25 mm, mais le développement du DWI « ultra light » oriente l'étamage vers des bandes d'épaisseurs inférieures ou égales à 0.20 mm.

L'inclinaison des anodes étant calculée de façon à compenser la chute ohmique dans la bande qui est une fonction directe de son épaisseur, on comprend mieux l'intérêt d'évaluer la distribution du courant en fonction de l'épaisseur du produit.

La Figure II.2 présente une simulation de la répartition primaire du courant sur trois bandes dont les épaisseurs sont successivement de 0.17 mm, 0.25 mm, et 0.4 mm. La résistivité de l'électrolyte pour les calculs est ici de 80 Ohm.mm et les distances de l'entrefer sont celles de la ligne: 26.5 mm en pied d'anode et 40 mm en tête.

En abscisse de cette courbe, comme pour toutes les suivantes, est indiquée la distance depuis le pied de l'anode jusqu'à la surface de l'électrolyte.

On remarque que pour une épaisseur de 0.25 mm, qui est le cas le plus fréquent sur la ligne, la répartition est bien équilibrée autour de la moyenne. La courbe est légèrement incurvée, laissant apparaître un léger excès en pied et en tête, formant un delta maximum de 11%.

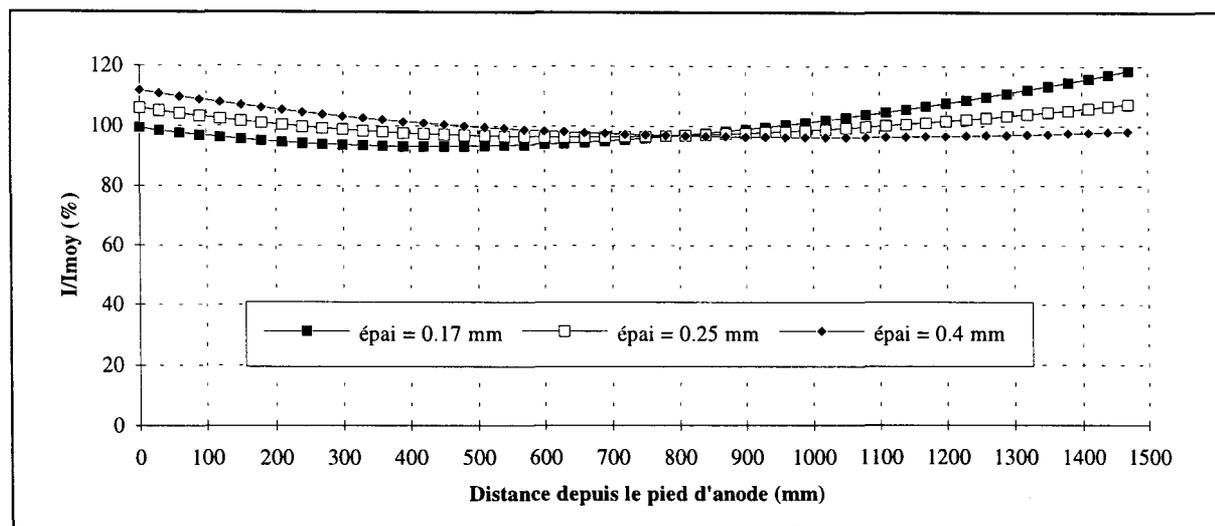


Figure II.2: Répartition du courant en fonction de l'épaisseur de la bande.

Si l'on observe la répartition pour une forte épaisseur de bande (0.4 mm), la courbe est légèrement inclinée avec des intensités plus importantes vers le pied de l'anode. L'allure générale est plus linéaire, le delta maximum est ici de 17 %, toutefois la différence avec l'épaisseur de 0.25mm n'est pas critique.

Par contre le profil de répartition évolue plus fortement si l'épaisseur diminue. En effet, pour une épaisseur de 0.17 mm on observe une asymétrie plus importante vers la tête d'anode avec un écart maximum de 25 % entre l'intensité élémentaire minimale et l'intensité élémentaire maximale. De plus, les intensités plus élevées entraînent une usure plus forte des anodes en tête.

Les valeurs optimales de gap en fonction de l'épaisseur de la bande sont données dans le tableau suivant. La référence de base est la distance de l'entrefer au niveau du pied de l'anode, qui, pour des raisons pratiques reste fixe. En effet, un rapprochement des pieds augmenterait le risque de frottements de celles ci sur la bande au moment des manipulations. Les calculs ont donc été effectués sur une modification de la distance des têtes d'anodes.

Épaisseur (mm)	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
Gap Tête (mm)	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5
Gap Pied (mm)	49	48	47	46	45	44	43	42	42	41	40

Figure II.3 : Distance optimale de la tête d'anode en fonction de l'épaisseur de la bande.

Ces valeurs sont données à titre indicatif, mais toute configuration parallèle à celles citées donnera des résultats comparables au niveau de la répartition du courant, seule la résistance globale du pont sera modifiée comme cela sera démontré plus loin.

I/ 3. INFLUENCE DE LA RÉSISTIVITÉ DE L'ÉLECTROLYTE :

La Figure II.4 montre l'évolution de la répartition du courant pour quatre résistivités différentes : 50, 80, 110, 170 Ohm.mm. L'épaisseur de la bande est de 0.25 mm pour les quatre cas.

On observe tout d'abord que pour l'intervalle [80;110] Ohm.mm qui est, d'après plusieurs relevés d'échantillons de l'électrolyte, l'intervalle moyen d'utilisation, la répartition est bien symétrique autour de la moyenne, l'écart maximum variant de 11% à 15%.

Si la résistivité de l'électrolyte tend à augmenter (170 Ohm.mm), la conséquence est une linéarisation de la répartition mais de façon déséquilibrée. La compensation de la chute ohmique n'est plus optimale, au détriment des zones où le volume d'électrolyte est le plus important entre les électrodes (tête d'anodes). Toutefois, l'écart maximum entre les intensités reste raisonnable (21%).

Au contraire, pour un électrolyte peu résistif (50 Ohm.mm), le phénomène s'inverse mais dans des proportions plus fortes (29%). L'évolution est beaucoup plus incurvée, notamment en tête d'anode dont l'usure sera plus forte qu'en pied.

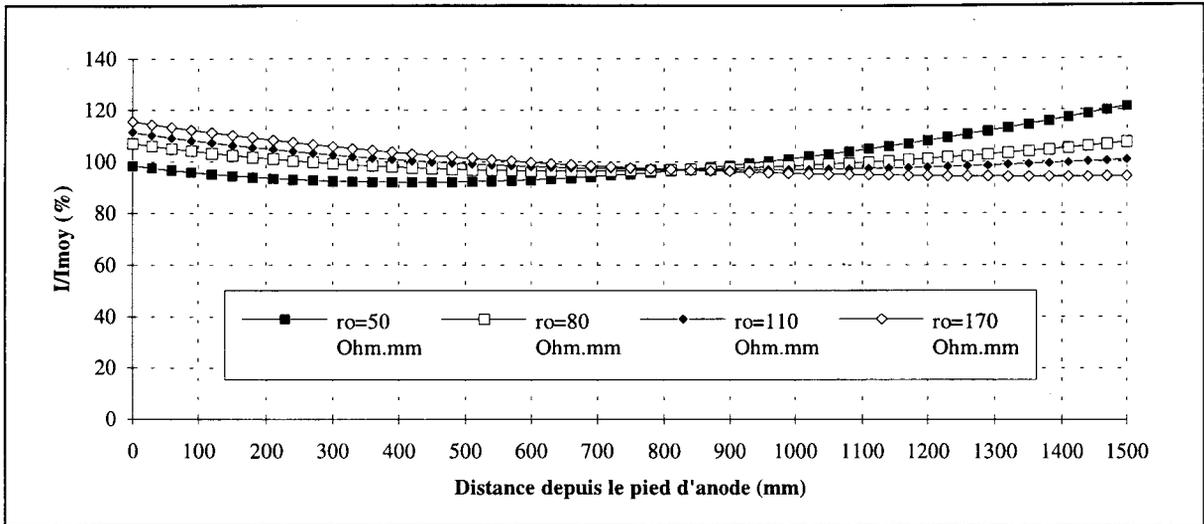


Figure II.4 : Répartition du courant en fonction de la résistivité de l'électrolyte.

On constate bien par ces quatre exemples l'influence de la résistivité de l'électrolyte dans le comportement électrique. La résistivité du bain étant conditionnée par sa composition (étain stanneux, acidité, boues, etc.), il est important de suivre les fourchettes de concentrations.

I/ 4. INFLUENCE DE LA DISTANCE ANODE-BANDE :

La simulation est présentée pour une bande de 0.25 mm d'épaisseur et une résistivité de 80 Ohm.mm. Le seul paramètre qui évolue est le gap, distance entre les anodes et la bande. Dans la configuration normale, cet intervalle est de 40 mm en tête d'anode et de 26.5 mm en pied. Trois autres simulations sont réalisées en éloignant tour à tour le pied puis la tête des anodes de 20 mm, et pour la dernière par translation de l'anode entière de 20 mm.

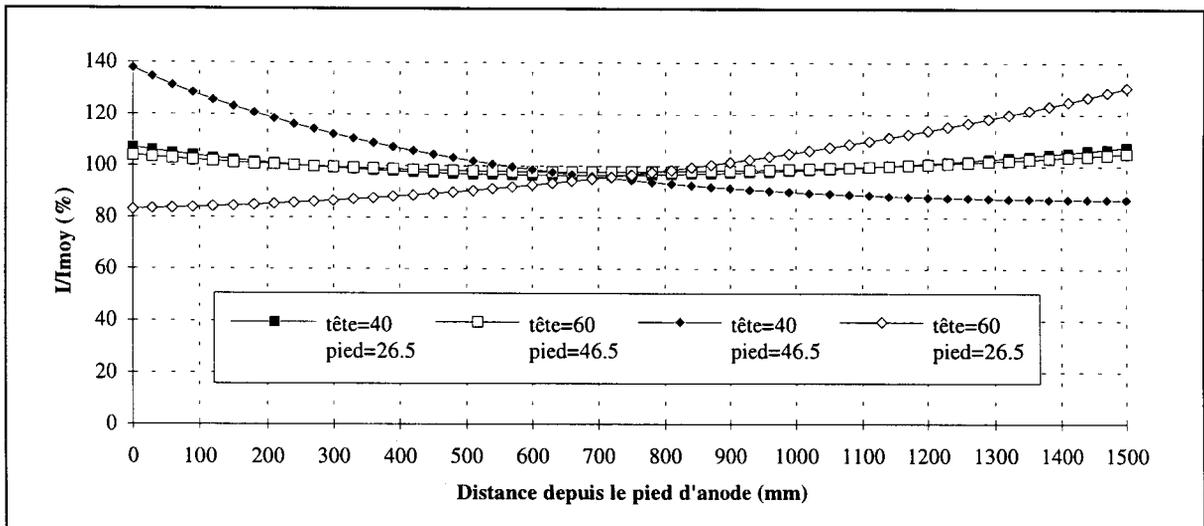


Figure II.5 : Répartition du courant en fonction de la distance anode-bande.

La Figure II.5 confirme le résultat intuitif de l'influence de la position de l'anode face à la bande. Un décalage de 20 mm de la tête ou du pied des anodes par rapport à la bande entraîne immédiatement une modification très nette de la répartition du courant et donc à long terme une

usure asymétrique des anodes. Les écarts maximum d'intensité peuvent aller jusqu'à 50%, ce qui peut entraîner des différences d'aspect des grains d'étain.

Par contre, une variation uniforme de la distance anode-bande ne joue que très faiblement sur cette répartition. En effet, si l'on compare la position 40/26.5 qui correspond aux distances d'anodes neuves et la position 60/46.5 qui correspond aux distances d'anodes usées, les deux répartitions restent très voisines (ce qui n'implique pas que les courants en jeu soient identiques).

Il est d'ores et déjà possible de conclure que l'usure des anodes ne jouera que sur la résistance de pont et donc sur la consommation d'énergie par effet Joule mais n'influera pas sur la qualité du dépôt.

I/ 5. INFLUENCE DU NIVEAU D'ÉLECTROLYTE :

Pour les bandes de grandes largeurs (>1100 mm), l'entraînement de l'électrolyte dû aux vitesses élevées de la ligne est non négligeable et diminue la hauteur du bain entre les électrodes (cf Figure II.6).

Ce déficit peut atteindre 30 cm sur la passe descendante pour des vitesses de 600 m/min. Cette hauteur n'est qu'une approximation car des mesures précises sont très difficiles à mettre en œuvre du fait du faible espacement entre les anodes et la bande d'une part, des nombreux remous associés aux vitesses élevées d'autre part, et enfin à cause de l'épaisseur de mousse présente à la surface de l'électrolyte qui gêne la visibilité.

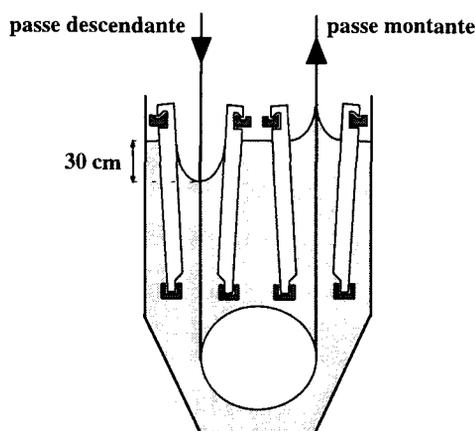


Figure II.6 : Effet hydrodynamique dans une cellule.

Toutefois, ce phénomène implique qu'une partie des anodes situées sur les passes descendantes, côté têtes, ne participe pas au processus d'électrodéposition et crée de nombreux inconvénients qui seront expliqués ultérieurement.

Pour l'étude présente, il s'agit uniquement de modéliser l'effet de cette baisse du niveau de l'électrolyte sur la répartition du courant sur la bande.

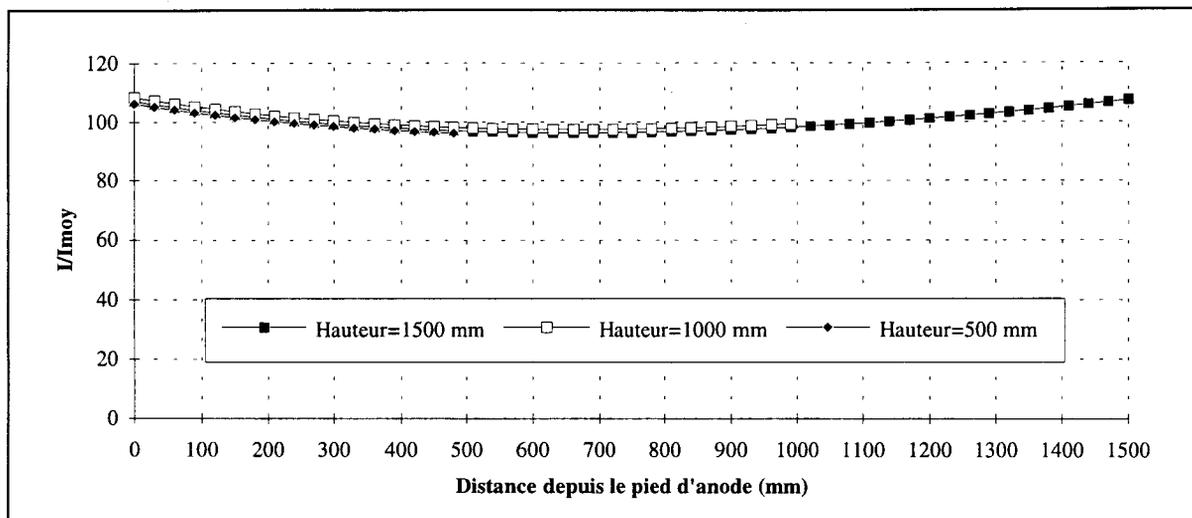


Figure II.7 : Répartition du courant en fonction du niveau d'électrolyte.

La Figure II.7 indique que la répartition relative du courant reste pratiquement identique quelle que soit la hauteur du bain.

La courbure ne change pas et les écarts maximum sont faibles. En effet, dans ce cas, où seule la hauteur du bain est modifiée, les paramètres qui conditionnent les résistances élémentaires restent invariants dans toute la zone immergée. De ce fait, on observe une répartition identique jusqu'à la surface de l'électrolyte qui délimite l'arrêt de la surface active.

Remarque : Ici encore il n'est tenu compte que des courants élémentaires relatifs I/I_{moy} . Il est clair que si cette répartition reste identique, il n'en n'est pas de même de la densité de courant sur la bande qui, elle, dépend directement de la surface immergée et donc du niveau d'électrolyte.

I/ 6. INFLUENCE D'UNE USURE IRRÉGULIÈRE DES ANODES :

Les trois simulations de ce paragraphe retracent l'évolution de la répartition du courant dans le cas d'une usure non uniforme des anodes.

En effet, dans le cas des vitesses élevées, comme il a été vu précédemment, l'entraînement d'électrolyte pour les grandes largeurs de bande entraîne une baisse du niveau du bain entre les anodes (cf. figure II.6).

Si l'on considère que la ligne conserve une vitesse élevée durant plusieurs heures sans changer de format les anodes ne s'useront donc pas sur leur zone émergée.

En cas de ralentissement de la ligne, ou de changement de largeur, l'électrolyte retrouve son niveau initial, et la bande fait alors face à un pont d'anode dont l'usure longitudinale n'est pas uniforme comme le montre la figure II.8.

Les trois cas étudiés montrent l'évolution de la répartition du courant pour une usure normale des anodes ainsi que pour une usure non uniforme dont le décrochement se situe à 1125 mm du pied des anodes, ce qui correspond à une baisse de 375 mm du niveau de l'électrolyte .

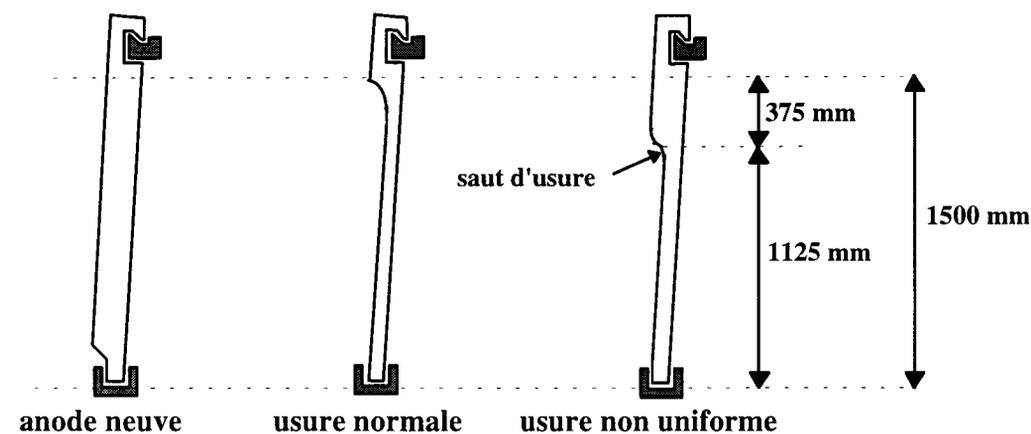


Figure II.8 : Aspects des anodes suivant le type d'usures de la simulation.

Cette hauteur, choisie arbitrairement découle des observations faites sur la ligne qui montrent des différences d'usures de 300 mm entre les ponts situés en passes montantes et ceux situés en passes descendantes.

Les trois sauts d'usure simulés sont de 5 mm, 10 mm et 20 mm, ce qui correspond approximativement à des temps de fonctionnement de 5, 10 , et 20 heures. Ces temps sont cohérents avec la marche normale de la ligne de production qui tourne de façon continue, les campagnes pour un produit donné pouvant dépasser la durée d'un poste (8 heures).

L'observation de ces configurations (Figures II.9 ; II.10 ; et II.11) montre que le décrochement de l'usure de l'anode conditionne la répartition du courant de façon proportionnelle à la non uniformité.

Ces variations atteignent des écarts de :

- ✓ 23% pour un saut d'usure de 5 mm
- ✓ 34% pour un saut d'usure de 10 mm
- ✓ 48% pour un saut d'usure de 20 mm.

Ce qui reste dans des tolérances acceptables pour un faible décrochement (5 mm) peut par contre engendrer des problèmes dans les autres cas.

En effet, dans le cas d'un saut d'usure de 20 mm la répartition du courant, et par là même, la densité de courant sur la bande varie pratiquement du simple au double. De telles modifications peuvent provoquer des irrégularités dans la constitution des grains d'étain qui sont directement dépendants de la densité de courant.

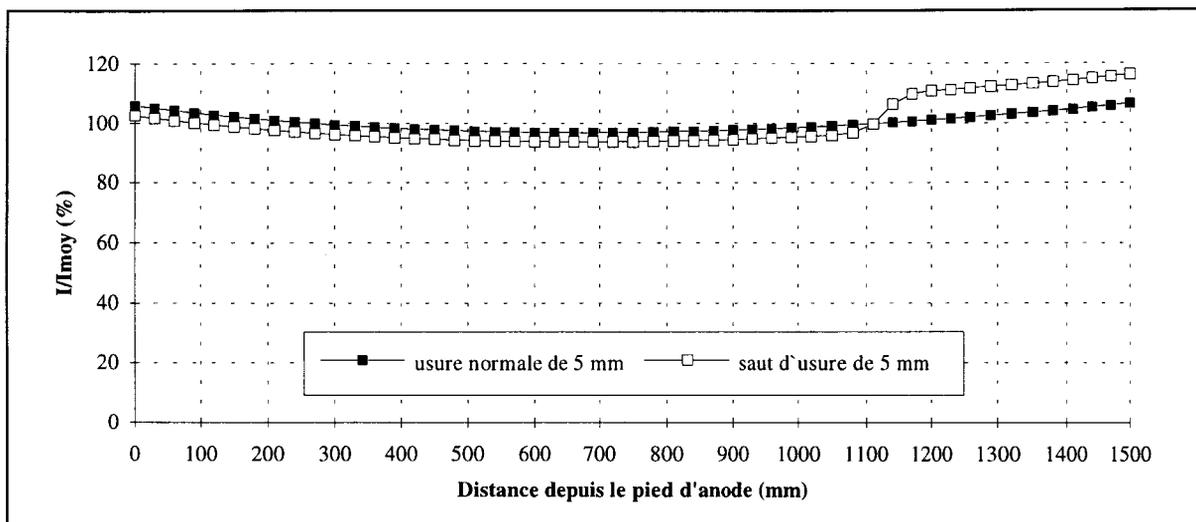


Figure II.9: Répartition du courant face à un saut d'usure de 5 mm.

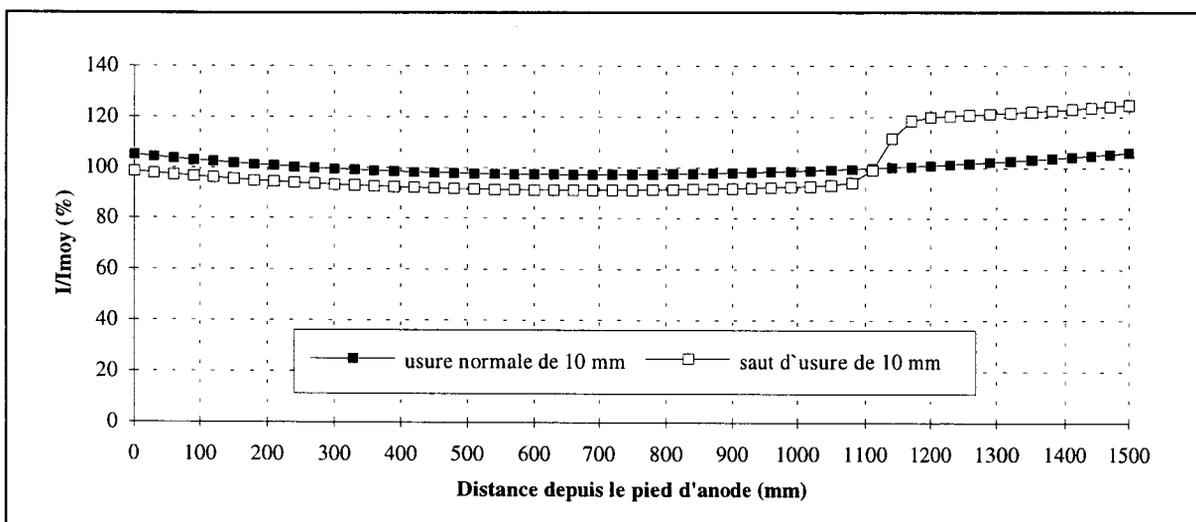


Figure II.10 : Répartition du courant face à un saut d'usure de 10 mm.

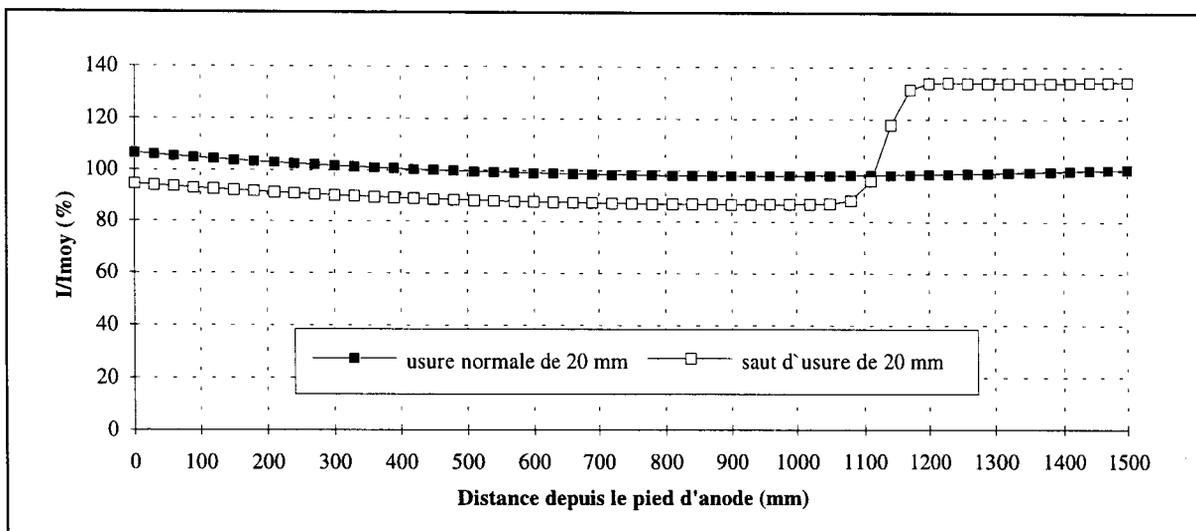


Figure II.11 : Répartition du courant face à un saut d'usure de 20 mm.

I/7. CONCLUSIONS :

Cette étude montre les fluctuations possibles au niveau de la répartition primaire du courant sur la bande, en fonction de tous les paramètres influents pouvant évoluer sur la ligne.

Les écarts maxima des courants élémentaires qui résultent des variations prises en exemple sont résumés dans le tableau suivant, par ordre décroissant d'importance.

	Distance Anode-Bande	Déformation non uniforme	Résistivité électrolyte	Épaisseur
Delta max en %	7 à 51	12 à 48	11 à 29	11 à 25

Les conséquences de ces variations sont de deux ordres:

- Tout d'abord les variations relativement faibles des courants élémentaires. S'il y a déséquilibre dans la répartition du courant vers le pied ou vers la tête des anodes, cela provoque une usure plus forte de celles-ci, proportionnellement à l'augmentation du courant . Cette usure non uniforme va tendre à long terme vers un retour à une répartition correcte, mais le programme de calcul d'usure des anodes peut sous estimer dans ce cas l'état réel d'usure des anodes.

- Lors d'une modification nette de l'entrefer ou lors d'un saut d'usure important sur les anodes, des différences importantes apparaissent dans les courants élémentaires. La structure des grains d'étain étant directement liée à la densité de courant, leur régularité peut en être affectée, d'où l'importance de rester au centre de la zone de bon étamage (définie par les fourchettes de concentrations, densité et température) afin d'être le moins sensible possible aux fluctuations.

Pour le premier problème présenté, le verrouillage des supports d'anodes mis en place doit éviter les variations inopinées du gap au cours des manipulations, et une vérification régulière dans le cadre des opérations de maintenance tend à éviter ces décalages.

En ce qui concerne les déformations non uniformes des anodes, la solution serait de limiter des effets hydrodynamiques dans la cellule afin d'éviter qu'une partie de l'anode ne soit découverte trop longtemps.

Pour ce qui est de l'évolution de la résistivité, le respect des fourchettes autorisées des concentrations relatives à l'électrolyte (acidité, étain, fer, boues, etc...) ainsi que de celles des additifs et de la température suffit à éviter des fluctuations trop importantes de la résistivité.

Enfin, l'influence de l'épaisseur de la bande reste mineure pour l'instant mais si elle devait diminuer encore il serait intéressant de revoir les distances entre la bande et les têtes d'anodes afin de rééquilibrer la courbe de répartition primaire du courant.

II/ MODÉLISATION DE L'EFFET DE SATURATION DES REDRESSEURS

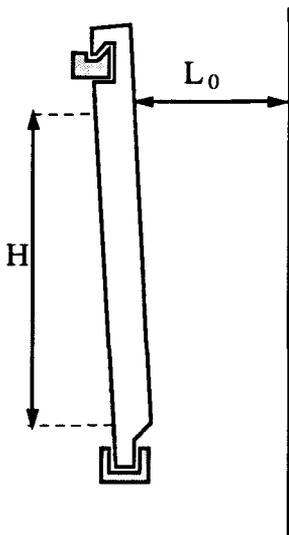
II/ 1. ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE DE PONT :

L'étude précédente avait pour but de simuler l'évolution de la répartition primaire du courant sur la bande autour de sa valeur moyenne. Il s'agit ici de déterminer le courant moyen débité par un redresseur au cours du temps lorsque sa consigne reste invariante. Pour y parvenir l'étude porte sur l'évolution de la résistance de plusieurs ponts au cours d'une période de huit heures.

D'un point de vue théorique, la résistance totale du pont est fonction de la résistance des jeux de barres qui amènent le courant, de la résistance des anodes, de la conductivité de l'électrolyte, du volume dans le gap, et du format de la bande. Dans le contexte des essais réalisés, et au vu de la résistivité très faible du cuivre, la résistance induite par les jeux de barres est négligée :

$$R_{\text{pont}} = R_{\text{anode}} + R_{\text{électrolyte}} + R_{\text{bande}} \quad (\text{II.1})$$

L'évolution de la résistance de l'électrolyte est directement fonction de l'usure des anodes. En effet, comme le montre le schéma suivant, cette usure modifie le gap et donc le volume d'électrolyte entre la bande et les anodes.



Comme d'une part : $R_{\text{électrolyte}} = \rho_{\text{électrolyte}} \cdot \frac{L(t)}{H \cdot l}$ (II.2)

avec l la largeur du pont d'anodes,

et d'autre part, en accord avec la loi de Faraday :

$$L(t) = L_0 + \frac{A \cdot I \cdot t}{96500 \cdot n \cdot H \cdot l \cdot \rho_{\text{étain}}} \quad (\text{II.3})$$

il vient que $R_{\text{électrolyte}}$ est une fonction linéaire du temps.

Le comportement théorique de la résistance totale du pont doit être également linéaire en fonction du temps.

II/ 1.1. Description des essais :

L'essai présenté a pour but de suivre l'évolution réelle de la résistance des ponts de la ligne d'étamage en fonction de l'usure des anodes. Cette évolution est obtenue en recueillant sur la ligne la tension et l'intensité débitées par chacun des redresseurs, et l'usure des anodes donnée par le calculateur.

Onze points de mesures ont été relevés sur une durée de huit heures. Pour des raisons évidentes d'interprétation des résultats, les paramètres maîtrisables de l'étamage sont restés à peu près constants tout au long de cet essai :

- ✓ Vitesse comprise entre 510 et 550 m/mn
- ✓ Revêtement 2.0/1.8 g/m²
- ✓ Largeur de bande 1197 mm
- ✓ Épaisseur 0.253 mm.

Les 16 ponts étudiés sont les ponts : 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 36, disposés sur la ligne selon le schéma suivant :

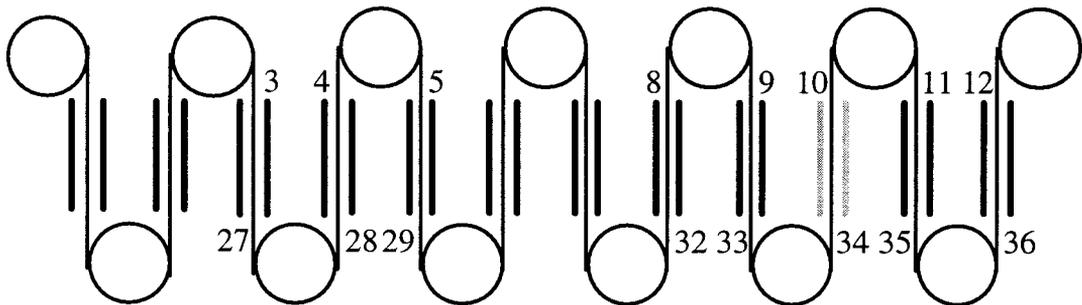


Figure II.12 : Emplacement des ponts étudiés.

Tous les ponts sont parallèles à la bande. Les ponts n°10 et n°34 sont équipés d'anodes insolubles. Les passes impaires sont appelées par la suite passes descendantes et les passes paires passes montantes. Les résultats obtenus sont présentés sous deux formes graphiques : Soit la résistance des ponts en fonction de l'usure des anodes, soit la résistance des ponts en fonction du temps écoulé.

II/ 1.2. Interprétation des résultats :

II/ 1.2.1. Allure Générale :

Les deux graphiques présentés ci après (Figures II.13 et II.14) montrent l'évolution de la résistance de chaque pont étudié en fonction de l'usure de ses anodes. L'allure générale des courbes tend à respecter la théorie qui veut que l'évolution de la résistance soit linéaire en fonction du temps.

Les évolutions les plus caractéristiques concernent évidemment les ponts qui ont vu leurs anodes renouvelées au cours de l'essai. La résistance chute alors en moyenne de 2 milli-ohms (ponts n°3,5,33,28).

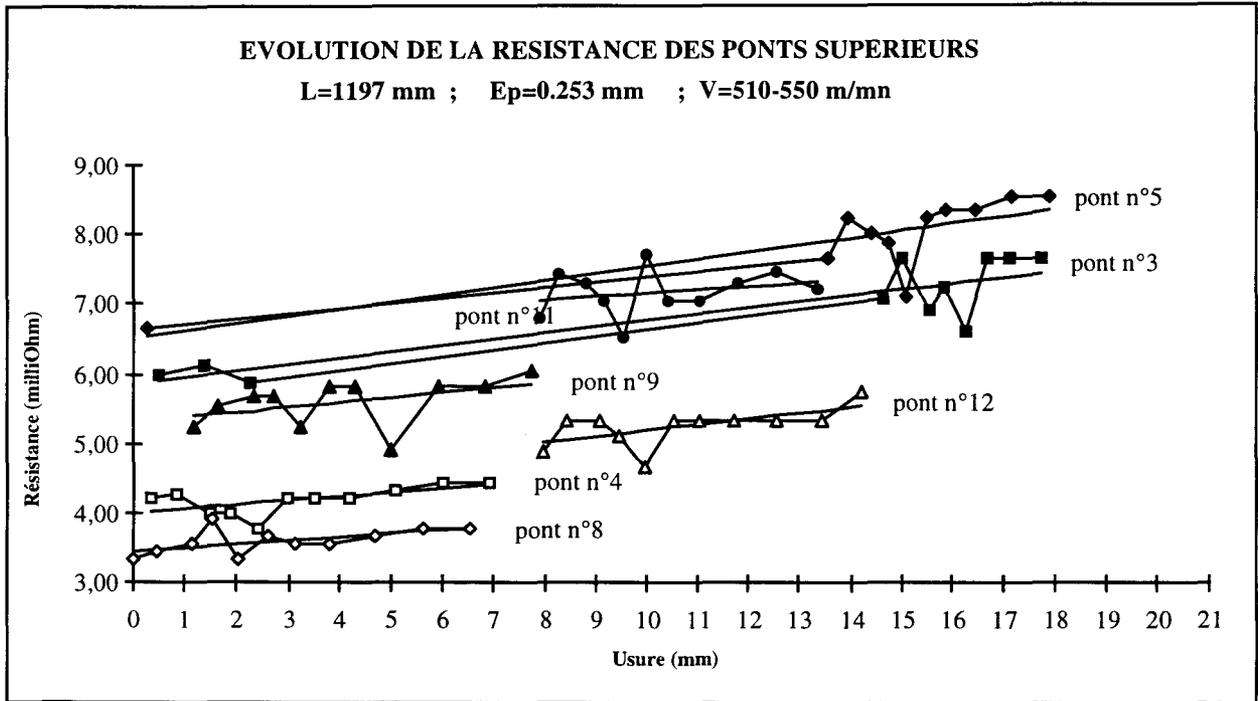


Figure II.13 : Évolution de la résistance des ponts de la face supérieure.

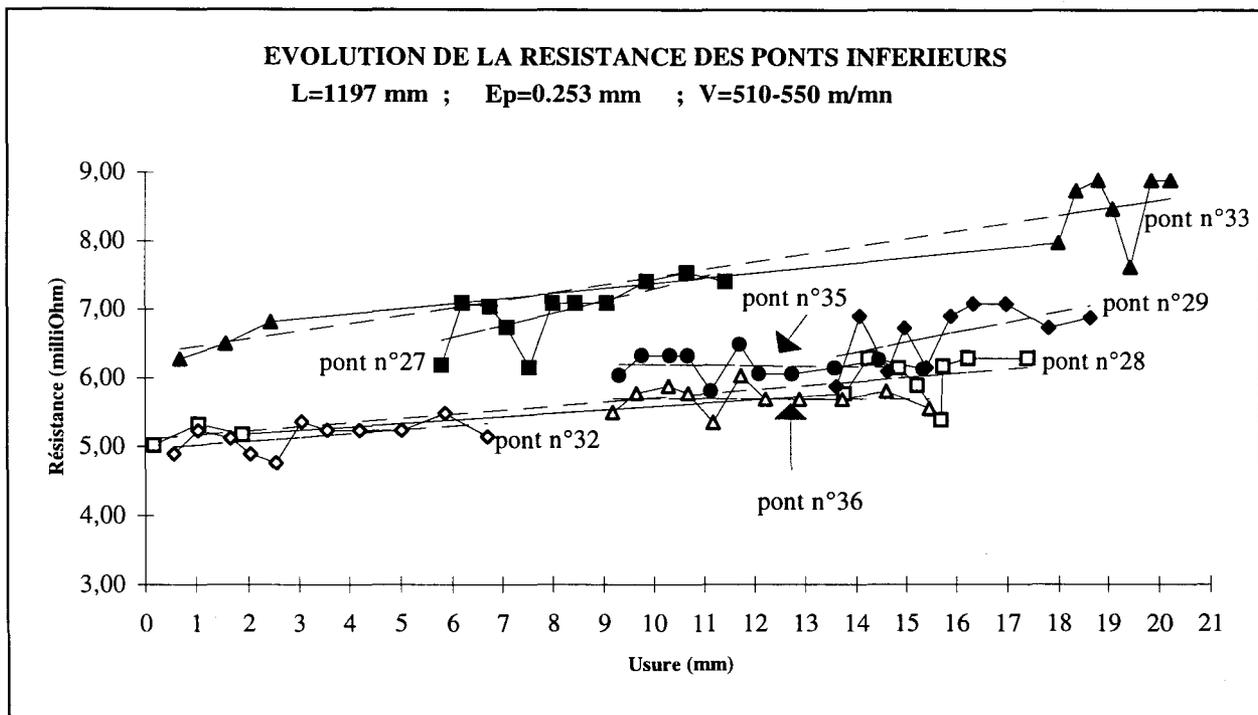


Figure II.14 : Évolution de la résistance des ponts de la face inférieure.

II/ 1.2.2. Emplacement du pont :

On voit nettement sur les courbes suivantes (Figures II.15 et II.16) que, quelle que soit l'usure des anodes, les ponts situés sur une passe descendante par rapport à la bande ont une résistance supérieure à ceux qui sont en face d'une passe montante de la bande ce qui confirme l'influence des entraînements d'électrolytes occasionnés par des phénomènes hydrodynamiques qui créent une baisse du niveau dans les passes descendantes. En effet, le volume d'électrolyte entre les électrodes d'une passe descendante tendant à diminuer, la surface S d'électrolyte en contact avec les électrodes diminue, donc sa résistance augmente ($R = \rho \cdot \frac{l}{S}$).

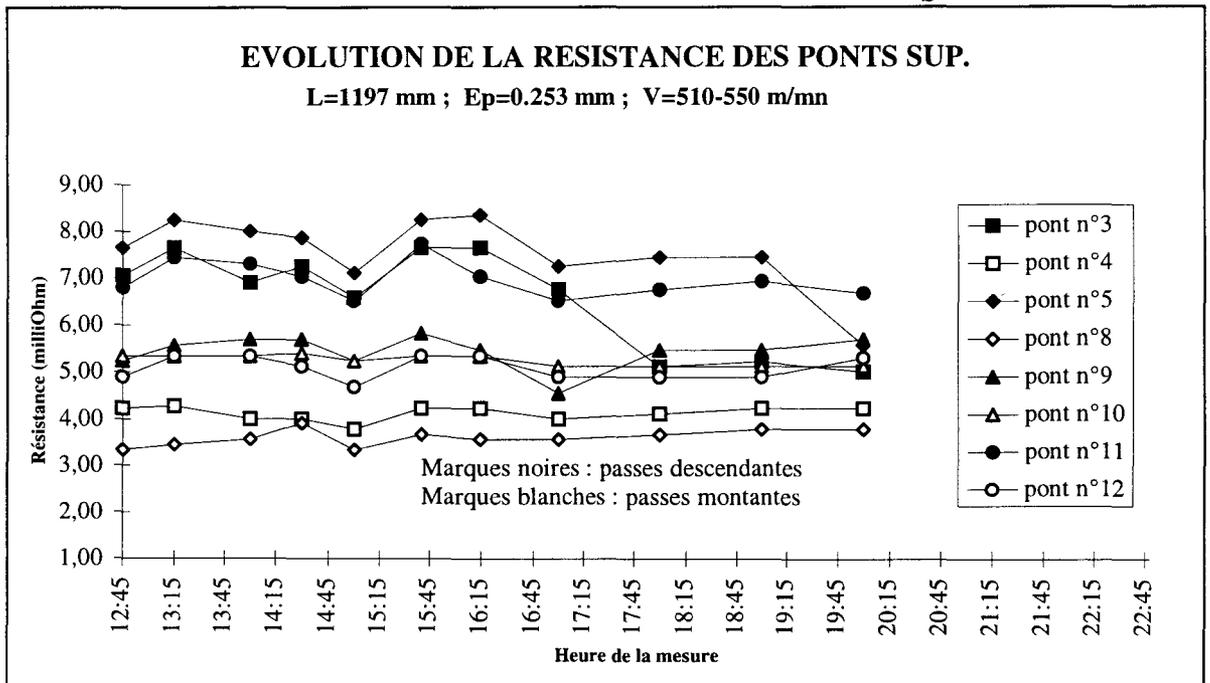


Figure II.15 : Évolution de la résistance des redresseurs face sup. en fonction du temps

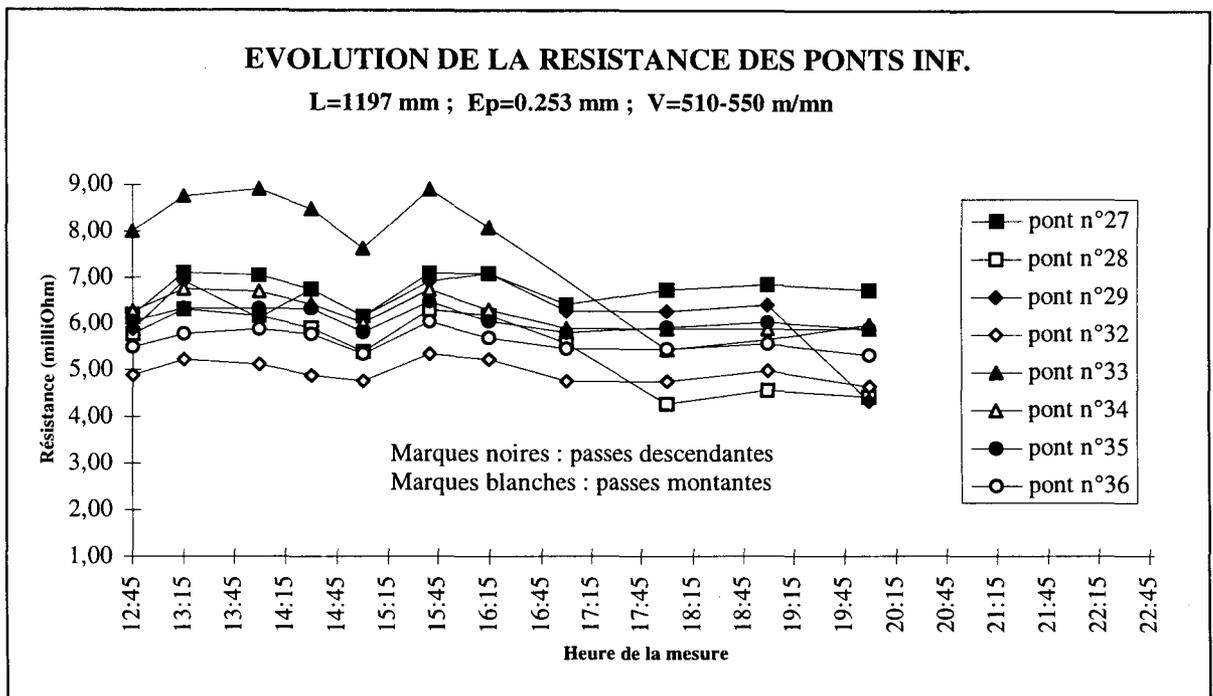


Figure II.16 : Évolution de la résistance des redresseurs face inf. en fonction du temps

Par contre, les écarts de résistances entre les ponts issus d'une même géométrie de passe s'explique par les capacités maximales des redresseurs qui varient légèrement d'un cas à l'autre, mais dépendent surtout de l'état initial des ponts d'anodes qui n'avaient pas tous le même degré d'usure au début de l'essai.

II/ 1.2.3. Influence du redresseur situé en vis à vis :

On peut remarquer également sur les courbes de la Figure II.17 que l'arrêt d'un pont provoque une diminution de la résistance du pont situé en face de celui-ci (pont en vis à vis). C'est ainsi que la huitième mesure du pont n°9 (à 17h00), qui aurait pu être pris pour un point aberrant par la faiblesse de la résistance mesurée par rapport aux valeurs précédentes et suivantes, n'est en fait que le résultat de l'arrêt simultané du pont n°33 qui est le vis à vis du pont n°9.

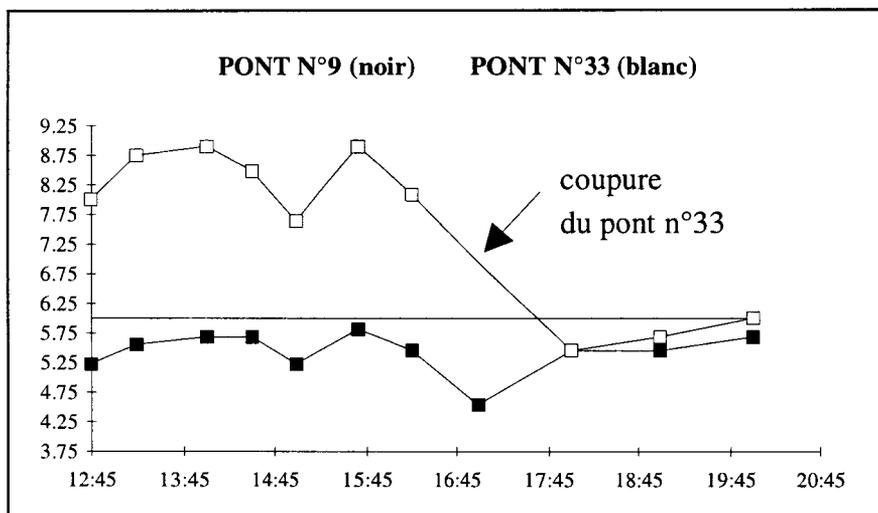


Figure II.17 : Effet de l'arrêt d'un pont sur son vis à vis.

En effet, lorsque les deux redresseurs fonctionnent on peut considérer qu'ils se partagent l'épaisseur de la bande pour véhiculer le courant. La résistance de bande vue par chacun des redresseurs est :

$$R_{\text{bande}} = \rho_{\text{acier}} \cdot \frac{\text{Longueur bande}}{\text{largeur bande} \times \frac{\text{épaisseur bande}}{2}} \quad (\text{II.4})$$

Par contre, lorsqu'un redresseur fonctionne seul il dispose de deux fois plus de surface cathodique conductrice et la résistance de bande vue par le seul redresseur en fonctionnement devient :

$$R_{\text{bande}} = \rho_{\text{acier}} \cdot \frac{\text{Longueur bande}}{\text{largeur bande} \times \text{épaisseur bande}} \quad (\text{II.5})$$

III/ 1.2.4. Effet de saturation des redresseurs :

Dans une configuration stable de fonctionnement, au fur et à mesure de l'usure des anodes, la résistance totale du pont augmente. La consigne en courant des redresseurs étant constante, la tension du redresseur augmente (loi d'Ohm).

Une fois la tension maximale atteinte (en général 24 à 26V) si la résistance continue d'augmenter, c'est la courant débité qui chute. Ce phénomène, observé couramment sur la ligne, est appelé saturation.

Exemple : Il y a début de saturation d'un redresseur pour une résistance égale ou supérieure à 6 milli-Ohms. Les mesures montrent que tous les redresseurs qui ont leurs ponts respectifs sur une passe descendante de la bande sont saturés en face inférieure (ponts n°27, 29, 33, 35) et pour la face supérieure, dès que l'usure des anodes dépasse 8 mm les ponts situés sur une passe descendante de la bande ont leur redresseur saturé (ponts n°3, 5, 11).

Ce phénomène, provoque une instabilité du courant débité. Le tableau de la Figure II.18 montre l'écart type des mesures de résistance de chaque pont.

Pont n°	3	4	5	8	9	10	11	12	27	28	29	32	33	34	35	36
Écart type	0.43	0.21	0.44	0.18	0.20	0.12	0.39	0.25	0.35	0.34	0.41	0.23	0.50	0.31	0.24	0.23

Figure II.18 : Écarts types sur les mesures de résistance des ponts.

Les valeurs en gras correspondent aux ponts saturés. Tous les ponts en saturation ont des écarts types plus importants que les autres. Ceci indique que les tensions et les courants débités par les redresseurs saturés sont moins stables que ceux débités par les redresseurs non saturés. En pratique, la tension reste stable, bloquée à sa valeur maximale, et c'est la mesure de l'intensité qui varie d'un delta de 300 A.

Si, comme dans cet exemple, la moitié des redresseurs utilisés débitent un courant oscillant avec une amplitude de 300A environ par pont, la régulation ne peut assurer que tous les point de la bande reçoivent exactement la même quantité de courant et donc le même revêtement. Il est donc fort possible qu'il y ait un impact sur la régularité longitudinale du dépôt sur la bande.

L'autre inconvénient provoqué par cette saturation est une perte de capacité en courant de la ligne. En effet, si un redresseur sature, il ne peut plus débiter le courant de consigne demandé mais un courant inférieur. Le déficit ainsi créé réduit la capacité totale de la ligne.

Bien que la plupart des produits fabriqués ne nécessitent pas la totalité de la puissance disponible, le graphique de la Figure II.19 montre que dans certaines configurations, cette perte peut atteindre des proportions importantes (près de 30%) pour les grandes vitesses (les pourcentages exprimés sont le reflet du fonctionnement de la ligne sur une période de trois mois).

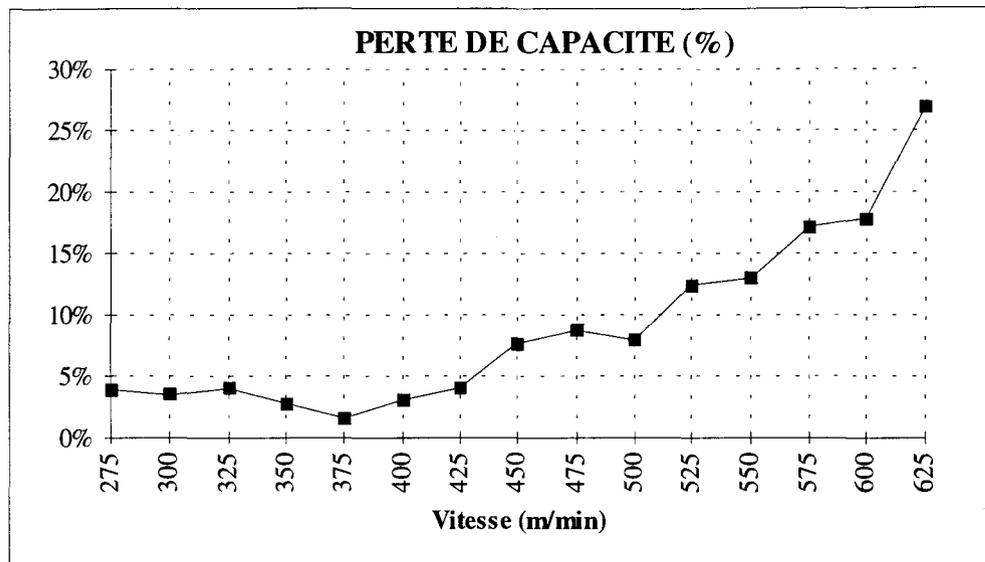


Figure II.19 : Estimation de la perte de capacité due à la saturation des redresseurs.

De plus, même si le courant disponible reste suffisant pour le produit demandé, la consommation électrique dépensée en phase de saturation est supérieure à celle d'un fonctionnement normal des redresseurs. En effet, la résistance de pont augmentant avec l'usure des anodes, la tension des redresseurs suit cette évolution afin de conserver le courant débité constant ($U=R.I$). La puissance électrique consommée étant le produit de l'intensité par le courant ($P=U.I$), elle augmente proportionnellement à l'augmentation de la tension.

III/ 1.3. Conclusions :

La résistance des ponts est bien une fonction croissante de l'usure des anodes. Son évolution suit la théorie. Cependant cette augmentation débouche sur une saturation en tension des redresseurs qui provoque une instabilité du courant débité d'une amplitude de l'ordre de 300A.

Cette saturation provoque en outre une diminution de la capacité totale en courant de la ligne et par là même, une surconsommation électrique.

Toutefois, dans le cadre d'une modélisation ultérieure de la saturation, il faut noter plusieurs facteurs perturbants et non négligeables qui favorisent la saturation des redresseurs :

- ✓ L'effet de la vitesse qui provoque des phénomènes hydrodynamiques d'entraînement d'électrolyte et de fluctuation des surfaces d'anodes actives.
- ✓ La position des ponts, qui, suivant qu'ils sont situés en passes montantes ou en passes descendantes, accentue l'effet de la vitesse.
- ✓ L'utilisation ou non du pont situé en vis à vis du pont étudié.
- ✓ L'usure des anodes qui est le premier facteur de modification du gap.

D'autres paramètres ont été ignorés volontairement au vu des conditions de l'essai, comme l'évolution de l'électrolyte, ou le format (épaisseur - largeur) de la bande.

II/ 2. MODÉLISATION DE LA SATURATION DES REDRESSEURS :

II/ 2.1. Introduction :

Cette étude présente le comportement des ponts sur dix semaines. Son but est de mettre en évidence, de quantifier, puis de modéliser le phénomène de saturation des redresseurs qui survient lors de certaines configurations de la ligne d'étamage.

En effet, comme il l'a déjà été montré précédemment, la vitesse rapide de la ligne provoque au delà d'un certain seuil un effet hydrodynamique qui tend à diminuer le niveau d'électrolyte dans les bacs. Ce phénomène engendre une augmentation de la résistance de pont puis la saturation en tension des redresseurs, et donc une chute de l'intensité débitée.

Les principaux inconvénients de cette saturation sont:

- ✓ une mauvaise régularité de l'intensité débitée (variations de 300 A)
- ✓ une baisse de la capacité en courant de la ligne
- ✓ une augmentation de la puissance consommée par la ligne.
- ✓ une usure non uniforme des anodes dont la surface en contact avec l'électrolyte devient fonction de la vitesse, ce qui peut entraîner des modifications locales de la distribution du courant et donc de la densité sur la bande lors des changements de vitesses (conséquences sur la régularité et l'aspect du revêtement).

Remarque : A vitesse constante, la chute d'intensité due à la saturation ne provoque pas de défauts d'aspects du dépôt car la baisse du niveau d'électrolyte entraîne une diminution de la surface d'étamage et maintient la densité de courant à peu près constante (cette observation n'a pas été quantifiée de façon expérimentale car une mesure des hauteurs de bains dans les cellules est difficile à mettre en oeuvre).

Les résultats de l'étude de l'évolution de la résistance de pont au cours du temps ont dégagé les principaux paramètres à prendre en compte. Dans un premier temps, la modélisation portera sur l'influence de la position des redresseurs, de la vitesse, de l'usure des anodes. Ensuite viendra l'influence du fonctionnement du pont en vis à vis et du format de la bande.

II/ 2.2. Description de la saturation :

Les conditions de configuration de ligne retenues pour la construction de ces courbes sont, pour chaque redresseur :

- la vitesse est constante durant tout le passage de la bobine
- le redresseur situé en vis à vis de celui étudié est en service.
- le redresseur étudié n'est pas le dernier en service (n'est pas celui qui régule)

Pour chaque redresseur, on trace les graphes :

- Intensité =f(vitesse) avec des anodes neuves ou d'usure inférieure à 3 mm
- Intensité =f(vitesse) avec des anodes usées de plus de 18 mm

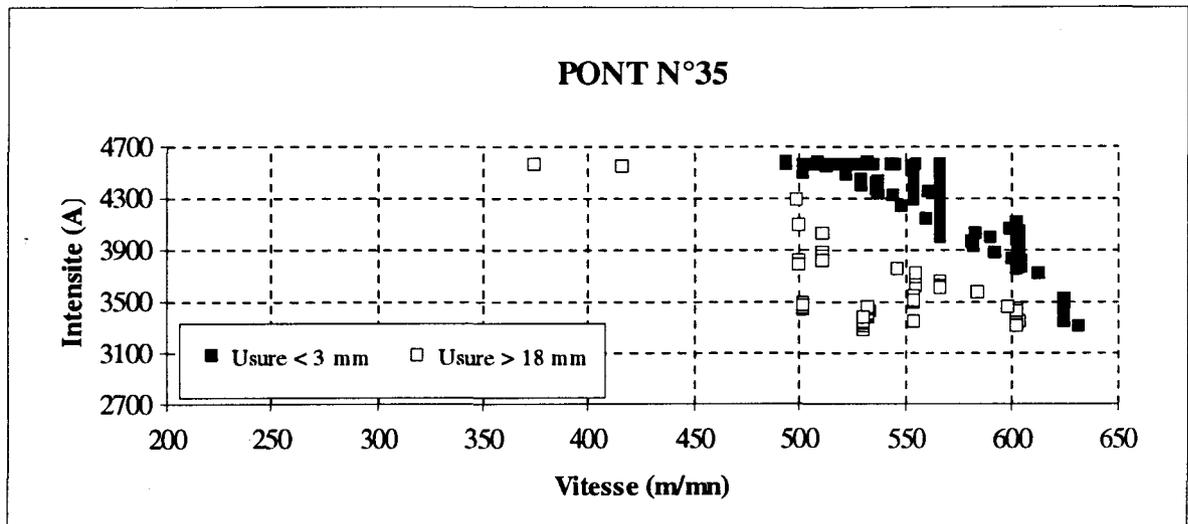


Figure II.20: Évolution de l'intensité d'un redresseur

L'exemple montré avec le pont n°35 est pleinement représentatif du comportement général. Le comportement en fonction de la vitesse peut d'ores et déjà être considéré comme linéaire dans la zone de saturation, tout comme l'influence de l'usure. Mais plusieurs observations supplémentaires se dégagent de ces courbes :

III/ 2.2.1. Intensité maximale des redresseurs :

Les intensités moyennes débitées par les redresseurs pour des vitesses lentes (hors saturation) ne sont pas identiques : bien que les ponts soient tous construits selon le même schéma, les résistances internes diffèrent d'un cas à l'autre. Les cas les plus flagrants sont pour les premiers ponts qui agissent sur la bande nue qui est plus résistive. D'autre part, une action manuelle sur l'ouverture des thyristors des générateurs permet de faire varier la tension maximale des redresseurs. Le récapitulatif des intensités moyennes débitées hors saturation est présenté dans le tableau suivant :

Pont n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16
Imax	4100	4105	4508	4628	4534	4553	4407	4579	4609	4467	4509	4507	4528	4710	4530

Pont n°	25	26	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	40	43
Imax	4100	4132	4553	4468	4504	4594	4454	4610	4627	4565	4610	4533	4181	4478	4439

Figure II.21 : intensités maximales moyennes des redresseurs non saturés.

Afin de s'affranchir de cet inconvénient pour la généralisation de l'étude, les courbes sont normalisées en ramenant les valeurs d'intensités de chaque redresseur au rapport I/I_{max} . Toutes les courbes présentées en annexe sont bâties sur ce principe.

Remarque : Les ponts supérieurs au ponts 16 pour la face supérieure et au pont 43 pour la face inférieure ne sont pas présents dans les résultats car ils sont souvent les ponts en régulation. De ce fait, l'intensité de consigne évoluant en permanence, il est impossible de se faire une idée sur l'état de saturation d'une part, et sur l'intensité maximale de débit d'autre part.

III/ 2.2.2. Seuils de vitesse entraînant la saturation :

La vitesse seuil du déclenchement de la saturation (notée V_s) dépend de l'usure des anodes mais aussi de la position du pont (passe montante ou passe descendante). Les valeurs déterminées à partir des courbes expérimentales présentées plus haut donnent les résultats suivants :

Pont n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Vs neuf	500	#	#	#	525	#	550	#	505		510	#	520	#	505
Vs usé	450	#	#	535	455	540	445	555	440		445	550	460	545	450

seuil inexistant ou non déterminé

□ ponts d'anodes insolubles

pont n°	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Vs neuf	500		#	575	550	#	535	#	500		515	#	525	#	510
Vs usé	#		#	540	460	550	450	530	415		420	535	440	540	450

Figure II.22 : Vitesses seuils de saturation.

Les valeurs inexistantes expriment que la vitesse seuil n'a été atteinte dans aucune configuration. Ceci concerne principalement les ponts en passes montantes dont les anodes sont neuves qui n'atteignent jamais le seuil de saturation.

Par contre pour certains ponts le nombre de données est insuffisant pour établir une valeur justifiée. Ce tableau permet néanmoins de dégager des seuils moyens de saturation des redresseurs suivant qu'ils sont en passe montante (pont pair) ou en passe descendante (pont impair).

	Passe montante	Passe descendante
Vseuil pour des anodes neuves	720	520
Vseuil pour des anodes usées	540	445

Figure II.23 : Vitesses de seuil moyennes.

Ces valeurs seront la base des calculs effectués pour définir une loi générale visant à modéliser le phénomène de saturation :

Dans le cas d'une passe montante équipée d'anodes neuves on n'observe pas de phénomène de saturation, c'est pourquoi le seuil est fixé à la vitesse max de la ligne. Dans ce cas, le fait de n'avoir pas de saturation en passe montante, alors qu'il existe un seuil en passe descendante montre que pour un pont équipé d'anodes neuves c'est le phénomène hydrodynamique seul qui est influent.

Par contre, on remarque que les seuils des passes montantes et descendantes pour des anodes usées sont assez proches. Ici, c'est l'usure des anodes qui est la première cause de saturation, avant la vitesse de la ligne.

II/ 2.2.3. Dispersion des mesures :

Malgré les précautions prises pour récolter des données résultant de conditions identiques on observe sur certains ponts des dispersions importantes des mesures. Plusieurs causes peuvent en être à l'origine :

➤ *Le taux d'usure:* Afin d'avoir un nombre d'échantillons suffisant pour pouvoir quantifier le phénomène de saturation, le critère pont neuf correspond à une usure inférieure à 3 mm et le critère pont usé correspond à une usure supérieure à 18 mm. Les données relevées ne correspondent donc pas à deux états figés mais à deux plages de données.

➤ *L'état même de saturation :* Lorsqu'un redresseur est en état de saturation il ne débite pas un courant constant, mais un courant qui varie d'un delta de 300 A.

➤ *Le temps de fonctionnement d'un redresseur :* Lorsque le temps de fonctionnement d'un redresseur ne correspond pas au temps de passage de la bobine.

II/ 2.3. Mise en équation du cas général :

A partir de toutes les données récupérées on peut bâtir une fonction mathématique généralisée à tous les redresseurs. Comme les deux caractéristiques étudiées (vitesse et usure des anodes) sont indépendantes on étudie séparément l'influence de chacun des paramètres sur l'intensité.

Le cas général modélisé en premier lieu concerne un fonctionnement des ponts d'anodes solubles avec leur vis à vis en service pour des bandes de sections supérieures à 250 mm², vient ensuite les cas des anodes insolubles, des vis à vis hors service et enfin l'influence de la section de bande.

II/ 2.3.1. Influence de la vitesse :

D'après les courbes exposées la saturation est assimilée à une relation linéaire par rapport à la vitesse de la ligne. En utilisant comme vitesse de seuil de saturation les valeurs de la figure II.20, on dégage la relation suivante :

$$\text{pour } i \text{ impair} : \quad I_{\text{sat}_i} = I_{\text{phy}_i} \cdot (1 - 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot (v - v_{s_i})) \quad (\text{II.6})$$

$$\text{pour } i \text{ pair} : \quad I_{\text{sat}_i} = I_{\text{phy}_i} \cdot (1 - 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot (v - v_{s_i})) \quad (\text{II.7})$$

avec I_{phy_i} : Intensité maximale du redresseur i (figure II.21)

v_{s_i} : Vitesse de seuil de saturation du redresseur i (fonction de l'usure)

Cette droite caractérisant la saturation des redresseurs n'est valable que pour des vitesses supérieures à la vitesse seuil. La fonction générale quelle que soit la vitesse est :

$$\text{pour } i \text{ impair} : \quad I_{\text{sat}_i} = \text{Min}[I_{\text{phy}_i}; I_{\text{phy}_i} \cdot (1 - 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot (v - v_{s_i}))] \quad (\text{II.8})$$

$$\text{pour } i \text{ pair} : \quad I_{\text{sat}_i} = \text{Min}[I_{\text{phy}_i}; I_{\text{phy}_i} \cdot (1 - 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot (v - v_{s_i}))] \quad (\text{II.9})$$

L'observation des courbes expérimentales (cf Figure II.20) nous montre que la vitesse de déclenchement de la saturation (v_s) n'est pas seulement fonction de la position du pont mais dépend également de l'usure des anodes. C'est cette relation que nous allons maintenant à définir.

II/ 2.3.2. Influence de l'usure des anodes :

La résistance de pont évolue de façon linéaire par rapport à l'usure des anodes. A l'aide des valeurs de seuil de saturation obtenues de façon expérimentale, on peut établir les deux relations suivantes selon le redresseur considéré :

Passé descendante (pont impair) : $v_{s_i}(u) = -3,75.u + 520$ (II.10)

Passé montante (pont pair) : $v_{s_i}(u) = -9.u + 720$ (II.11)

avec I_{phy_i} : Intensité maximale du redresseur i en Ampères
 v : Vitesse de la ligne en m/mn
 u : Usure des anodes en mm.

II/ 2.3.3. Relation générale :

On obtient donc en réunissant les relations II.8 ; II.9 ; II.10 et II.11 :

pour n impair : $Isat_i = \text{Min}[I_{phy_i}; ph_{y_i} \cdot (1 - 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot (v + 3,75 \cdot u - 520))]$ (II.12)

pour n pair : $Isat_i = \text{Min}[I_{phy_i}; I_{phy_i} \cdot (1 - 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot (v + 9 \cdot u - 720))]$ (II.13)

avec I_{phy_i} : Intensité maximale du redresseur i en Ampères
 v : Vitesse de la ligne en m/mn
 u : Usure des anodes en mm.

II/ 2.4. Ponts d'anodes insolubles :

Globalement les ponts équipés d'anodes insolubles ont un comportement identique aux autres, face aux variations de vitesse. La différence se situe dans la résistance du pont d'anode qui est plus forte que celle des anodes en étain. En effet, cette résistance est comparable à celle d'un pont de même orientation, passe montante (PM) ou passe descendante (PD) dont les anodes seraient usées de 25 mm. Puisque l'épaisseur des anodes insolubles est fixe au cours du temps, on peut considérer que l'usure est un paramètre constant de valeur $u_i = 25$ mm.

II/ 2.5. Ponts en vis à vis hors service :

Le cas général développé considère que le pont en face de celui étudié est toujours en service. Dans cette configuration la résistance de bande est partagée entre les deux redresseurs en vis à vis. Par contre si l'un des deux est arrêté, celui qui reste en fonction voit la résistance de bande réduite de moitié. La prise en compte de cette situation est faite sur le même principe que pour le

cas des anodes insolubles en ramenant le gain ohmique de résistance à une usure d'anodes. Le comportement d'un redresseur lorsque son vis à vis est arrêté est donc équivalent au comportement de ce même redresseur avec son vis à vis en service mais dont l'usure des anodes aurait été plus faible de 11,5 mm. La mise en équation de ceci se traduit par :

$$\text{vis à vis hors service en PM: } I_{sat_i} = I_{phy_i} \cdot \min[1; 1 - (0,0013 \cdot (v + 9 \cdot (u_i - 11,5) - 720))] \quad (\text{II.14})$$

$$\text{vis à vis hors service en PD: } I_{sat_i} = I_{phy_i} \cdot \min[1; 1 - (0,0017 \cdot (v + 3,75 \cdot (u_i - 11,5) - 520))] \quad (\text{II.15})$$

II/ 2.6. Influence de la section de bande :

Le graphique de la Figure II.24 montre l'évolution de la saturation des redresseurs en fonction de la section de la bande.

Une bonne approximation de cette tendance est obtenue avec une loi exponentielle du type $y = 1 - e^{(ax+b)}$. La détermination des paramètres a et b est faite de façon à minimiser l'écart quadratique entre les valeurs réelles et le modèle. L'équation finale de l'influence de la section de la bande est la suivante :

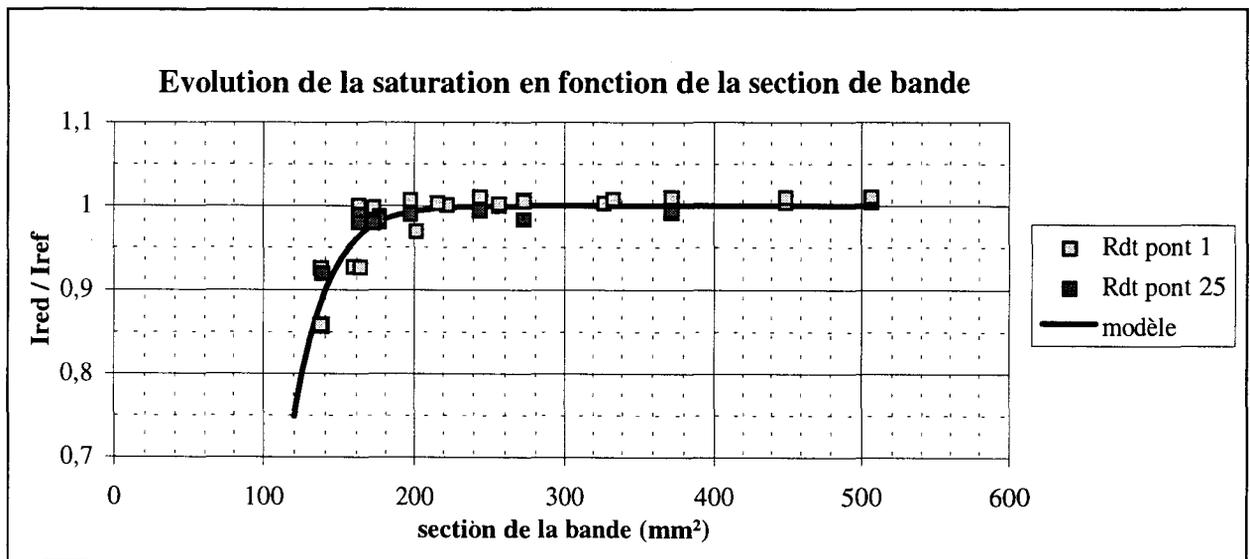


Figure II.24 : Influence de la section de bande.

$$I_{saturation_i} = I_{sat_i} \cdot (1 - e^{(-0,046 \cdot (section - 90))}) \quad (\text{II.16})$$

avec section en mm²

L'influence de la section de bande n'est pas identique sur tous les redresseurs. En effet, au fur et à mesure de son passage devant les redresseurs en service dans la zone d'étamage la bande voit son revêtement d'étain augmenter. Ceci a pour conséquence de diminuer la résistance de bande et donc de réduire la saturation des ponts. L'exemple qui suit exprime parfaitement ce phénomène.

Exemple de l'influence du nombre de passes sur la résistance de bande :

Caractéristiques : section de bande : 137 mm²
 vitesse de ligne : 298,2 m/min
 bobine n°47958502

Pont n°	1	3	4	8	9	11	12	13	14	15	16	17
Usure	12,45	5,49	10,77	7,88	7,14	16,43	4,6	2,89	16,9	15,71	1,96	6,73
Imesuré	3915	4078	4059	4482	4638	4600	4635	4551	4411	4547	4515	4547

Dans cet exemple, la saturation des redresseurs est effective jusqu'au pont n°8 à partir duquel le courant mesuré est équivalent au courant maximum des redresseurs. L'observation des caractéristiques montre que la vitesse faible de la ligne ne provoque pas de modifications du niveau de l'électrolyte dans les cellules. Par ailleurs aucun redresseur en vis à vis de ceux étudiés n'a subi de modification de fonctionnement. Enfin, l'usure des anodes pendant le temps de passage de la bobine est négligeable (environ 0,3 mm). L'évolution de la saturation est donc bien le fait de la modification de la résistance de la bande au fur et à mesure que le taux de revêtement déposé augmente. Dans la pratique, l'influence de la section de bande sur la saturation des redresseurs ne sera prise en considération que pour les quatre premiers ponts.

III/ 2.7. Résultats du modèle :

Ce modèle a été testé sur une base de 1035 bobines passées à vitesse stable. Les résultats sont présentés dans le tableau de la Figure II.25. Les cas sont triés par ordre décroissant de la vitesse de passage de la bobine. Les écarts entre le modèle et la réalité sont indiqués sous deux formes : en pourcentage d'erreur par rapport au courant total, et en Ampères.

FACE SUPÉRIEURE									
Vitesse (m/min)	600	550	500	450	400	350	300	250	200
Nombre de cas	234	692	633	160	60	72	28	66	1
Écart moyen (%)	4,68%	6,16%	3,46%	2,82%	0,64%	0,39%	0,39%	0,97%	0,17%
Écart moyen (A)	1 126	1 788	1 005	763	250	111	119	215	16

FACE INFÉRIEURE									
Vitesse (m/min)	600	550	500	450	400	350	300	250	200
Nombre de cas	234	692	633	160	60	72	28	66	1
Écart moyen (%)	4,67%	5,33%	3,16%	2,33%	2,10%	0,70%	0,88%	0,63%	0,22%
Écart moyen (A)	2 231	2 571	1 362	861	381	192	152	163	30

Figure II.25 : Résultats du modèle de saturation

Ces résultats permettent une prédiction très précise de l'état des redresseurs dans une situation future. En effet, l'erreur moyenne totale entre le modèle et la réalité est de 4,13 % pour la face supérieure et de 3,76 % pour la face inférieure, toutes vitesses confondues. Ce qui correspond, en terme d'intensité, à une erreur comprise entre 200 et 300 ampères par redresseurs, qui est la tolérance due aux imprécisions de mesures.



CHAPITRE III :
RÉSOLUTION D'UN DÉFAUT D'ASPECT

I/ RECRUESCENCE D'UN DÉFAUT D'ASPECT

I/ 1. INTRODUCTION :

L'étude suivante a trouvé son origine dans la recrudescence d'un défaut d'aspect qui se présente sous la forme de traînées blanchâtres, parfois de faible largeur, mais pouvant s'étendre sur toute la largeur bande.

Ce défaut atteint principalement le produit DWI non refondu, (une refusion de l'étain estompe le défaut en sortie), et de revêtement faible (inférieur à 4g/m²). Suivant l'inertie des moyens mis en œuvre pour remédier au problème, les longueurs de bandes affectées vont de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres.

De part son apparence ce défaut a été classé sous l'appellation "Bas courant" qui sous-entend un processus d'électrodéposition généré dans des conditions trop basses de densité de courant, mais il pourrait correspondre également, de par ses circonstances d'apparition, à un défaut "Haut courant" (densité de courant trop élevée), ou encore à un défaut de bande sale. Toutefois, le fait que le produit affecté (DWI) est surtout de grande largeur, la densité de courant sur la bande n'est pas très élevée, même lorsque les redresseurs débitent au maximum, ce qui laisse peu de probabilité d'avoir un défaut de type "Haut courant".

Le produit défectueux étant impropre à l'expédition chez le client, la moindre apparition du défaut sur une bande provoque la mise hors circuit de production de la bobine entière qui doit passer sur une ligne d'inspection afin de chuter les parties mauvaises. La proportion de métal ainsi chuté était de 19 tonnes (t) pour 10 kilo tonnes (kt) produites en 1994, 14 t pour 10 kt produites en 1995. Un groupe de travail s'est donc mis en place début 1996 avec l'objectif de diminuer de moitié le tonnage de produit défectueux soit 7 t / 10 kt.

I/ 2. CAUSALITÉS DE L'APPARITION DU DÉFAUT :

Le problème majeur d'un tel défaut est qu'il ne dépend pas d'un seul paramètre mais de l'évolution ou d'une dérive d'un ensemble de facteurs. L'arbre des causes présenté Figure III.1 recense l'ensemble des facteurs à prendre en compte. Mais parmi ceux-ci on peut citer deux des principales circonstances d'apparition du défaut :

➤ L'augmentation de température du bain : le processus d'étamage se réalise dans une tranche de température comprise entre 25 et 30°C (température après échangeurs), au delà de la limite de 30°C les chances d'apparition du défaut sont fortes.

Remarque: Cette fourchette concerne la température de l'électrolyte à l'entrée des cellules, pour avoir la température réelle d'étamage (entre l'anode et la cathode) il faut ajouter 7 à 8°C.

➤ Les ralentissements de ligne semblent également être un élément déclencheur du phénomène.

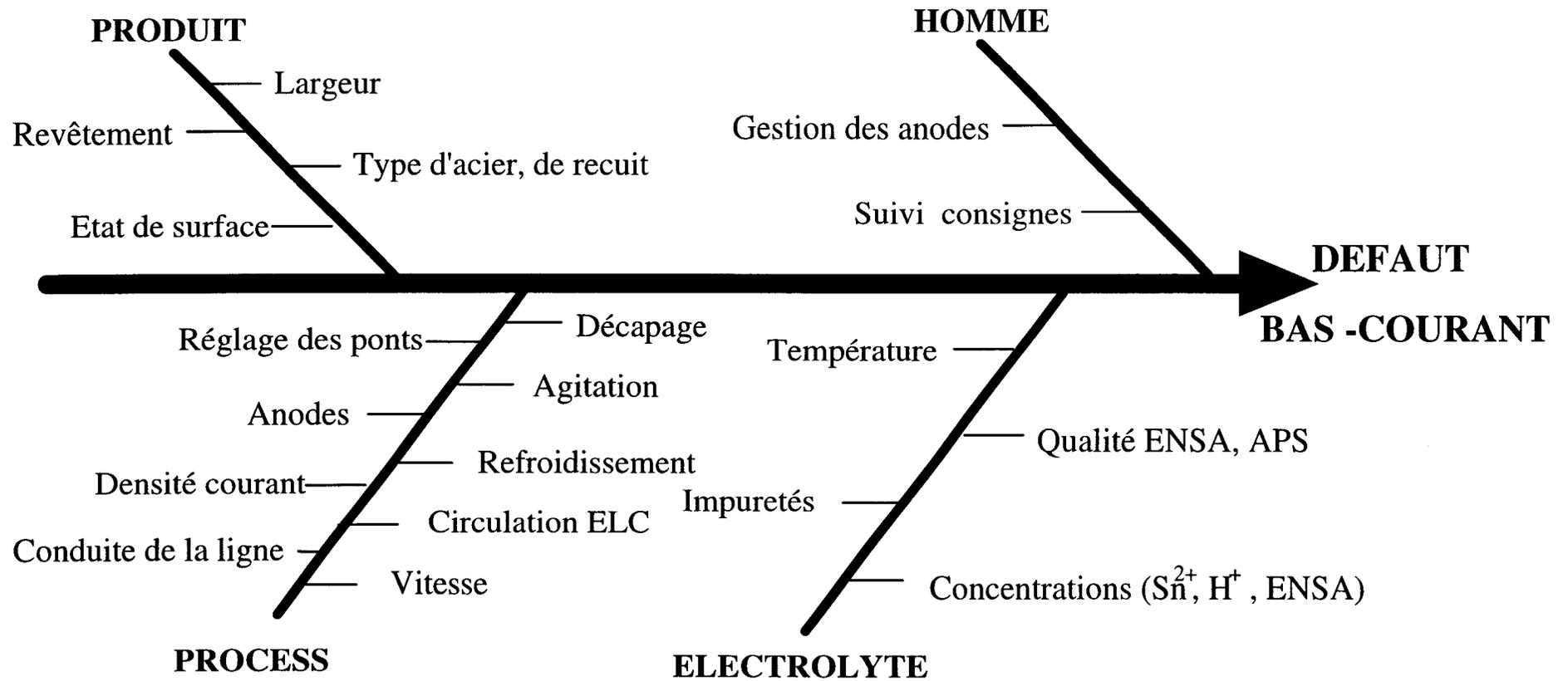


Figure III.1 : Arbre des causes du Défaut « Bas Courant ».

II/ MÉCANISME DE FORMATION DU DÉPÔT D'ÉTAIN

La formation du film d'étain à la surface de l'acier est un mécanisme d'électrocrystallisation. L'épaisseur, l'aspect et le caractère couvrant du dépôt dépendent de la forme et de la taille des cristaux d'étain et donc des conditions électrochimiques de leur formation. Le processus peut se résumer de façon très schématique en deux étapes.

II/ 1. LA GERMINATION :

C'est le point d'ancrage de l'étain sur l'acier. La germination va conditionner le nombre de cristaux et donc la bonne répartition et du revêtement [LAC-M1591]. Ce processus se déroule en plusieurs phases successives (Figure III.2):

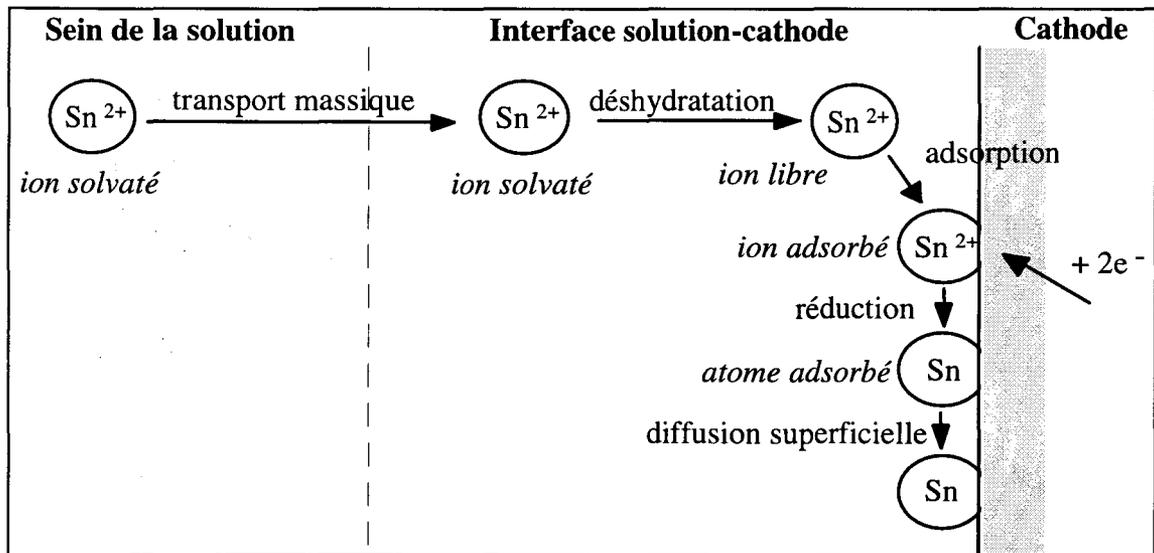


Figure III.2 : processus de germination.

- *L'apport* : les ions Sn^{2+} présents dans la solution vont se rapprocher de la cathode par migration, convection et diffusion.

- *L'adsorption* : L'ion Sn^{2+} , arrivé sur la cathode, se fixe à sa surface, subit une déshydratation et se décharge (réduction) pour devenir un atome d'étain appelé (adatome) :



- *Diffusion superficielle*: L'atome d'étain diffuse en surface de la bande et se fixe sur un site privilégié. La formation des premières couches atomiques d'étain dépend de l'orientation cristalline du substrat de fer et de l'existence en surface de celui-ci de défauts. Ces derniers constituent souvent des sites plus favorables que le métal lui-même, et les conditions de

préparation préalable de la bande ont beaucoup d'importance pour la germination du dépôt. Ce mécanisme se produit de façon continue et est immédiatement suivi d'une étape de croissance.

Remarque: une autre théorie tend vers la diffusion sur le support de l'ion adsorbé qui est ensuite réduit en atome.

II/ 2. LA CROISSANCE :

Habituellement, la croissance des cristaux d'étain est régie par deux mécanismes :

- le transport des ions au voisinage de l'interface électrolyte/métal. On peut ici considérer cette étape comme non limitante du fait du milieu fortement agité et des faibles distances entre anode et cathode.

- le transfert de charge, ou réduction des ions en atomes déjà décrit, mais qui concerne maintenant le dépôt d'atomes d'étain sur des cristaux d'étain déjà présents. Ce mécanisme est responsable d'une surtension électrochimique qui est décrite par la courbe de polarisation du système qui montre l'effet de la densité du courant. Pour la plupart des dépôts métalliques cette courbe a la forme présentée figure III.3 [ROS-J1804][CAT-K810].

Les faibles densités de courant, jusqu'au point a, forment des dépôts non couvrants (incomplets), de germination faible, où les cristaux sont disjoints et se développent irrégulièrement (figure III.5). La partie à faible pente, entre a et b, procure un film couvrant, lisse, sans orientation particulière des cristaux qui se forment (figure III.5bis). C'est la zone de fonctionnement optimal. Au delà de b, on observe des revêtements brûlés. Bien que couvrants, ces dépôts présentent des arborescences dendritiques qui modifient l'aspect (dépôts mat et sombres) [CRFB-76] et perturbent l'homogénéité de l'épaisseur (figure III.6 et III.6bis). La transition entre les revêtements non couvrants et couvrants est brutale, alors que la détérioration vers les dépôts brûlés est progressive.

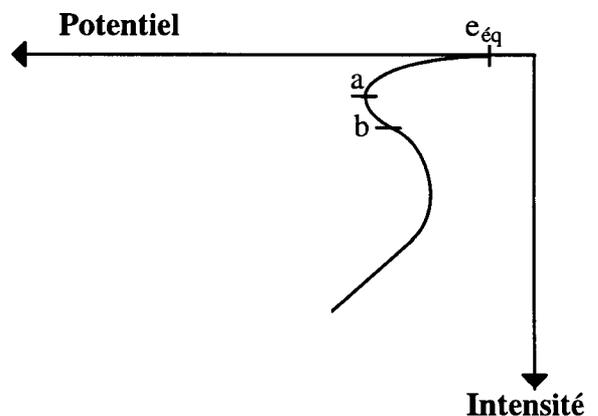
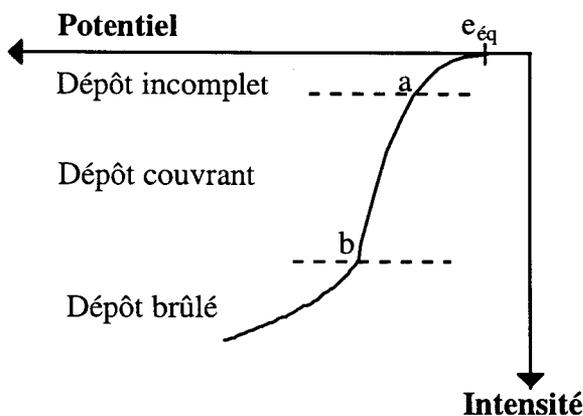


Figure III.3 : Courbe Intensité-Potentiel classique

Figure III.4 : Courbe Intensité-Potentiel déformée.

Dans le cas de l'étain, on constate une anomalie de la courbe de polarisation qui prend la forme de la figure III.4 si la concentration en ions Sn^{2+} augmente ou si le pH diminue. Si le dépôt normal se fait au point b on constate alors une plus grande instabilité entre les types de dépôts couvrants ou incomplets.



Figure III.5 : Dépôt d'étain incomplet ($\times 10\ 000$)

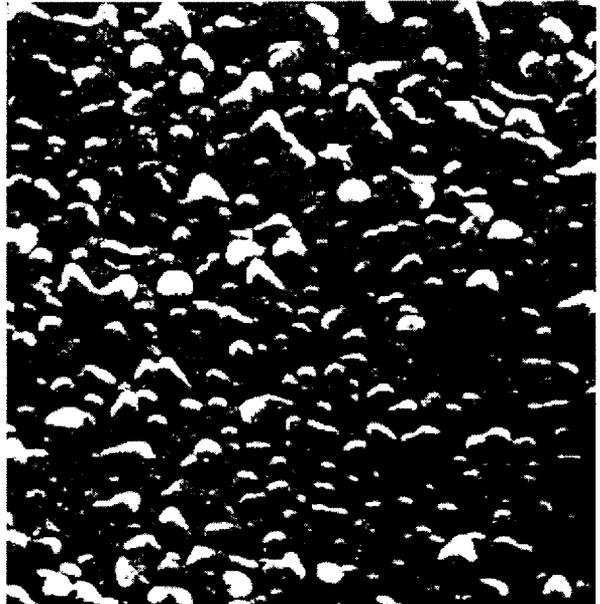


Figure III.5bis : Dépôt d'étain couvrant ($\times 5050$)



Figure III.6 : Dépôts dendritiques ($\times 2000$)



Figure III.6bis : Dépôts dendritiques ($\times 10\ 000$)

Photographies extraites de : « interprétation de quelques faits se produisant lors de l'étamage électrolytiques en milieu agité », Ph. AUBRUN, revue de métallurgie - Novembre 1976.

Ceci peut se traduire par des morphologies localisées différentes sur la même bande et constitue le défaut de type « Bas courant ».

Ce phénomène n'a pas été complètement étudié dans le cas de l'étain mais a fait l'objet de plus larges travaux dans celui du zinc [EPE-76] dont l'électrocristallisation offre de grandes similitudes avec l'étain.

L'interprétation proposée par Ph. AUBRUN [AUB-76] repose sur les interactions entre le front de cristallisation et une espèce chimique capable de s'y adsorber, vraisemblablement

formée par les additifs de brillantage. Ces travaux démontrent que la densité de courant locale varie beaucoup au voisinage du point a et provoque une croissance non homogène du dépôt, caractérisé par l'espacement de cristaux proéminents. Ils confirment aussi l'instabilité très brutale entre les deux types de revêtements qui existe lorsque les conditions de dépôt sont situées entre les points a et b.

Ceci confirme bien l'apparition de ce type de défaut sous forme localisée : pour une même densité de courant globale, la répartition locale des cristaux est modifiée à quelques millimètres de distance.

III/ MORPHOLOGIE DU DÉFAUT

Comme il a été expliqué précédemment, les caractéristiques d'apparition du défaut sont telles que sous la même appellation usuelle de "Bas courant" peuvent coexister plusieurs types de défauts, d'origines ou de morphologies différentes. Il est donc indispensable dans un premier temps d'étudier un échantillon de chaque produit suspecté d'être de type « Bas courant » afin de définir la classification exacte du défaut. Parmi les nombreuses observations, cinq échantillons parmi les plus représentatifs sont présentés.

III/ 1. ÉCHANTILLONS ANALYSÉS :

La nature exacte du défaut a été mise en évidence par des observations au microscope électronique à balayage de zones défectueuses pour lesquelles les conditions de fonctionnement de la ligne étaient différentes (vitesses de ligne, taux) au moment de l'apparition. Ces observations ont été faites par comparaison avec un échantillon témoin ne présentant pas de défaut qui sert de référence visuelle.

Les quatre cas de défauts rassemblés dans le tableau suivant (BAC = « Bas courant ») résumant d'une part les taux les plus touchés par le phénomène (de 1 g/m² à 3 g/m²) et d'autre part mettent en évidence par les commentaires des opérateurs, des causes différentes d'apparition.

N°	N° Bobine	Taux (g/m ²)	Rapport de l'opérateur ligne
1	41848201	1.0/2.8	
2	41841500	1.0/2.8	BAC
3	41564404	2.0/2.8	BAC intermittent sur face Supérieure en axe. Remarque : indice Carbone-Cr 69
4	41564604	2.0/2.8	BAC suite à un changement de polarité des passes du décapage
5	41597801	2.0/1.8	Au ralentissement, BAC face supérieure à 380 m/mn, amélioration en mettant le 1 ^{er} pont Sup en service.

Sur chacune des photos se trouve indiqué le grossissement ainsi que le type d'image enregistrée:

✓ E.S : images en électrons secondaires qui donne un effet topographique intense et donc une très bonne idée du relief.

✓ E.R : images en électrons rétro diffusés qui procure un effet de contraste sensible à la différence de numéro atomique, ce qui permet de différencier :

- les zones claires = composition riche en étain
- les zones sombres = composition riche en fer
- les zones noires = composition riche en oxyde

I/ 1. OBSERVATIONS DE L'ÉCHANTILLON DE RÉFÉRENCE :

L'échantillon qui sert de référence pour l'observation des défauts a été prélevé alors que la ligne fonctionnait depuis plusieurs heures sur le même produit sans le moindre défaut. L'observation des deux faces permet une comparaison avec les autres échantillons à taux égaux ou proches.

I/ 1.1. Revêtement de 2.8 g/m² :

L'observation de l'image en électrons secondaires de la face de l'échantillon témoin revêtue d'une couche d'étain de 2.8 g/m² (figure III.7) montre un revêtement couvrant, de couleur uniforme, qui reflète une homogénéité de la nature chimique de l'étain. On observe également le micro relief correspondant à la rugosité de la tôle, qui provient de l'empreinte des rouleaux de laminage lors de l'érouissage et qui complique les interprétations des observations.

Dans ces micro reliefs, à fort grossissement, (figure III.8), on distingue parfaitement les déformations plastique de l'étain qui est très ductile. Si l'on augmente encore le grossissement (figure III.9), le revêtement se montre comme étant constitué de très petits cristaux jointifs et de tailles identiques.

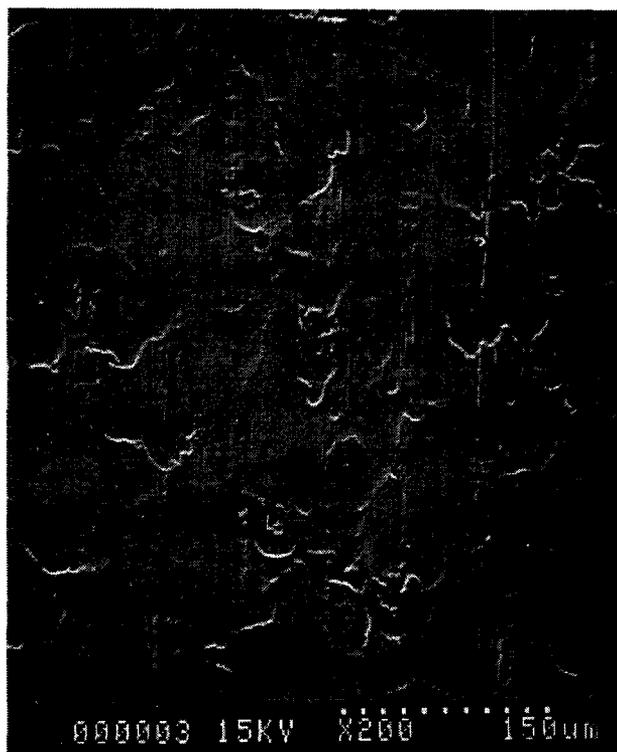


Figure III.7 : Éch. témoin 2,8 g/m² (×200).

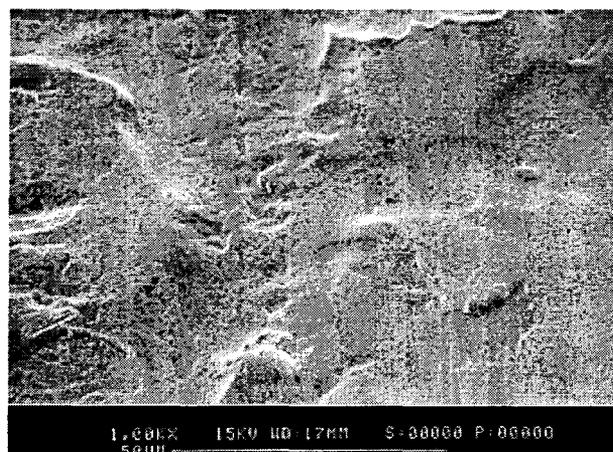


Figure III.8 : Éch. témoin 2,8 g/m² (×1000).



Figure III.9 : Éch. témoin 2,8 g/m² (×8100).

I/ 1.2. Revêtement de 1 g/m² :

Il est intéressant de remarquer dans l'observation d'un échantillon normal de revêtement très faible des différences de teintes qui délimitent la nature des grains métallurgiques. L'observation rapprochée de ce revêtement très mince (1 g/m² correspond à une épaisseur de 0,15 µm) a montré d'une part par des images à électrons rétro diffusés (figure III.10), d'autre part par des cartographies élémentaires en fer et en étain que la teneur en étain n'est pas constante sur toute la surface. Les parties sombres sur la photo de la figure III.11 font apparaître une très forte proportion de fer.

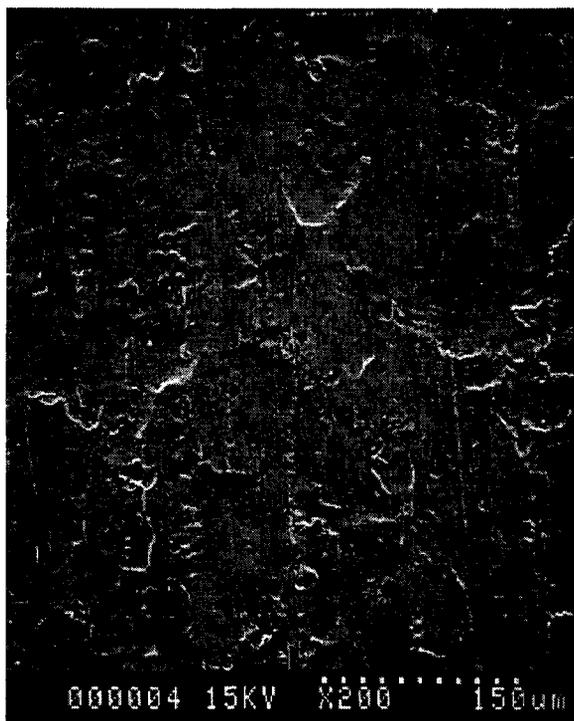


Figure III.10 : Éch. témoin 1 g/m² (×200).

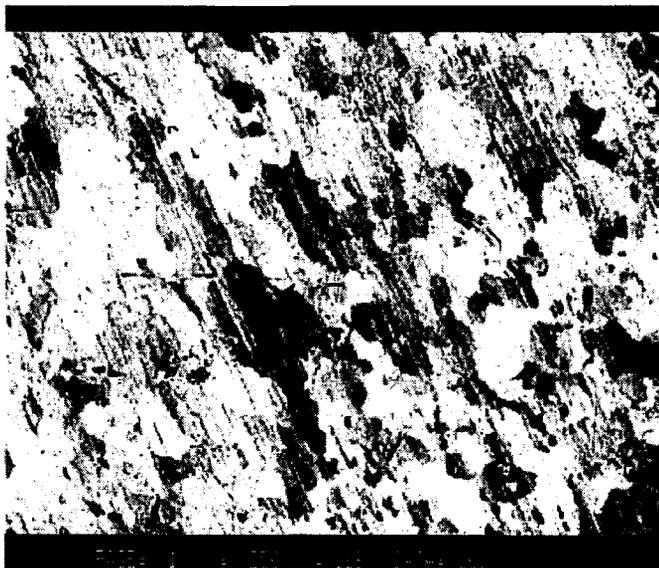


Figure III.11 : Éch. témoin 1 g/m²
Cartographie X (×5000).

En excluant la possibilité de formation d'un alliage de fer-étain à cette température (pas de refusion possible de l'étain), ces résultats montrent l'état naturellement hétérogène d'un revêtement très mince qualifié de bonne qualité.

I/ 2. OBSERVATIONS DU DÉFAUT :

Les observations présentées maintenant proviennent des échantillons évoqués dans le premier paragraphe. Les photos montrent chacune des caractéristiques précises, et qui sont communes à plusieurs, voire à la totalité des échantillons étudiés.

I/ 2.1. Analyse micrographique de surface :

La première observation concerne l'analyse micrographique de surface montrée par la figure III.12. Cette analyse se justifie par le rapport des opérateurs soulignant un indice de Carbone-Chrome dans l'acier plus élevée que la moyenne pour l'échantillon 3, mais le résultat sur cet échantillon, comme sur les autres montre une surface entièrement ferritique de l'acier et la taille normale des grains ne fait apparaître aucune phase inattendue.

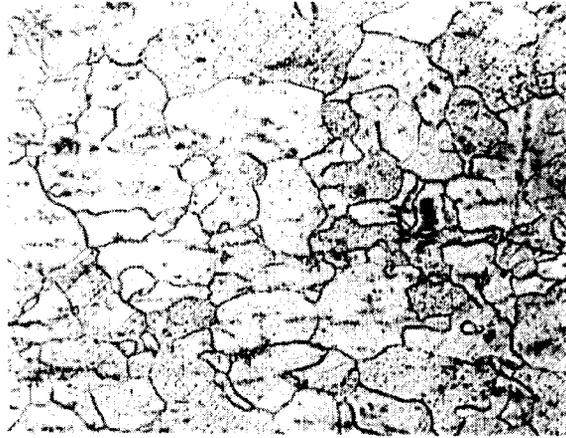


Figure III.12 : Analyse Micrographique de surface (×1000)

I/ 2.2. Répartition du revêtement présentant le défaut :

La première photo, présentée figure III.13, concerne l'échantillon n°2, dont le revêtement est de 1 g/m². Il présente une grande hétérogénéité d'aspect et d'épaisseur, plus accentuée que pour l'échantillon de référence. L'image en électrons rétro diffusés (figure III.14) montre une zone très sombre (Z₁) ne contenant pratiquement pas de dépôt d'étain, sauf sous de rares petits cristaux isolés.

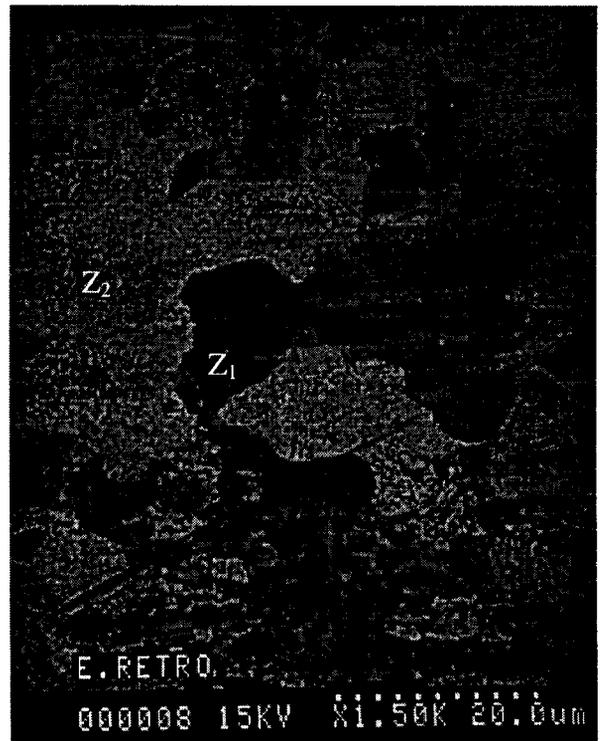


Figure III.13 : Échantillon n°1: 1 g/m² (×1500). Figure III.14 : Échantillon n°1: 1 g/m² (×1500).

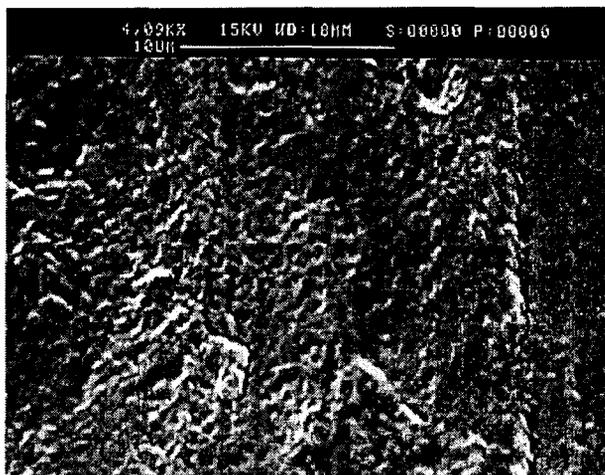


Figure III.19 : Éch. n°5 - 2.0 g/m² - (×1000)



Figure III.20 : Éch. n°5 - 2.0 g/m² - (×200)

On remarque très bien sur la figure III.20 un aspect de saupoudrage de l'acier qui prouve un développement diffus de l'étain avec des formations de sites privilégiés, notamment autour des stries de laminage.

I/ 3. CONCLUSION :

Il n'a été relevé sur la bande aucune trace d'éléments perturbateurs au bon étamage, le support de l'électrodéposition n'est donc pas mis en cause et le problème a bien pour origine le process d'étamage.

Toutes les différences d'aspects constatées confirment bien les caractéristiques d'hétérogénéité d'épaisseur du revêtement sans doute liées aux orientations des grains du substrat, et surtout l'aspect non couvrant du revêtement dans les parties les plus épaisses.

Ceci est tout à fait en accord avec l'hypothèse d'un régime de dépôt à trop faible densité de courant tel qu'il a été décrit dans le paragraphe relatif aux mécanismes d'électrocristallisation.

II/ ACTIONS MENÉES POUR ÉLIMINER LE DÉFAUT

L'analyse de l'arbre des causalités, en complémentarité avec une bonne connaissance du défaut permet de mettre en place différents axes de travail afin de progresser dans l'élimination du défaut « Bas courant ».

II/ 1. CONDUITE DE LA LIGNE :

Pour avoir un étamage de bonne qualité, il est préférable de recouvrir d'étain la bande le plus tôt possible. Une utilisation systématique du premier pont de la ligne empêche à la bande de se salir et procure une meilleure germination puisque la bande est encore sous l'activation du décapage.

L'utilisation d'un pont d'anode provoque, de par les intensités mises en jeu (4500 A par pont), un échauffement par effet Joule de l'électrolyte. Si le renouvellement de cet électrolyte n'est pas suffisant (soit parce que l'électrolyte injecté n'est pas assez froid, soit parce que le débit n'est pas assez important), la température d'électrodéposition augmente, et modifie le point de fonctionnement du processus. C'est typiquement ce qui se passe sur la ligne lors de l'utilisation de plusieurs ponts consécutifs dans la première cellule.

Une conduite judicieuse de la ligne est donc à appliquer: *utilisation du premier pont disponible suivi de deux ponts hors service* afin d'éviter un échauffement trop important de électrolyte dans la première cellule.

II/ 2. MODIFICATION DU POINT DE FONCTIONNEMENT :

Pour obtenir un dépôt couvrant et lisse il est impératif de respecter des fourchettes de fonctionnement pour les paramètres prépondérants dans le processus d'électrodéposition [BER-94]:

- ✓ la densité de courant
- ✓ la température de l'électrolyte
- ✓ la concentration du bain en étain stanneux Sn²⁺.

Comme le montre la figure III.21, ces fourchettes définissent des zones de fonctionnement qui garantissent un étamage correct [GUY-89] [GUY-90].

Pour une concentration donnée, si les paramètres de température et de densité font que le point de fonctionnement de la ligne est à gauche de la zone relative à la concentration, alors on est en situation de déclencher un défaut « Bas courant ».

Au contraire, si le point de fonctionnement est à droite de la zone correspondante on est en situation de « Haut courant ».

L'idéal étant de se trouver au centre d'une zone, il faut pouvoir agir au moins sur un des trois paramètres en jeu.

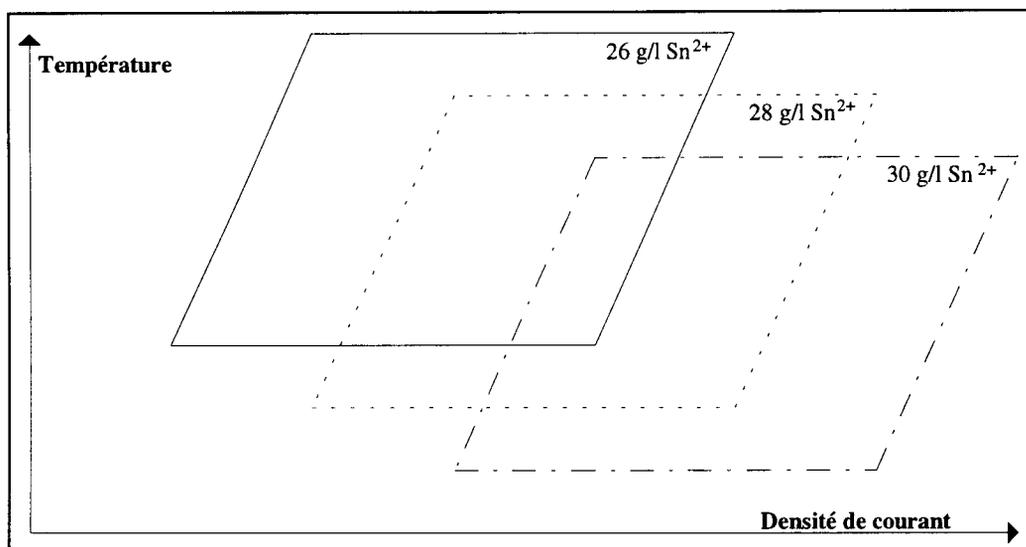


Figure III.21 : Zones de bon fonctionnement d'un électrolyte.

La Densité de courant : La régulation présentée au chapitre I fait que dans la plupart des configurations l'étamage se fait à densité maximale. En effet, cette dernière est conditionnée par :

- La largeur de la bande à étamer, paramètre qui ne dépend que du carnet de commande et sur lequel on ne peut pas avoir d'action.
- La consigne de courant des redresseurs qui est au maximum de 4500 A, soit une densité maximale de 25 A/dm² pour une bande de 1200 mm de large.
- La hauteur du bain qui est théoriquement constante.

La température : Ici encore il s'agit d'un paramètre difficilement modifiable. Le refroidissement de l'électrolyte par passage de celui-ci dans des échangeurs est limité par la capacité de ces échangeurs qui sont bien souvent utilisés au maximum de leur possibilités.

D'autre part, l'aspect climatique a son importance car lors des saisons chaudes l'eau de refroidissement voit sa température augmenter, ce qui réduit l'efficacité des échangeurs.

Il reste donc la **concentration d'ions stanneux** comme seul paramètre susceptible de ramener le processus au centre d'une plage de fonctionnement. L'analyse systématique des conditions d'étamage de chaque bobine pendant six mois (une soixantaine de cas) est présentée Figure III.22 (les cas de « Bas courant » sont sous la dénomination bac).

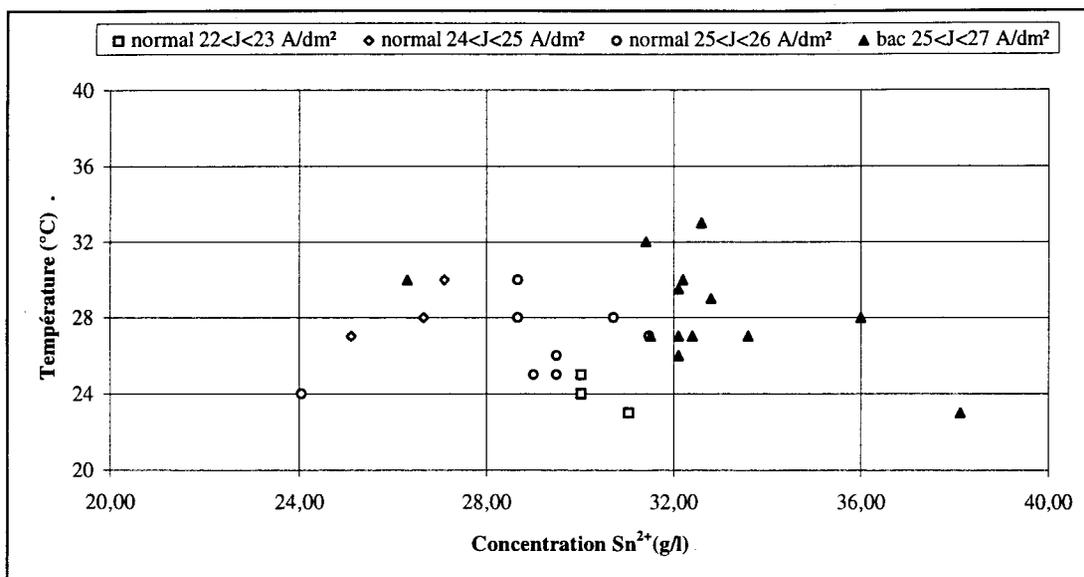


Figure III.22 : Points de fonctionnement de l'étamage.

On constate que le défaut « Bas courant » se déclenche pour des concentrations d'étain stanneux supérieures à 31 g/l à l'exception d'un cas qui, après enquête approfondie, est le résultat d'un non respect des consignes de changement de polarité du décapage dont il sera question dans le paragraphe suivant.

Pour avoir une marge de sécurité sur l'ensemble de la production il semble donc impératif de maintenir la concentration d'étain stanneux en permanence entre 27 et 29 g/l.

II/ 3. DÉPOLARISATION RÉGULIÈRE DU DÉCAPAGE :

Le décapage électrolytique se décompose en une succession de passes dans lesquelles la bande se trouve tour à tour en phase anodique (A) ou cathodique (C).

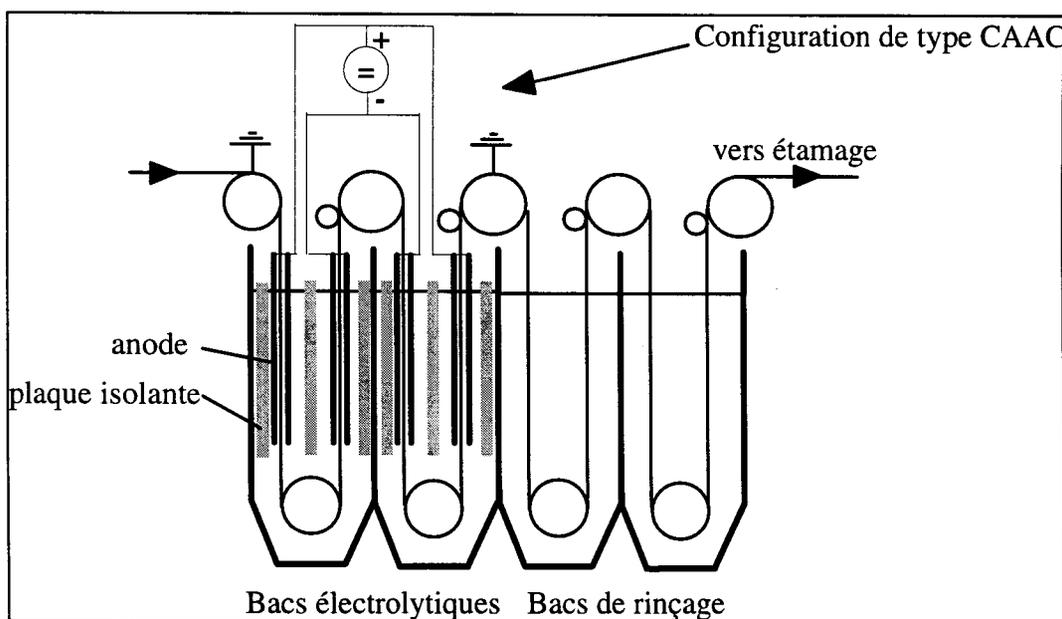


Figure III.23 : Décapage électrolytique grille à grille

Il existe deux possibilités au niveau du fonctionnement grille à grille, soit ACCA, soit CAAC.

Travailler avec la dernière passe anodique peut provoquer une érosion de la bande pouvant détériorer l'aspect de surface. Il est toutefois indispensable de passer par cette configuration de temps à autres afin de décharger les électrodes insolubles du décapage des impuretés accumulées lorsqu'elles sont en état de cathode.

Un changement de polarisation tardif provoque une retombée de ces impuretés (trop nombreuses) sur la bande et engendre ainsi des défauts d'aspect.

C'est pourquoi l'action menée à ce niveau fut de laisser la zone de décapage en configuration CAAC, mais de faire une dépolarisation systématique de 3 minutes toutes les heures.

III/ RÉSULTATS

La mise en oeuvre des actions décidées a fait chuter le tonnage d'acier dérouté de façon significative.

L'objectif initial était d'arriver en fin d'année 1996 à un ratio de 7 t/10 kt . Le résultat est de 0.3 t/10 kt en novembre 1996, ce qui peut être considéré comme la limite de bruit de fond.

La moyenne pour les onze premiers mois de l'année est de 4.6 t/10 kt.

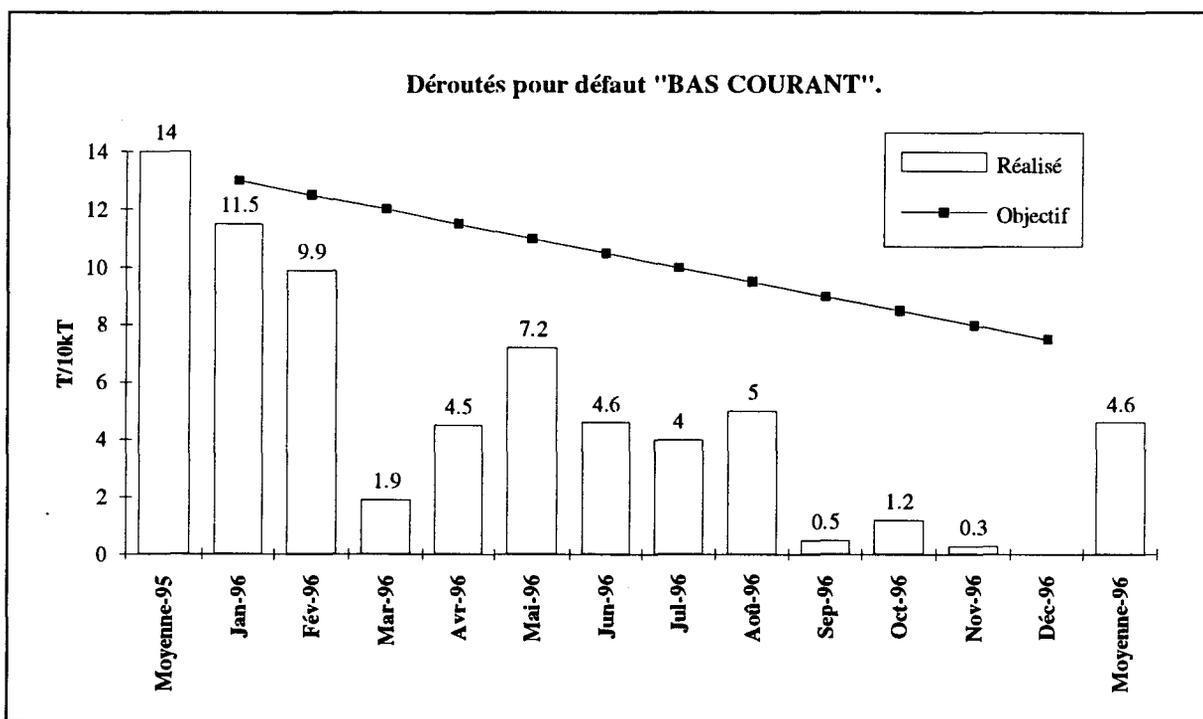
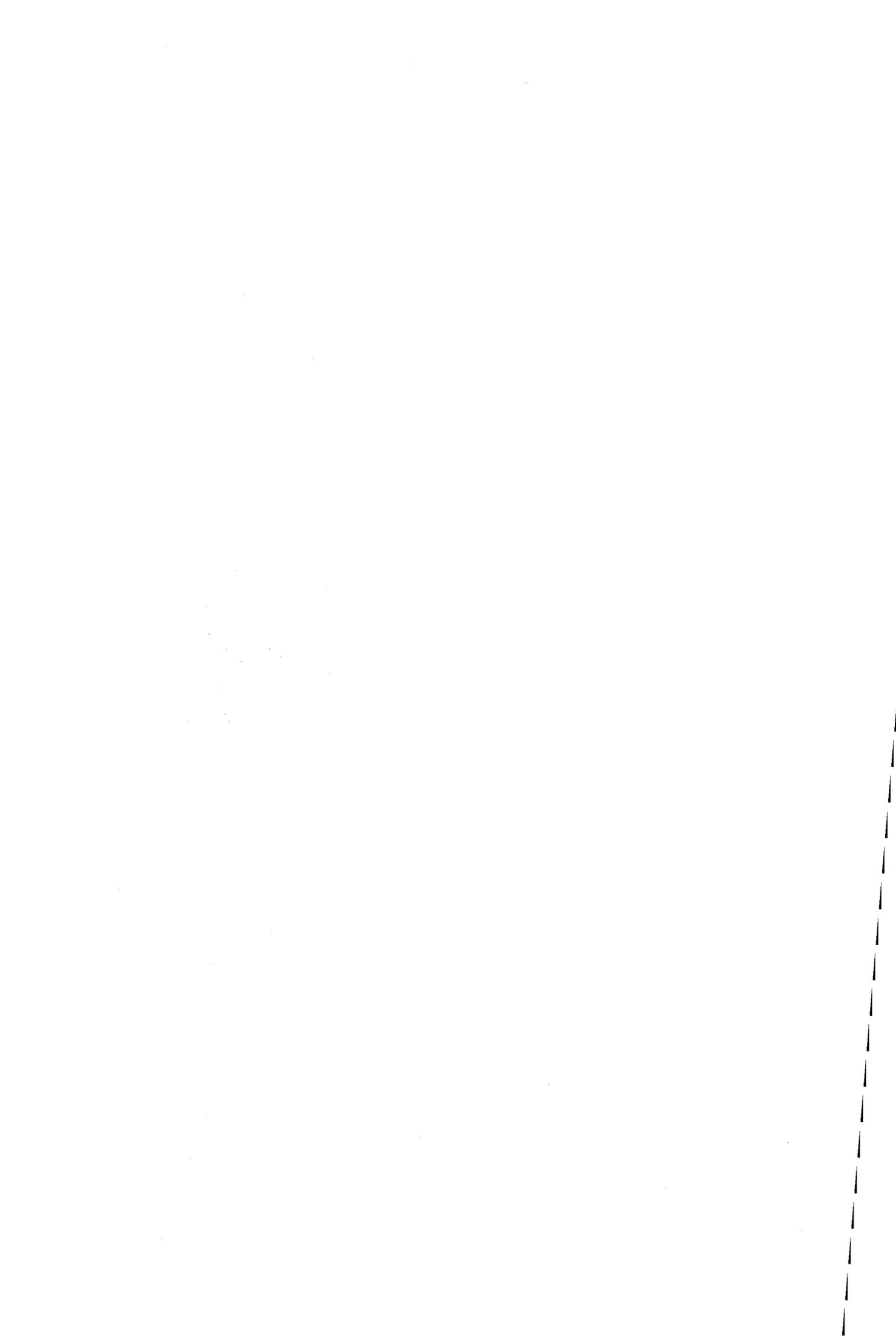


Figure III.23 : Tonnage de Dérouté pour défaut "Bas Courant" en 1996

L'observation plus fine de cette courbe indique que les actions menées en février et mars, c'est à dire : la conduite plus stricte de la ligne, les restrictions sur la concentration d'étain stanneux, et les dépolarisations programmées du décapage ont eu un effet immédiat sur le nombre de défauts.

Par contre, les chiffres de l'été montrent les limites de ces actions lors des fortes évolutions de la température ambiante (la température de l'électrolyte de renouvellement est fonction de la température de l'eau du circuit de refroidissement, qui dépend elle même des conditions climatiques).

C'est pourquoi le travail en cours cherche maintenant à améliorer le débit de renouvellement d'électrolyte, dans le but notamment d'élargir la plage de fonctionnement correct du processus d'électrodéposition.



CHAPITRE IV :
MODÉLISATION NEURONALE DU
RENDEMENT

I/ INTRODUCTION

Le principe de la régulation de revêtement électrolytique est de calculer le courant à appliquer sur les anodes pour avoir sur la bande un dépôt correspondant au revêtement désiré. Or, si la loi de Faraday est une loi physique théorique exacte, le process réel, lui, subit toutes les incertitudes classiques (erreurs de mesures, pertes par effet Joule, etc..), de sorte que pour un courant donné le dépôt réel est inférieur au dépôt théorique [GUY-88].

Le rapport de ces deux entités est appelé rendement électrolytique: $\eta = \frac{I_{théo}}{I_{réel}}$ (IV.1)

Sur la ligne d'étamage de Sollac Mardyck, le calcul de ce rendement est fait en régime permanent à partir des informations fournies par la jauge de revêtement à rayonnement X, qui, en donnant la quantité d'étain déposée sur la bande ($\tau_{réel}$) permet de réajuster le courant de consigne :

$$I_{réel} = \tau_{réel} \cdot K \cdot L \cdot V \quad (IV.2)$$

avec : K : constante issue de la loi de Faraday

L : largeur de la bande (mm)

V : vitesse de la ligne (m/min)

Or, comme la montre la Fig.1, la position de la jauge engendre une zone "aveugle" de retard pur pendant laquelle la régulation doit appliquer un courant sans avoir de retour de la mesure.

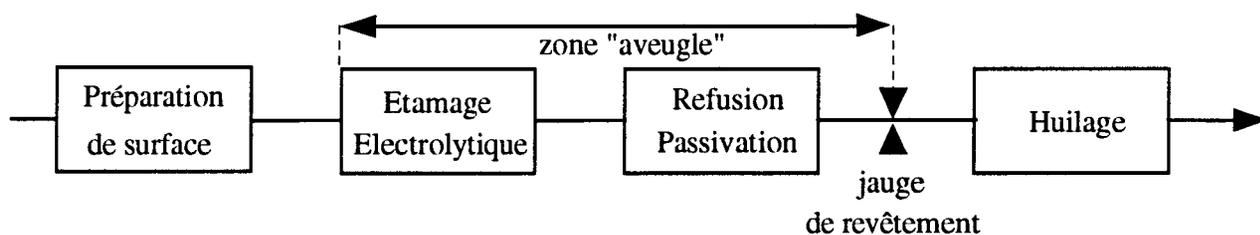


Figure IV.1 : Partie centrale de la ligne d'étamage.

Cela signifie que pour chaque changement du produit sur la ligne de production, plusieurs centaines de mètres de bandes sont déjà étamés lorsque la jauge envoie à la régulation la première valeur de taux réalisé.

La nécessité d'avoir un modèle mathématique capable de prédire le rendement correspondant aux conditions initiales de fonctionnement est donc indispensable pour une régularité continue du revêtement. Il devra prendre en compte tous les paramètres influents [GUY2-90], être robuste face aux variations de l'environnement, et donner une précision dans le résultat qui soit supérieure aux tolérances admissibles de [-10%;+10%] par rapport au taux visé.

Ce chapitre retrace la démarche suivie pour définir ce modèle qui commence par un état des lieux de la situation antérieure, la mise en évidence des paramètres influents, une première approche linéaire et enfin le développement d'un modèle neuronal [DES-98].

II/ ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

La détermination du rendement à appliquer lors des premiers mètres d'étamage était obtenue par une table stockée sur Vax. Trois paramètres d'entrée étaient pris en considération :

- ✓ la vitesse de la ligne
- ✓ le taux visé en face supérieure
- ✓ le taux visé en face inférieure.

La mise à jour de cette table se faisait à chaque poste en corrigeant, pour chaque cas, la valeur du rendement stocké en fonction de la moyenne des rendements mesurés pour ce même cas au cours du poste écoulé. Le but de cette remise à jour était de donner un sens adaptatif au modèle, en suivant les dérives liées à l'environnement du processus d'étamage (électrolyte, température, etc.). Mais plusieurs inconvénients découlent de ce fonctionnement :

➤ D'une part les remises à jours de la table permettaient d'adapter l'estimation du rendement aux fluctuations des paramètres extérieurs, mais il s'agissait d'une réaction à posteriori. A chaque nouvelle utilisation de la table, la valeur de référence est celle correspondant à l'environnement précédent, qui n'est pas forcément identique à l'environnement actuel.

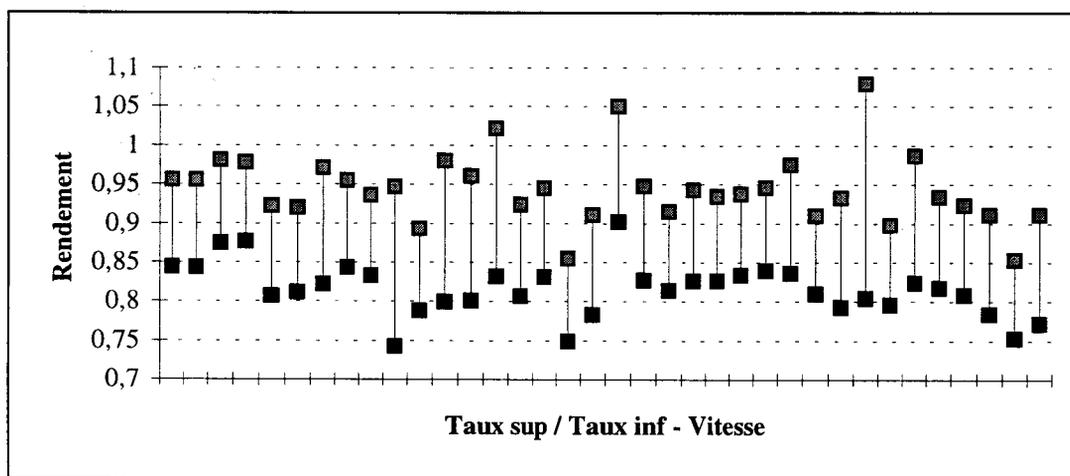


Figure IV.2 : Dispersion des rendements de la table du Vax.

➤ D'autre part, la Figure IV.2 montre la dispersion existant sur les valeurs de rendements de la table, d'une utilisation à une autre. Les écarts entre deux rendements correspondant au même vecteur d'entrée (taux sup - taux inf - vitesse) pris à deux moments différents dépassent régulièrement les 10%. C'est à dire que pour un même taux visé et une même vitesse, d'une campagne à une autre le rendement de départ sera différent dans un rapport supérieur à 10%. Cette dispersion entraîne forcément des incertitudes sur le taux d'étain déposé, pouvant entraîner des sous ou des sur étamage en début de bobine. Le vecteur d'entrée ne prend donc pas en considération suffisamment de paramètres pour définir complètement l'évolution du rendement global de la ligne. Notamment les variables qui définissent la densité de courant de travail, les concentrations liées à l'électrolyte, sa température, et qui jouent un rôle non négligeable.

III/ DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE

III/ 1. VITESSE :

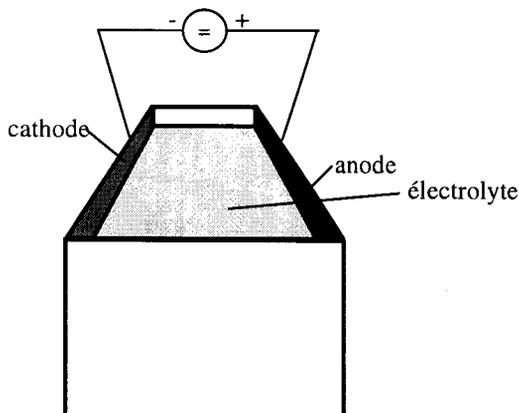
Elle a une importance primordiale dans l'agitation du bain dont le rendement dépend pour une grande part.

III/ 2. TAUX VISÉ (FACE SUPÉRIEURE ET INFÉRIEURE) :

III/ 2.1. Taux visé par face :

La mise en évidence de l'influence du taux visé dans le rendement est faite par des essais d'étamage dans une cellule rectangulaire qui peut s'apparenter au test de la cellule de Hull, utilisées pour tester la souplesse de l'électrolyte.

Il s'agit ici d'étamer une plaque d'acier suivant le schéma de la figure IV.3 et de mesurer le taux déposé par une pesée de cette plaque avant et après la période d'exposition. De part la loi de Faraday le taux déposé est directement proportionnel au temps d'électrolyse, c'est donc sur la variation de la durée de passage du courant que les essais sont basés.



Dimensions de la cellule :

- hauteur d'électrolyte : 50 mm
- largeur de la cellule : 100 mm
- distance entre les électrodes : 65 mm
- volume d'électrolyte : 340 ml
- surface étamée : 0.5 dm²

Figure IV.3 : Cellule de Hull modifiée

Les étapes préparatrices à ces essais sont celles mises au point par le laboratoire fer blanc pour la réalisation des essais en cellules de HULL : la cathode est dégraissée par arrosage au solvéthane et à l'acétone, rincée à l'eau déminéralisée, décapée par immersion durant une minute dans une solution d'HCL à 10%, à nouveau rincée abondamment, et enfin séchée. Le courant appliqué entre les électrodes est resté constant et égal à 10 A. La densité sur la bande est donc de 20 A/dm², valeur qui entre dans les fourchettes de fonctionnement données par le procédé Ferrostan de U.S.Steel.

Le temps d'électrolyse est échelonné à cinq valeurs : 10s, 25s, 50s, 90s, et 120s qui correspondent donc à cinq taux différents. Les rendements issus des pesées de chaque échantillon sont présentés Figure IV.4.

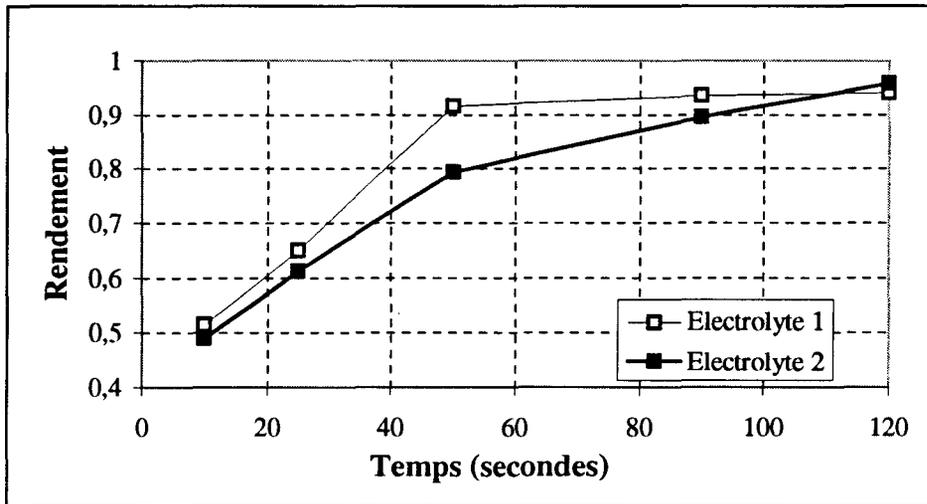


Figure IV.4 : Évolution du rendement en fonction du taux visé.

L'évolution du rendement est très liée au taux visé. Il est très faible pour un court temps d'électrolyse car au départ du phénomène la surtension de l'hydrogène sur l'acier est beaucoup plus forte que celle de l'étain sur l'acier. Il y a donc réduction des ions H^+ en H_2 (dégagement d'hydrogène). Lorsque le temps d'électrolyse augmente, un dépôt d'étain commence à se former et la nature de la cathode est alors modifiée : tandis que la surtension de l'étain ne change pas, celle de l'hydrogène par contre est fortement accrue ce qui réduit le dégagement gazeux et améliore le rendement.

Effectivement, lors des essais, on pouvait observer en début d'électrolyse une forte remontée de bulles avec formation de mousse à la surface de l'électrolyte, le tout accompagné d'un dégagement gazeux. Puis, au fur et à mesure de l'électrolyse, ce phénomène diminuait très fortement.

III/ 2.2. Influence des rendements différentiels :

Comme le montre la Figure IV.5, qui présente le rendement de la face supérieure en fonction du rapport entre le taux visé de la face supérieure et le taux de la face inférieure, il existe une interaction entre les faces pour les revêtements différentiels avec une diminution du rendement de la face riche au profit de la face pauvre .

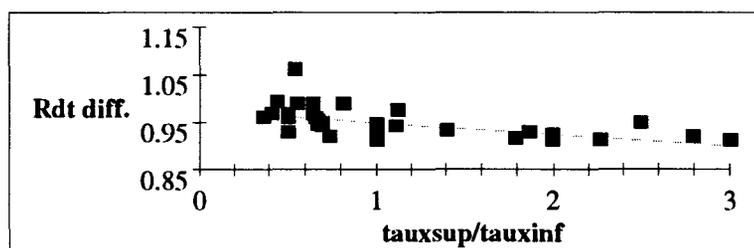


Figure IV.5 : Évolution du rendement différentiel.

III/ 3. LARGEUR ET ÉPAISSEUR DE BANDE :

Ces deux paramètres qui, associés, définissent la section de la bande, modifient la résistance de la bande qui entre en considération dans la saturation des redresseurs. D'autre part, la largeur conditionne la densité de courant maximale sur la bande. Pour se rendre compte de ce phénomène, une observation simple de l'ensemble de la production en fonction du type de produit (SR-DR8 ou DWI) montre les tendances des rendements (Figure IV.6).

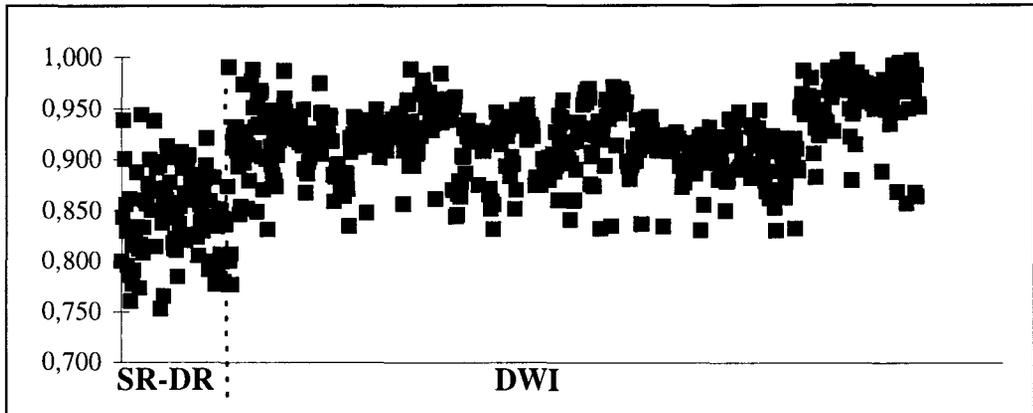


Figure IV.6 : Rendement en fonction du type de produit.

Il ne s'agit ici que d'une observation moyenne sans justification rigoureuse car tous les paramètres ne sont pas fixes. Néanmoins, d'une manière générale, le produit DWI concerne des grandes largeurs (>1100mm) et des épaisseurs moyennes ($\approx 0.25\text{mm}$) alors que les autres produits ont des formats moins larges et des épaisseurs variant entre 0.15 et 0.4 mm.

III/ 4. $[\text{Sn}^{2+}]$, $[\text{H}^+]$, TEMPÉRATURE DE L'ÉLECTROLYTE :

Ces grandeurs définissent la résistivité de l'électrolyte qui entre en ligne de compte pour la saturation des redresseurs. L'association de la concentration en ions stanneux et de la température va déterminer la densité de courant optimal d'étamage. D'autre part si l'on se réfère aux résultats en cellule de Hull (Figure IV.4) les essais réalisés avec deux électrolytes différents donnent des rendements différents qui prouvent l'importance de ces paramètres.

III/ 5. INTENSITÉ DES PONTS :

L'intensité de référence des redresseurs conditionne directement la densité de courant sur la bande. Si celle ci est déterminante dans la qualité du dépôt il en est de même pour le rendement de l'électrolyse. Toutefois, ce résultat est plus difficile à mettre en évidence en ligne car la technique de régulation commande une intensité de référence maximale.

III/ 6. CONCLUSION :

Le tableau de la figure IV.7 regroupe les coefficients de corrélations linéaires entre les neuf paramètres recensés comme étant les plus influents en fonction des deux faces.

Les évolutions des rendements présentées précédemment montrent clairement que les limites de précision de l'ancienne table sont liées à un nombre de paramètres d'entrée insuffisant.

La construction d'une base de données de 12000 cas relevés sur une période de 8 mois sert de support dans la détermination du modèle.

Chaque itération de cette table renseigne sur :

- * les rendements de la face supérieure et de la face inférieure lues par la jauge
- * la largeur et l'épaisseur de la bande
- * les taux visés en face supérieure et en face inférieure
- * la température et le rapport de concentration ($\text{Sn}^{2+}/\text{H}^+$) de l'électrolyte
- * la vitesse de la ligne
- * les intensité de référence des redresseurs de chaque face

Ces paramètres sont les plus influents dans l'évolution du rendement et c'est donc à partir de cette base de données que vont pouvoir être calculé les différents modèles.

	vit	τ sup.	τ inf	épai	t°	I _{sup}	larg	I _{inf}	[$\text{Sn}^{2+}/\text{H}^+$]
rdt sup	-0,51	0,46	0,26	0,18	0,16	0,13	0,11	0,09	-0,08
rdt Inf	-0,54	0,48	0,29	0,26	0,21	0,17	0,16	0,14	-0,07

Figure IV.7 : Coefficients de corrélation des paramètres influents.

L'ordre décroissant d'importance montre que le modèle existant prenait en compte les trois valeurs les plus influentes (vitesse, et taux de chaque face) mais l'intégration des six autres va permettre d'aboutir à de meilleurs résultats.

IV/ APPROCHE LINÉAIRE

IV/ 1. INTRODUCTION :

IV/ 1.1. Formulation générale :

La première approche de modélisation du rendement de la ligne d'étamage est linéaire. Le modèle est une régression multiple de la forme [GRA-92]:

$$s(i) = a_0 + a_1 \cdot x_1(i) + a_2 \cdot x_2(i) + \dots + a_p \cdot x_p(i) \quad (IV.3)$$

avec :

- $s(i)$: l'estimation du modèle pour l'observation i
- x_1, x_2, \dots, x_p : les variables explicatives (paramètres d'entrée)
- a_0, a_1, \dots, a_p : les coefficients du modèles, calculés de façon à minimiser le critère J des moindres carrés suivant la formule :

$$J = \sum_{i=1}^n (s(i) - y(i))^2 \quad (IV.4)$$

$y(i)$ représente le rendement à modéliser pour l'élément i de la base de donnée qui en contient $n=5650$.

IV/ 1.2. Critères de précision :

✓ Le premier élément pour juger de la précision du modèle linéaire est le coefficient de détermination R^2 [KRI-96] défini par :

$$R = \text{cor}(S, Y) \quad (IV.5)$$

C'est un nombre compris entre 0 et 1, qui représente la qualité de l'ajustement du modèle. En pratique, une bonne estimation d'un modèle se traduit par une valeur de R^2 supérieure à 0,90. L'approche peut être considérée encourageante si $R^2 > 0,55$.

✓ Le second terme est un test d'hypothèse qui permet de déterminer si un coefficient de pente intervient dans l'estimation. Il se calcul par :

$$t = \frac{\text{valeur estimée du paramètre}}{\text{écart type d'estimation}} \quad (IV.6)$$

Un coefficient sera jugé significatif si sa t-valeur dépasse celle donnée par les tables de statistiques [HOE-84] qui est 1,96 (pour $\alpha=0.05$).

✓ Ces tests s'accompagnent de l'observation du critère J appelé par la suite SSE (Sum Squarred Error).

IV/ 1.3. Premier modèle linéaire :

Le premier modèle est une approximation linéaire simple calculée à partir des neuf paramètres d'entrée jugés influents :

- * vit : la vitesse de la ligne
- * τ_{inf} : taux visé de la face inférieure
- * τ_{sup} : taux visé de la face supérieure
- * épai : l'épaisseur de la bande
- * larg : la largeur de la bande
- * con : le rapport de concentration (Sn^{2+}/H^+) de l'électrolyte
- * t° : la température de l'électrolyte
- * i_{inf} : l'intensité de référence des redresseurs de la face inférieure
- * i_{sup} : l'intensité de référence des redresseurs de la face supérieure

Les résultats des t-valeurs de chaque coefficient sont exposés figure IV.8, avec en plus, la constante cte et, dans la dernière colonne, la valeur du R^2 associé au modèle. Une régression a été faite pour chacune des deux faces (Sup et Inf).

	vit	τ_{inf}	τ_{sup}	épai	larg	con	t°	i_{inf}	i_{sup}	cte	R^2
Face Sup	-29.27	7.52	22.98	6.57	2.69	-5.20	-5.11	0.85	7.08	53.01	0.41
Face Inf	-16.14	8.25	51.46	4.78	14.77	-4.11	-1.80	13.70	-2.19	56.59	0.58

Figure IV.8 : Résultats du modèle 1

La première constatation est que l'approche linéaire telle qu'elle est définie ne modélise pas de façon satisfaisante l'évolution des rendements. En effet, les valeurs des R^2 de chaque face sont trop faibles pour que cette solution soit retenue.

En ce qui concerne l'observation des valeurs des tests t, ils sont presque tous supérieurs à la limite de 1.96 ce qui démontre l'influence des variables choisies. La seule valeur plus faible concerne l'influence de l'intensité de référence de la face inférieure sur le calcul du rendement de la face supérieure. Intuitivement, il est facilement compréhensible que l'intensité de courant d'une face influence plus le rendement de cette même face que celui de la face opposée. Toutefois, pour des raisons de symétrie et de facilité de mise en œuvre, tous les paramètres seront conservés dans cette modélisation pour la suite de l'étude.

Les calculs complémentaires présentés figure IV.9 serviront de comparaisons avec les modèles linéaires et non linéaires qui seront présentés ultérieurement.

	SSE	écart type de l'erreur	erreur minimale	erreur maximale
Face sup	6.0839	0.0334	-0.18	-0.20
Face inf	5.9057	0.0267	0.20	0.36

Figure IV.9 : Performances du modèle 1

Une première critique permet déjà de souligner l'imprécision du modèle qui provoque des écarts avec la réalité de plus de 10 % alors que les fourchettes de tolérances que doit atteindre la nouvelle régulation autorisent des variations maximales de la régularité du taux déposé comprises dans l'intervalle [-10% ;+10%].

IV/ 1.4. Second modèle linéaire :

Pour cette deuxième étude, on introduit dans le modèle 2 les paramètres explicatifs des termes quadratiques ainsi que certaines combinaisons entre les paramètres principaux.

Cependant, il serait trop exhaustif de faire apparaître tous les termes quadratiques ainsi que toutes les combinaisons entre les paramètres. C'est pourquoi seules les plus pertinentes sont sélectionnées :

- * vit² : la vitesse de la ligne
- * τ_{inf}² : taux visé de la face inférieure
- * τ_{sup}² : taux visé de la face supérieure
- * τ_{sup}/τ_{inf} : prise en compte des rendements différentiels
- * épai*larg : effet de la section de la bande

Les résultats des t-valeurs de chaque coefficient sont exposés figure IV.10, avec en plus, la constante cte et, dans la dernière colonne, la valeur du R² associé au modèle. Une régression a été faite pour chacune des deux faces (Sup et Inf).

	vit	τ _{sup}	τ _{inf}	t°	épai	larg	i _{inf}	i _{sup}
Face sup	15.04	16.24	3.32	-5.64	4.82	3.63	-1.05	13.59
Face inf	12.17	-16.12	33.55	5.72	9.82	9.48	22.93	-4.45

	con	vit ²	τ _{sup} ²	τ _{inf} ²	τ _{sup} /τ _{inf}	épai*larg	cte	R ²
Face sup	-11.72	-19.53	-35.62	0.56	1.26	-2.03	15.99	0.5914
Face inf	-5.81	-19.35	30.58	-29.70	19.32	-7.28	15.43	0.6909

Figure IV.10 : Résultats du modèle 2

Les valeurs des coefficients R² de chacune des faces sont sensiblement meilleures que pour le premier modèle. La pertinence des paramètres ajoutés est réelle puisque les valeurs de test t associées sont supérieures à 1,96.

Les calculs complémentaires présentés figure IV.11 serviront pour la comparaison avec les modèles linéaires et non linéaires qui seront présentés ultérieurement.

	SSE	écart type de l'erreur	erreur minimale	erreur maximale
Face sup	4.0436	0.0273	-0.11	0.15
Face inf	3.6403	0.0261	-0.14	0.20

Figure IV.11 : Performances du modèle 2

Les résultats sont également meilleurs que pour le modèle 1. Les valeurs de SSE sont nettement inférieures, tout comme les écarts types des erreurs. Mais cela n'est toujours pas satisfaisant car le critère de précision strictement inférieur à 10 % n'est pas respecté.

Plutôt que de tester d'autres dépendances éventuelles entre les différents paramètres, il est préférable de s'orienter vers une modélisation capable de prendre en considération des influences et des non linéarités plus compliquées.

V/ MODÉLISATION PAR RÉSEAUX DE NEURONES

Une modélisation linéaire classique ne donnant pas de résultats suffisamment robustes, il faut s'orienter vers une approche non linéaire. Le problème est donc de fabriquer un modèle mathématique qui ait une structure suffisamment souple pour pouvoir tenir compte de toutes les dépendances entre les variables influentes du processus, qu'elles soient linéaires ou non linéaires. Les techniques basées sur l'utilisation de réseaux de neurones conviennent parfaitement à ce type de solution [DOH-94] [DZI-94].

Il existe de nombreuses méthodes de modélisation neuronale et la diversité des structures et des fonctions d'activations est étendue [HER-94] [ABD-94]. Ne sont présentés ici que les deux types de neurones utilisés pour l'étude.

V/ 1. FONCTIONNEMENT D'UN NEURONE :

Il s'agit du modèle présenté par Mc Culloch et Pitts. S'inspirant de leurs travaux sur les neurones biologiques, ils ont proposés le modèle suivant [JOD-94]:

Un neurone formel fait une somme pondérée des potentiels d'actions qui lui parviennent. Si cette somme, appelée fonction d'entrée totale du neurone, dépasse un certain seuil, le neurone est activé et transmet une réponse dont la valeur est celle de son activation. Si le neurone n'est pas activé il ne transmet rien.

La structure utilisées pour cette étude est la suivante:

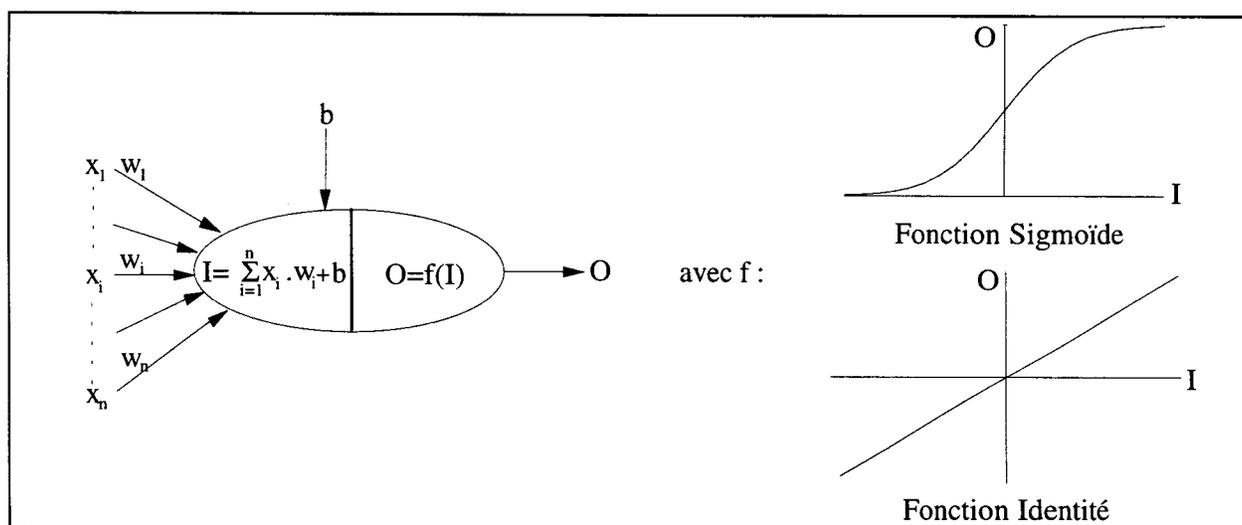


Figure V.12: Schéma descriptif d'un neurone.

Il est d'usage de décomposer le neurone en deux parties :

$$\checkmark \text{ la fonction d'entrée totale du neurone } I = \sum_i x_i \cdot w_i + b \quad (\text{IV.8})$$

avec b le biais et x_i les entrées pondérées par des poids w_i .

✓ une sortie appelée fonction d'activation $O=f(I)$ qui sera ici, soit la fonction identité $O = I$, soit une fonction sigmoïde $E = \frac{1}{1 + \exp(-I)}$. (IV.9)

Remarque : La fonction identité fait jouer à la couche une fonction purement linéaire. Toutes les tendances non linéaires seront modélisées par la fonction sigmoïde, fonction classique dans l'utilisation des réseaux de neurones [CYB-89] qui a l'avantage d'être bornée.

V/ 2. STRUCTURE DU RÉSEAU NEURONAL :

Les neurones peuvent être associés en couches dont le nombre varie suivant les applications. De même, plusieurs niveaux de connexions existent selon les réseaux considérés [DAV-91]. Pour cette étude, on utilise des réseaux de type "feedforward" (les sorties des neurones d'une couche sont connectées aux entrées de tous les neurones de la couche suivante), et structurés en trois couches (Figure IV.13):

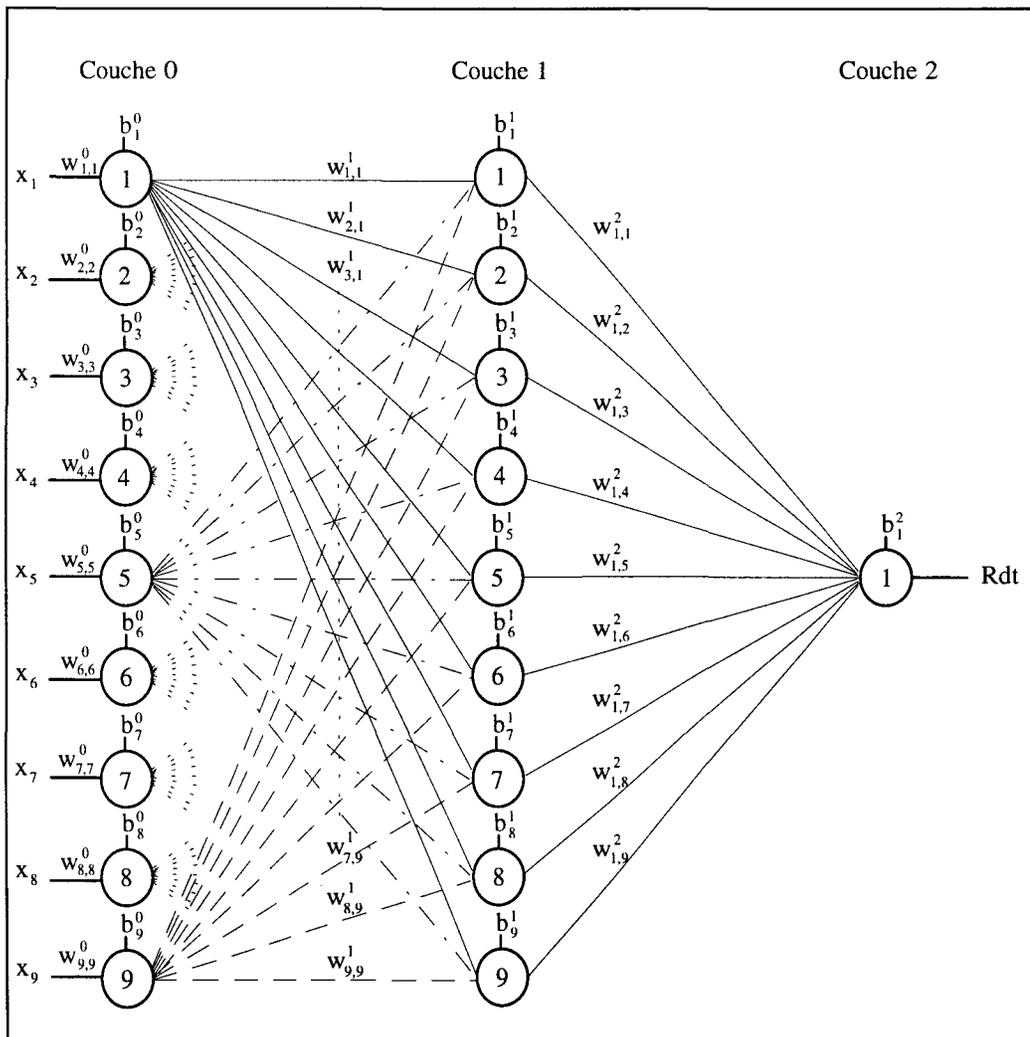


Figure IV.13 : Structure du réseau de la face supérieure:

- ✓ Une couche d'entrée repérée par l'indice 0 et constituée de neuf neurones dont les fonctions d'activations sont des fonctions identité.
- ✓ Une couche cachée repérée par l'indice 1 et constituée dans un premier temps de neuf neurones dont les fonctions d'activations sont des fonctions sigmoïdes.
- ✓ Une couche de sortie repérée par l'indice 2 et constituée d'un seul neurone dont la fonction d'activation est la fonction identité.

Le modèle se décompose en deux réseaux, un pour le rendement de la face supérieure et un pour celui de la face inférieure. Leurs structures sont identiques, seule la sortie diffère. Par la suite les démonstrations ne seront données que pour la face supérieure.

Une fois la structure du réseau établie, il faut définir les valeurs des poids w_{ij} liant chaque couche, ainsi que celles des biais de chaque neurone afin d'avoir en sortie une réponse la plus proche possible du rendement réel.

V/ 3. DÉTERMINATION DES POIDS DU RÉSEAU DE NEURONES :

V/ 3.1. Couche d'entrée :

Paramétrage des données :

Les grandeurs arithmétiques des paramètres d'entrée sont différentes les unes des autres, autant dans leurs rapports que dans l'étendue de leur plage d'évolution. Pour éviter de privilégier une entrée par rapport à une autre sur le plan des échelles on a recours à une modification classique en statistique de centrage et de réduction des données [MON-97] [DRO-92].

Centrer les données consiste à ramener le nuage de points du paramètre i (pour i allant de 1 à n) à une moyenne nulle afin de supprimer toute composante parasite continue.

Il s'agit donc de soustraire à chaque composante $X_i(\alpha)$ du vecteur d'entrée sa moyenne arithmétique \bar{X}_i :

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n X_i(\alpha) \quad (\text{IV.10})$$

La variable est ensuite réduite afin de mieux représenter la dynamique des grandeurs, en la divisant par son écart type σ_i :

$$\sigma_i = \sqrt{(X_i(\alpha) - \bar{X}_i)^2} \quad (\text{IV.11})$$

Le $i^{\text{ème}}$ paramètre du vecteur d'entrée centré et réduit, relatif à l'exemple α s'exprimera donc de la façon suivante:

$$O_i(\alpha) = \frac{(I_i(\alpha) - \bar{I}_i)}{\sigma_i} \quad (\text{IV.12})$$

Calcul des poids de la couche 0 :

Le rôle de la couche d'entrée étant le paramétrage des vecteurs d'entrées en données centrées et réduites, on voit tout de suite que pour avoir :

$$O_i(\alpha) = w_{i,i}^0 \cdot I(\alpha) + b_i^0 \quad \text{avec } 1 \leq \alpha \leq n \text{ et } 1 \leq i \leq 9$$

(IV.13)

il suffit de poser :

$$w_{i,i}^0 = \frac{1}{\sigma_i} \quad \text{et} \quad b_i^0 = \frac{-\bar{I}_i}{\sigma_i}$$

(IV.14)

Les poids de la couche d'entrée du réseau sont donc déterminés directement à partir de la base de données historique des échantillons.

V/ 3.2. Couche cachée et couche de sortie :

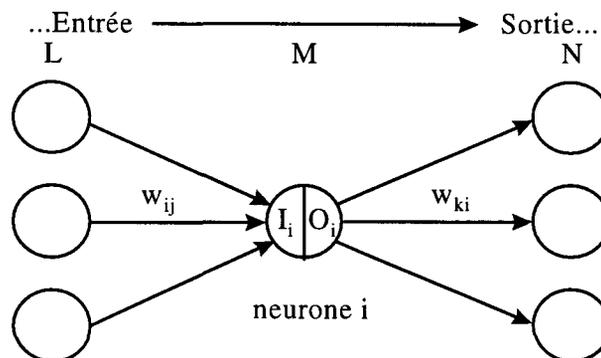
Si le calcul des poids et des biais de la couche d'entrée est relativement simple, celui des paramètres des autres couches demande une phase de réglage itérative dont la durée dépend de la précision que l'on veut obtenir pour le modèle. Cette phase, nommée phase d'apprentissage est faite suivant la méthode de rétropropagation du gradient de l'erreur.

Algorithme d'apprentissage :

Le principe de cet algorithme est que, de même que l'on est capable de propager un signal depuis l'entrée jusque la sortie, on peut, en suivant le chemin inverse, rétro propager l'erreur commise en sortie vers les couches internes, afin d'optimiser le réglage des poids liant les neurones [HER-91].

Considérons pour la démonstration les notations suivantes :

- * $X = (X_1, \dots, X_n)$ est le vecteur des entrées du réseau
- * $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$ est le vecteur des sorties du réseau
- * $S = (S_1, \dots, S_n)$ est le vecteur des sorties estimées du modèle
- * f est la fonction d'activation du neurone
- * $e(k)$ est le pas du gradient à l'étape k
- * O_j est la sortie du neurone j
- * I_i est l'entrée du neurone i , $I_i = \sum_j W_{ij} \cdot O_j + b_i$



L'erreur commise sur un passage complet de l'ensemble des itérations est :

$$E(W) = \sum_k E^k(W) \quad (IV.15)$$

où $E^k(W)$ est l'erreur commise à un instant k donné parmi les m exemples disponibles :

$$E^k(W) = (S^k - Y^k)^2 = \sum_{i=1}^m (S_i^k - Y_i^k)^2 \quad (IV.16)$$

L'algorithme de rétropropagation consiste à effectuer une descente de gradient sur $E(W)$. En général, une version qui en est une approximation est utilisée, où la modification de chacun des poids après chaque passage d'un exemple k est faite suivant la formule :

$$W_{ij}(k) = W_{ij}(k-1) - e(k) \cdot \frac{\partial E^k}{\partial W_{ij}} \quad (IV.17)$$

Il faut donc calculer pour tous les poids W_{ij} le gradient de E^k :

$$\frac{\partial E^k}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial E^k}{\partial I_i} \cdot \frac{\partial I_i}{\partial W_{ij}} \quad (IV.18)$$

Or
$$\frac{\partial I_i}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial (\sum_p W_{ip} \cdot O_p + b_i)}{\partial W_{ij}} = O_j \quad (IV.19)$$

En effet, l'indice p portant sur des neurones appartenant à la couche précédant celle de i , les sorties O_p de ces neurones ne dépendent pas de W_{ij} .

On obtient donc
$$\frac{\partial E^k}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial E^k}{\partial I_i} \cdot O_j \quad (IV.20)$$

ou, si l'on note $d_i = \frac{\partial E^k}{\partial I_i}$:

$$\frac{\partial E^k}{\partial W_{ij}} = d_i \cdot O_j \quad (IV.21)$$

Soit encore, en utilisant (IV.3) et (IV.7) :

$$W_{ij}(k) = W_{ij}(k-1) - e(k) \cdot d_i \cdot O_j \quad (IV.22)$$

Pour un neurone i de la couche de sortie, d_i s'exprime de la façon suivante :

$$d_i = \frac{\partial (\sum_j (S_j^k - Y_j^k)^2)}{\partial I_i} = 2 \cdot (S_i^k - Y_i^k) \cdot \frac{\partial S_i^k}{\partial I_i} \quad (IV.23)$$

En effet, seul S_i^k dépend de I_i . Comme de plus $S_i^k = f(I_i)$, il vient :

$$d_i = 2 \cdot (S_i^k - Y_i^k) \cdot f'(I_i) \quad (IV.24)$$

Pour un neurone de la couche cachée, la relation s'écrit :

$$d_i = \sum_h \frac{\partial E^k}{\partial I_h} \cdot \frac{\partial I_h}{\partial I_i} = \sum_h d_h \cdot \frac{\partial I_h}{\partial I_i} \quad (IV.25)$$

où l'indice h porte sur les neurones pour lesquels le neurone i envoie des connexions. En effet, les entrées I_h des autres neurones ne dépendent pas de I_i .

On a donc :

$$d_i = \sum_h d_h \cdot \frac{\partial I_h}{\partial O_i} \cdot \frac{\partial O_i}{\partial I_i} \quad (IV.26)$$

$$\text{Or, } \frac{\partial I_h}{\partial O_i} = \frac{\partial(\sum_p W_{hp} \cdot O_p + b_h)}{\partial O_i} = W_{hi} \quad (\text{IV.27})$$

car p portant sur les neurones qui envoient une connexion vers h, ceux-ci sont situés sur la même couche que i et donc les O_p ne dépendent pas de O_i (pour p différent de i). Comme de plus $O_i=f(I_i)$, on obtient finalement :

$$d_i = \sum_h d_h \cdot W_{hi} \cdot f'(I_i) \quad (\text{IV.28})$$

De la même façon que pour la formule (IV.3), la modification des biais d'un exemple k est :

$$b_i(k) = b_i(k-1) - e(k) \cdot \frac{\partial E^k}{\partial b_i} \quad (\text{IV.29})$$

Il faut donc calculer pour tous les biais b_i le gradient de E^k :

$$\frac{\partial E^k}{\partial b_i} = \frac{\partial E^k}{\partial I_i} \cdot \frac{\partial I_i}{\partial b_i} \quad (\text{IV.30})$$

$$\text{Or } \frac{\partial I_i}{\partial b_i} = \frac{\partial(\sum_p W_{ip} \cdot O_p + b_i)}{\partial b_i} = 1 \quad (\text{IV.31})$$

$$\text{On obtient donc } \frac{\partial E^k}{\partial b_i} = \frac{\partial E^k}{\partial I_i} = d_i \quad (\text{IV.32})$$

$$\text{Soit encore, en utilisant (IV.29) et (IV.32) : } b_i(k) = b_i(k-1) - e(k) \cdot d_i \quad (\text{IV.33})$$

La règle de modification des poids à la représentation numéro k de l'exemple X est donc :

$$W_{ij}(k) = W_{ij}(k-1) - e(k) \cdot d_i \cdot O_j$$

$$b_i(k) = b_i(k-1) - e(k) \cdot d_i$$

avec :

$$d_i = 2 \cdot (S_i^k - Y_i^k) \cdot f'(I_i) \quad \text{pour la couche de sortie}$$

$$d_i = \sum_h d_h \cdot W_{hi} \cdot f'(I_i) \quad \text{pour les couches cachées}$$

ou h porte sur les neurones vers lesquels i envoie une connexion.

Cette phase d'apprentissage peut être accélérée en introduisant des termes complémentaires comme le momentum [PLA-86] ou par adaptation au fur et à mesure du pas d'apprentissage [VOG-88].

Les différentes phases d'apprentissage qui vont maintenant être présentées ont été réalisées à partir des modules neuronaux existant sur le logiciel Matlab.

Critère de convergence :

L'arrêt de la phase d'apprentissage est conditionné par un critère de précision du modèle que l'on veut atteindre et qui se définit comme étant la somme des écarts quadratiques entre la sortie réelle (Y) et la sortie modélisée (S):

$$SSE = \sum_{i=1}^n (S(i) - Y(i))^2 \quad (\text{IV.34})$$

V/ 3.3. Description de la base d'apprentissage :

La base de données complète à disposition a été réalisée sur une période de six mois depuis juin jusque novembre 1996, ce qui représente près de 10000 bobines pour la simulation. Elle ne tient compte que des bobines étamées en régime permanent (qui n'ont subi aucun transitoire durant leur passage).

La base d'apprentissage, qui sert au réglage des poids du réseau neuronal, a été extraite de cette base. Le premier critère de sélection pour qu'un échantillon appartienne à la base d'apprentissage est d'avoir un écart maximum entre le taux visé et le taux réalisé compris dans l'intervalle $]-1\%; +1\%[$ (valeurs moyennes sur l'ensemble de la bobine). On considère ainsi que les rendements (face supérieure et face inférieure) associés aux paramètres d'entrées sélectionnés sont compatibles et donnent un résultat correct.

Dans un second temps, la base de données est réduite de façon à ne garder que des exemples uniques. Si plusieurs cas ont des vecteurs d'entrées identiques le rendement gardé est la moyenne des rendements des exemples identiques. Ces mesures permettent de réduire la base d'apprentissage à 1390 éléments.

V/ 4. RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS :

V/ 4.1. Identification à partir de la base d'apprentissage :

L'identification a été réalisée sur quatre réseaux qui diffèrent uniquement par le nombre de neurones de la couche cachée. L'algorithme de rétropropagation du gradient de l'erreur, est lancé sur 10000 itérations, à partir de la base réduite de 1390 éléments.

L'allure de la SSE au cours des apprentissages présenté figure IV.14.

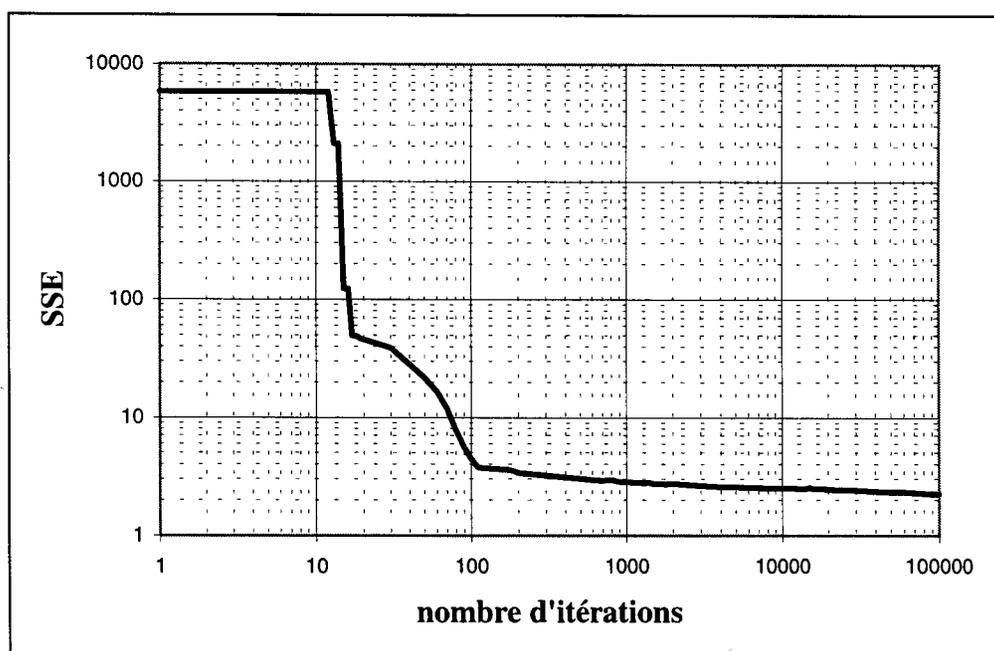


Figure IV.14 : Convergence de l'apprentissage du réseau

La convergence est très rapide au départ, puis la SSE diminue plus lentement. Toutefois, comme le montre le récapitulatif des essais en cours d'apprentissage du réseau à neuf neurones (figure IV.15), il est important de ne pas s'arrêter au début du palier situé vers la centième itération car la convergence y est insuffisante pour garantir une précision dans les tolérances de [-10%;+10%]. Le réseau est considéré optimal au bout de 100000 itérations, compromis au delà duquel le temps de calcul devient trop important face au gain en précision qui est alors pratiquement nul. En effet à ce niveau les écarts entre la réalité et la simulation (erreur résiduelle du réseau) sont l'image des incertitudes sur la mesure des paramètres d'entrée d'une part et du rendement réel (lecture de la jauge) d'autre part. Il est donc inutile de pousser plus loin l'apprentissage.

Nombre d'itérations	100	1000	10000	100000
Erreur moyenne absolue	0.038	0.034	0.028	0.026
Écart type de l'erreur	0.050	0.043	0.036	0.026
Erreur < 10%	95%	98%	100%	100 %
Erreur < 5%	72%	76%	89%	96 %

Figure IV.15 : Résultats intermédiaires au cours de l'apprentissage (réseau de 9 neurones)

Les critères retenus pour quantifier la précision et la robustesse des différents réseaux sont au nombre de six :

- ✓ SSE : somme des écarts au carré (cf. IV.34)
- ✓ Moyenne : moyenne arithmétique des écarts
- ✓ Moy_abs : moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts
- ✓ Écart type : écart type de l'erreur résiduelle
- ✓ Écart max : Erreur maximale du modèle
- ✓ Écart min : Erreur minimale du modèle

Les apprentissages de chacun des réseaux donnent les résultats suivants :

Nb de neurones	SSE	Moyenne	Moy_abs	Écart type	Écart Max	Écart Min
5	1,1500	0,00083	0,0288	0,02877	0,150	-0,090
7	1,1187	0,00080	0,0284	0,02777	0,093	-0,081
9	0,9498	0,00068	0,0261	0,02615	0,093	-0,092
11	0,9761	0,00070	0,0265	0,02646	0,161	-0,102
15	0,9526	0,00069	0,0262	0,02617	0,099	-0,085

Figure IV.16 : Résultats des réseaux sur la base d'apprentissage

Les cinq réseaux ont des moyennes bien centrées autour de 0. En considérant la SSE et les écarts extrêmes, deux se dégagent : le réseau à neuf neurones et celui à quinze neurones sur la couche interne.

Les performances de ces deux réseaux face à la base d'apprentissage sont pratiquement identiques, on remarque les erreurs maximales et minimales sont inférieures aux fourchettes de précision imposée de [-10% ;+10%], et la SSE donne un léger avantage au réseau à neuf neurones.

De plus, au delà de la SSE plus faible, le réseau composé de neuf neurones, par sa taille plus petite, nécessite, dans son utilisation, un nombre de calculs inférieur à celui requis pour le réseau à quinze neurones. Cet avantage est très important pour un fonctionnement du réseau en temps réel sur la ligne.

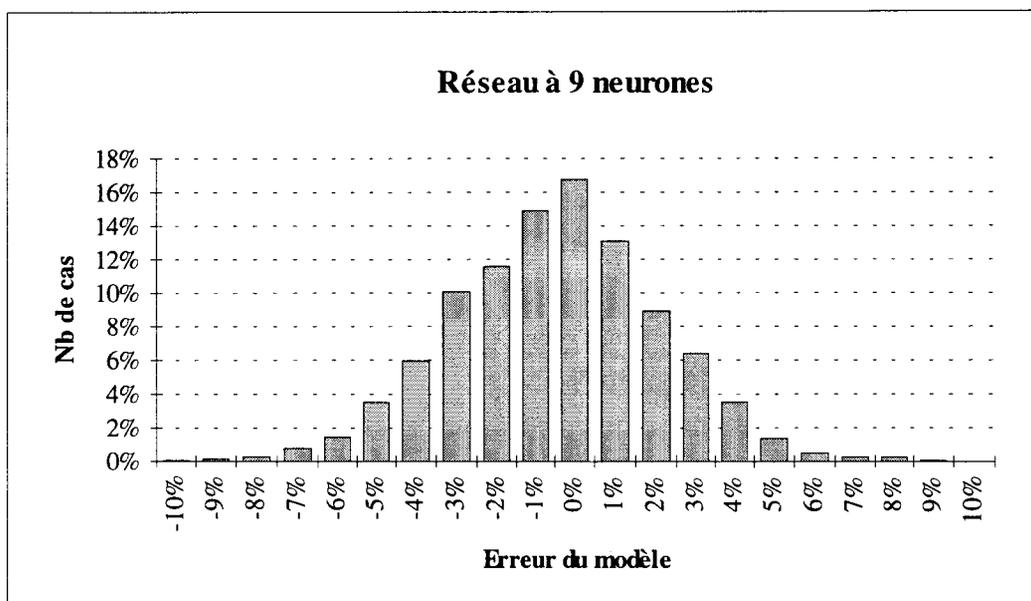


Figure IV.17 : Performances du modèle à 9 neurones sur la base d'apprentissage

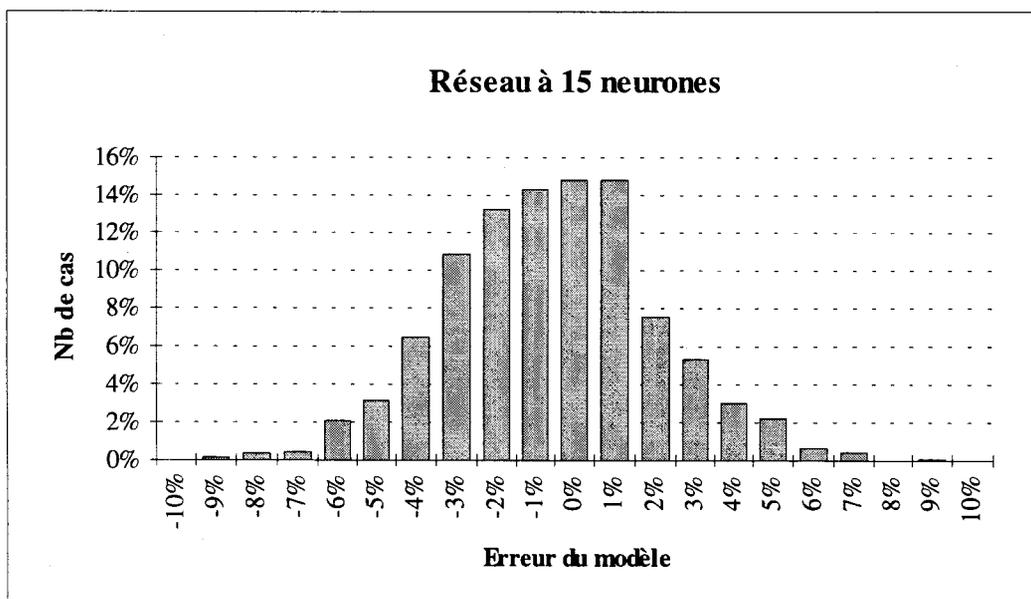


Figure IV.18 : Performances du modèle à 15 neurones sur la base d'apprentissage

Les histogrammes de répartition de l'erreur pour les deux meilleurs modèles (Figures IV.17 et IV.18) montrent une allure plus symétrique pour le modèle à neuf neurones. Ce dernier donne une erreur dans des fourchettes de $[-5\% ; +5\%]$ dans 96.12% des cas contre 95.83% des cas pour le modèle à quinze neurones, ce qui est extrêmement performant.

Mais, au delà d'un résultat positif sur la base d'apprentissage, le véritable test de validation et de robustesse de ces modèles doit se faire par rapport aux performances face à la base totale des éléments à disposition.

V/ 4.2. Validation par la simulation sur la base de données :

On utilise pour cette simulation la totalité des échantillons disponibles, ce qui représente 5650 cas.

Nb de neurones	SSE	Moyenne	Moy_abs	Écart type	Écart Max	Écart Min
5	4,1253	0,00075	0,0273	0,02720	0,110	-0,117
7	4,4482	0,00080	0,0284	0,02725	0,150	-0,094
9	3,9470	0,00071	0,0267	0,02604	0,089	-0,095
11	3,7518	0,00068	0,0261	0,02576	0,088	-0,104
15	3,7682	0,00068	0,0261	0,02593	0,097	-0,091

Figure IV.19 : Résultats des réseaux sur la base de données complète

Les résultats présentent plusieurs points de différences intéressants à préciser. Les réseaux à cinq et sept neurones, conformément aux prévisions issues de l'apprentissage, donnent les moins bons résultats. En effet, les réseaux à neuf, onze et quinze neurones présentent les SSE, les moyennes et les moy_abs les plus faibles, et les écarts types les plus resserrés.

Le partage entre ces trois modèles se fait d'abord dans la précision globale, où le réseau à onze neurones présente un dépassement des fourchettes à [-10% ;+10%], ce qui est un critère éliminatoire. Le choix est plus compliqué pour les deux restants car, si la SSE du réseau à neuf neurones est supérieure à celle du réseau à quinze neurones, les écarts max et min observés tendent à avantager le réseau à neuf neurones.

D'autre part, comme il avait déjà été précisé au paragraphe précédent, le modèle le plus petit présente le grand avantage de nécessiter un nombre de calculs plus faibles, tant dans la phase d'apprentissage que dans son fonctionnement en ligne. Or, si un temps d'apprentissage plus long peut encore être acceptable puisqu'il est effectué en dehors de la marche de la ligne d'étamage, le temps de réponse du modèle face à une demande de la régulation se doit d'être le plus court possible.

Tout comme pour la phase d'apprentissage, l'histogramme de répartition des erreurs des modèles à neuf et quinze neurones permet de préciser la qualité des résultats (figure IV.20 et IV.21).

Les résultats face à la base totale des éléments montrent que l'erreur entre le modèle à neuf neurones et la réalité est dans les fourchettes [-5% ;+5%] dans 95.57% des cas, et que l'erreur entre le modèle à quinze neurones et la réalité est dans les fourchettes [-5% ;+5%] dans 95.68% des cas. Ces deux nombres, quasiment identiques font que le choix du meilleur modèle revient au réseau constitué de neuf neurones sur sa couche cachée.

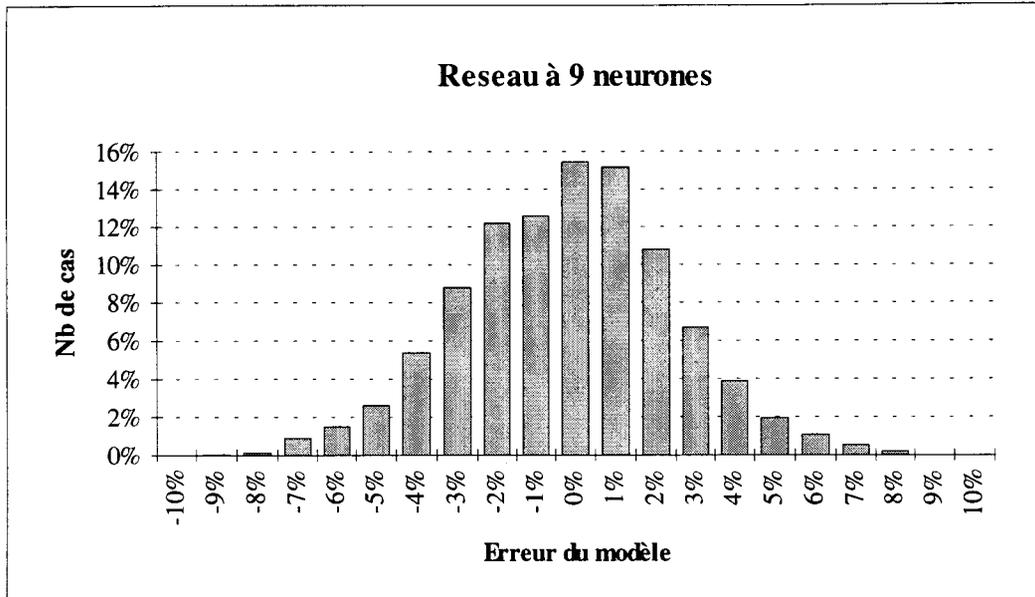


Figure IV.20 : Performances du modèle à 9 neurones sur la base d'apprentissage

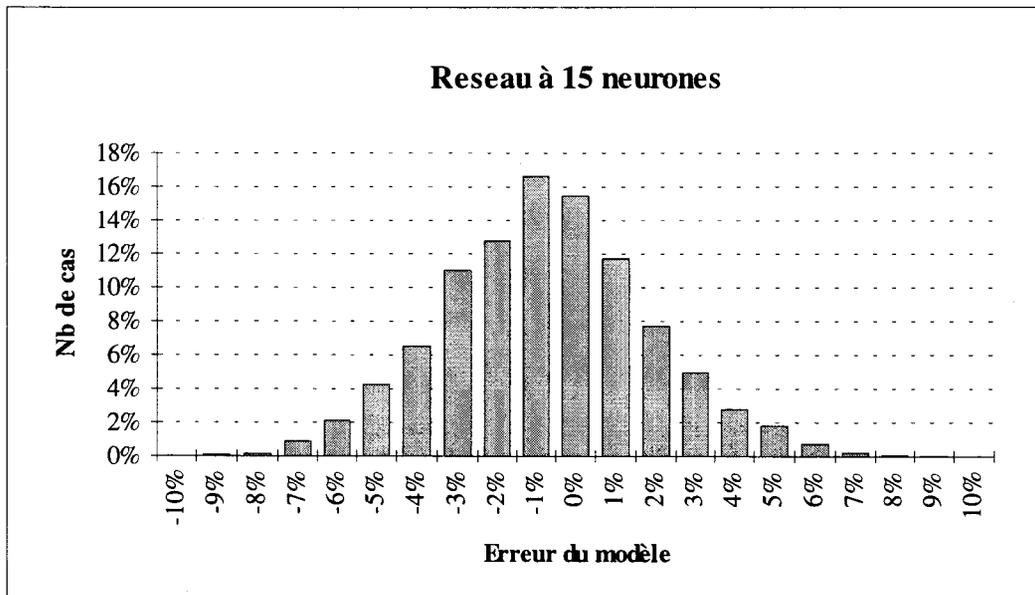


Figure IV.21 : Performances du modèle à 15 neurones sur la base d'apprentissage

V/ 4.3. Conclusion :

Les résultats exposés dans ce chapitre, retraçant les performances de quatre modèles neuronaux qui se différencient uniquement par le nombre de neurones de leur couche interne montrent que le meilleur compromis performances/rapidité de calculs revient au réseau composé de neuf neurones sur sa couche interne.

Celui-ci, après une phase d'apprentissage de 100000 itérations est capable de modéliser le rendement de la ligne d'étamage avec une erreur inférieure à 10% dans tous les cas. Cette erreur est même inférieure à 5% dans 95.57% des cas, calculs faits sur une base de données de 5650 éléments.

Comme le montre le tableau récapitulatif de la figure IV.22, ces performances (présentées ici pour la face supérieure) sont nettement meilleures que celles obtenues par les approches linéaires précédentes et la complétude des paramètres d'entrée pris en compte élimine les risques de dérive comme cela était le cas avec l'ancienne table.

	SSE	Écart type de l'erreur	Écart minimum	Écart maximum
Modèle 1	6.0839	0.0334	-0.18	-0.20
Modèle 2	5.9057	0.0273	-0.11	0.15
5 neurones	4,1253	0,0272	0,11	-0,12
7 neurones	4,4482	0,0272	0,15	-0,09
9 neurones	3,9470	0,0260	0,09	-0,09
11 neurones	3,7518	0,0258	0,09	-0,10
15 neurones	3,7682	0,0259	0,10	-0,09

Figure IV.22 : Récapitulatifs des différentes modélisations de la face supérieure

Le modèle neuronal optimal a été implanté dans le fonctionnement de la ligne d'étamage. Les premiers résultats mesurés sur la bande sont maintenant exposés.

VI / 5. RÉSULTATS INDUSTRIELS :

La mise en situation industrielle du modèle a conforté les résultats des simulations. Un suivi changements de taux d'étain a été réalisé sur une durée de trois semaines. Il s'agit, dans le fonctionnement de la régulation, d'utiliser le rendement calculé par le réseau de neurone présenté plus haut à chaque fois que le taux d'étain à déposer sur la bande doit changer.

De cette façon, la régulation utilise la réponse du modèle comme pré réglage dans le calcul du courant à déposer jusqu'à ce que la bande revêtue du nouveau taux arrive sous la jauge de mesure. Une fois la première lecture de la jauge disponible, la régulation peut calculer le rendement réel de la ligne afin de déterminer le courant réel à appliquer.

Les résultats de ces utilisations lors des changements de taux sont présentés figure IV.23 Ils montrent les mesures faites par la jauge sur les premiers mètres de bande recouverts au nouveau taux. Sont regroupés sur la même graphique:

✓ En noir : l'écart moyen entre le taux mesuré par le premier balayage de la jauge et le taux visé après le changement de taux (résultat du modèle neuronal).

✓ En gris : simulation du même changement de taux avec l'ancienne table.

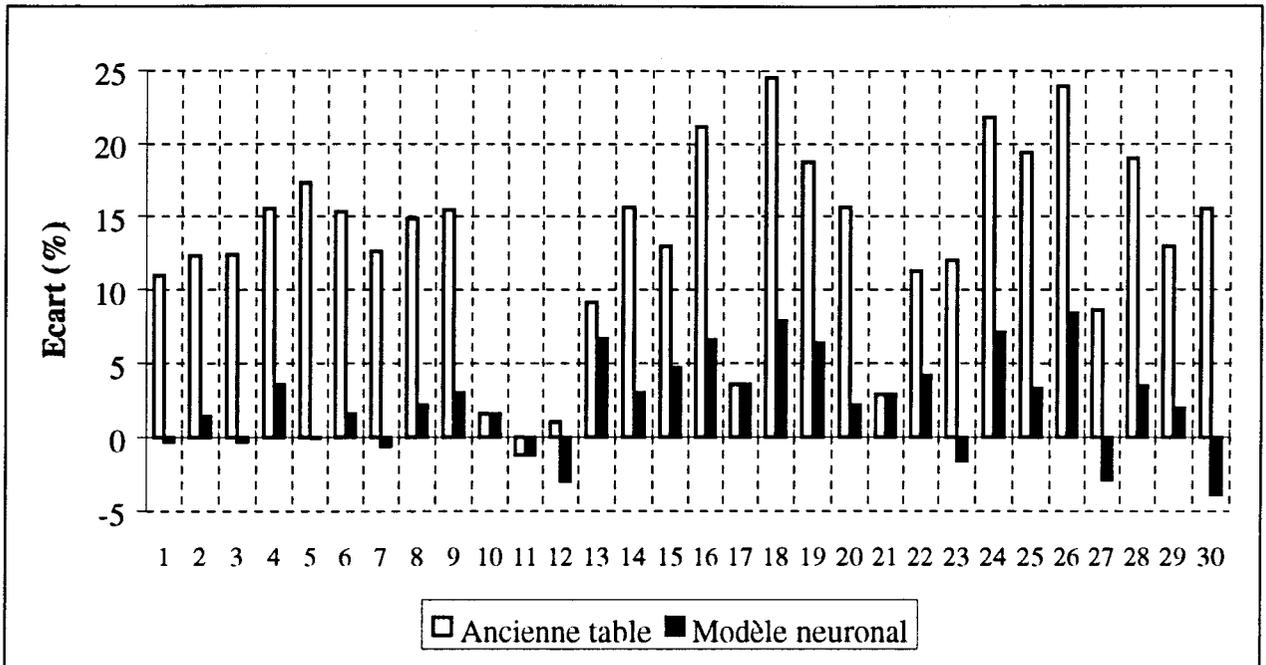


Figure V.23 : Résultats en ligne du modèle.

Une valeur négative de l'écart correspond, sur la bande, à un sous étamage de la même grandeur. A contrario, un écart positif entre le taux mesuré et le taux visé implique un sur étamage sur la bande. Au niveau de la qualité du produit, un sur étamage moyen sera préférable à un sous étamage moyen (le terme moyen sous entend un écart, en valeur absolue, entre 5% et 10%). C'est pourquoi les écarts provoqués par l'ancienne table de rendement sont volontairement décalés vers des valeurs positives (mais trop fortes).

On constate par contre, avec l'utilisation du modèle neuronal, que dans aucun cas l'écart entre le taux réel et le taux visé provoqué par l'estimation du rendement du modèle neuronal n'est inférieur à -5% (sous étamages très faibles) pour les valeurs négatives, et que 20% seulement des écarts positifs (sur étamages) sont entre 5 et 10%.

La moyenne des écarts est de 3.3% pour le modèle neuronal contre 13.3% pour l'ancienne table. Le pré réglage du rendement est donc parfaitement bien estimé et permet un revêtement homogène dès les premiers mètres de bande, avant même la lecture de la jauge de revêtement.

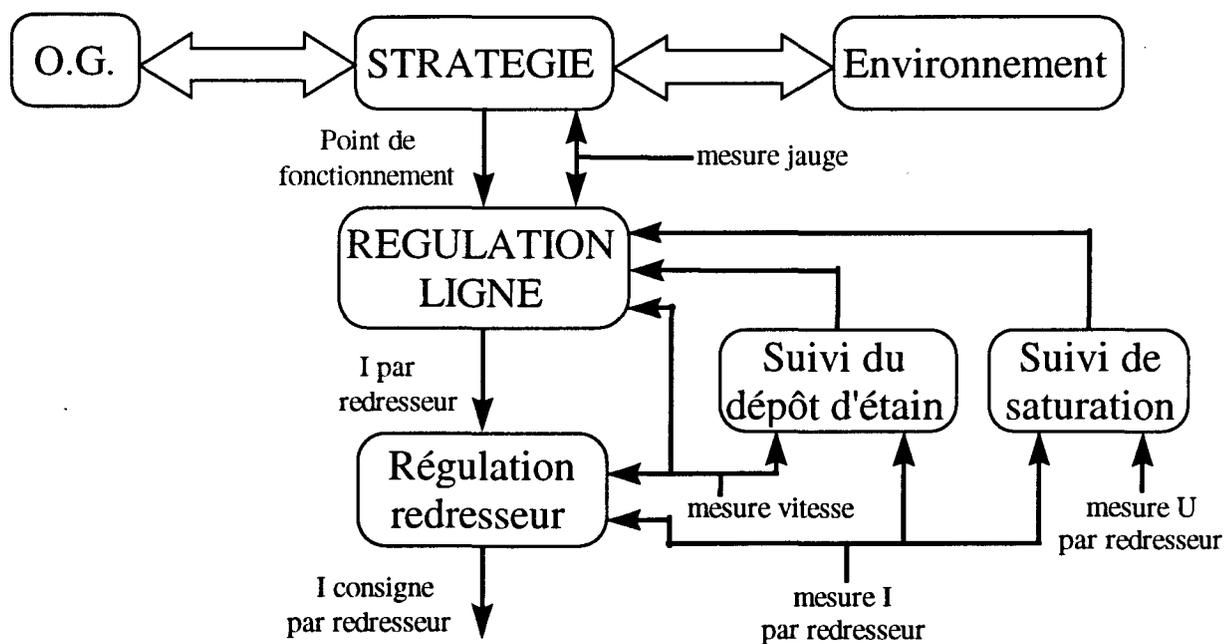
Le gain apporté par cette modernisation est estimé à 500kF par an. Une extension de ce réglage prédictif aux autres transitoires (changements de vitesse ou de largeur produit) devrait être mis en place prochainement avec la rénovation générale de la régulation du dépôt d'étain.



CHAPITRE V :
PRÉSENTATION DE LA NOUVELLE
RÉGULATION

I/ ARCHITECTURE GÉNÉRALE

L'architecture générale de la nouvelle régulation s'organise selon le schéma suivant :



Les modules principaux que sont la Stratégie et la Régulation ligne vont maintenant être expliqués en détails, ainsi que les applications associées de suivi de dépôt d'étain et de suivi de saturation.

II/ MODULE DE STRATÉGIE

II/ 1. INTRODUCTION :

Le module de stratégie est le plus haut niveau de la régulation [DES-97]. Il est en contact avec tous les éléments constituant l'environnement de la ligne :

➤ Caractéristiques du produit: épaisseur et largeur de la bande, taux d'étain à déposer sur chaque face.

➤ Capacité disponible: État des redresseurs (en service ou hors service), équipement d'anodes insolubles ou solubles, usure des anodes,

➤ Caractéristiques process: Vitesse de la ligne, composition de l'électrolyte (température et concentrations).

Asynchrone par rapport à l'avancement de la bande, la stratégie se déclenche à chaque modification d'un paramètre de l'environnement, c'est à dire: une demande de changement de vitesse, un nouveau format de bande, une modification du revêtement sur l'une des deux faces (ou sur les deux faces) de la bande, un arrêt ou une mise en service d'un redresseur. Son rôle est de déterminer le point de fonctionnement optimal d'étamage correspondant aux nouvelles consignes acquises, et de donner l'ordre de départ de la transition au module de régulation.

Le point de fonctionnement se définit par le calcul de la plage de densité de courant garantissant le bon étamage et du choix des redresseurs à utiliser ainsi que de leur intensité de consigne. La détermination de ces paramètres de réglage passe par une connaissance précise des phénomènes liés au processus d'électrodéposition puis par la modélisation de ces derniers.

II/ 2. LIMITES DES INTENSITÉS DE RÉFÉRENCES :

La première action du module de stratégie est de calculer les fourchettes admissibles de courant applicables aux redresseurs afin de rester dans les bornes définies par les zones d'étamage correct.

En effet, comme il a été expliqué au chapitre III, le trio température de l'électrolyte, concentration en étain stanneux et densité de courant conditionne directement l'aspect des grains d'étain sur la bande. Le déplacement de ces zones en fonction de ces trois paramètres est rappelé dans le schéma de la figure V.1.

Une modélisation multilinéaire à partir d'une base de données issue des valeurs réelles du process, permet de définir les lois de détermination des surfaces acceptables. Dans le fonctionnement de la ligne, la concentration et la température sont mesurées en continu, la

stratégie peut donc calculer les limites de courant minimales I_{refmin} et maximales I_{refmax} qui correspondent aux densités minimales $Dens_min$ et maximales $Dens_max$ sur la bande.

Dans l'exemple montré, le point M représente un point de fonctionnement dont les paramètres de température et de concentration sont respectivement T et 26 g/l. Les limites de densités de courant admissibles sont donc D_{min} et D_{max} .

De ces valeurs, et en fonction de la largeur de la bande découlent les valeurs des intensités limites à utiliser dans la régulation des redresseurs. Si la concentration ou la température augmente au cours du temps, le point M se déplace en conséquence et les frontières de densités évoluent vers des valeurs plus fortes. Au contraire une baisse de température ou de concentration diminue les densités seuils.

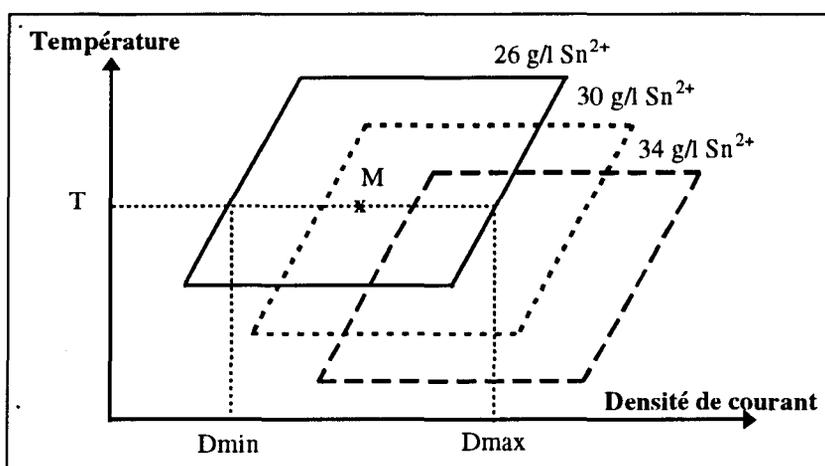


Figure V.1 : Zones d'étamage correct

Toutefois, pour le fonctionnement de la ligne de Mardyck, les redresseurs débitant 4500 A maximum et le produit le plus courant étant en grande largeur (supérieur à 1000 mm), la frontière la plus importante à respecter est la limite inférieure de densité de courant. La limite supérieure n'est approchée que pour les formats étroits (700 à 800 mm).

L'approche mathématique de la définition des zones d'étamage optimales aboutie aux équations suivantes :

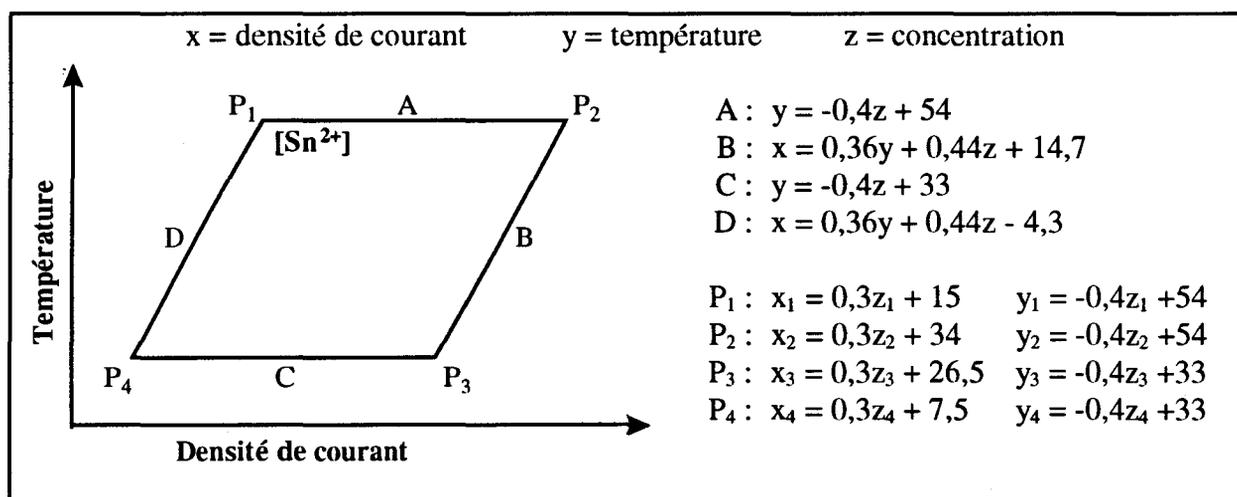


Figure V.2 : Formulation du modèle mathématique :

La stratégie à adopter consiste donc, connaissant les paramètres de température et de concentration, à déterminer, à l'aide des équations B et D les densités de courant minimales et maximales du processus. La véracité de ce modèle a été vérifiée sur une base de 1350 cas issus du comportement réel de la ligne et donne des résultats bons à 99,9 %.

II/ 3. CHOIX DES REDRESSEURS :

Le choix des redresseurs à utiliser n'est pas aléatoire. En dehors du fait qu'ils peuvent être en service ou hors service, il existe un ordre prioritaire dans leur utilisation. La stratégie doit donc également tenir compte de cette contrainte.

L'importance d'un revêtement déposé le plus tôt possible ayant déjà été rappelée, la stratégie utilisera donc en priorité le premier redresseur en service. Les autres seront enclenchés au fur et à mesure des besoins dans l'ordre croissant, c'est à dire dans le sens de déroulement de la bande. De la même façon l'ordre de déclenchement se fait de proche en proche en partant du dernier redresseur en service dans le respect du dépôt demandé sur la bande.

La préférence est à l'utilisation des redresseurs capables de débiter une intensité supérieure à l'intensité minimum de référence définie précédemment, les redresseurs dont la saturation serait trop forte pour garantir cette condition seront, dans la mesure du possible, évités. Le choix des priorités d'utilisation des redresseurs suit donc la procédure suivante :

- ① Utilisation des redresseurs non saturés ou dont l'intensité de saturation est supérieure à I_{refmin} .
- ② Si la capacité de courant définie par la priorité ① n'est pas suffisante, utilisation des redresseurs à forte saturation avec message d'avertissement des risques de défauts d'aspects.
- ③ Si la capacité de courant définie par la priorité ② n'est pas suffisante, alors changement de la consigne de vitesse pour la limite de vitesse maximale possible.

Remarque : La mise en service des redresseurs équipés d'anodes insolubles est laissée à l'appréciation des opérateurs mais une gestion automatisée de la concentration du bain en étain stanneux par l'utilisation de ces ponts d'anodes insolubles pourrait être intégrée dans le mode de gestion de la stratégie.

II/ 4. MODÉLISATION DE LA SATURATION DES REDRESSEURS :

Pour connaître le nombre de redresseurs à enclencher dans la nouvelle configuration il faut savoir quelle sera la capacité de la ligne dans la configuration que l'on veut atteindre et donc connaître quelle sera l'influence du phénomène de saturation des redresseurs. Le modèle utilisé ici est celui présenté au chapitre II.

Suivant les valeurs des paramètres de vitesse, d'usure des anodes, de fonctionnement ou non du pont en vis à vis, et de la section de la bande, le courant limite de saturation de chacun des redresseurs est calculé. L'estimation de la capacité de la ligne dans la configuration finale peut donc être prévue de façon précise et le module de stratégie est à même de pouvoir déterminer quels sont les ponts à utiliser et ceux qu'ils faut éviter du fait d'un état de saturation trop important. En règle générale, si un redresseur voit son intensité limite de saturation devenir inférieure aux limites basses d'intensités fixées précédemment, alors le pont ne sera pas utilisé.

II/ 5. MODÉLISATION DU RENDEMENT DE LA LIGNE :

Le rendement calculé à partir des données de la jauge de revêtement ne peut pas être utilisé par la stratégie pour le calcul du courant total du nouveau point de fonctionnement puisque la jauge donne ses indications avec un certain temps de retard dû à sa position en bout de ligne. Le module de régulation a besoin d'un modèle prédictif de détermination du rendement qui est bâti avec la structure neuronale développée au chapitre IV.

Les paramètres pris en considération par le réseau de neurones sont:

- ① La largeur de la bande (mm)
- ② L'épaisseur de la bande (mm)
- ③ Le taux d'étain visé en face supérieure (g/m^2)
- ④ Le taux d'étain visé en face inférieure (g/m^2)
- ⑤ Le rapport des concentrations des principaux ions $[\text{Sn}^{2+}/\text{H}^+]$
- ⑥ La température de l'électrolyte ($^{\circ}\text{C}$)
- ⑦ La vitesse de la ligne (m/mn)
- ⑧ L'intensité débitée par les redresseurs en face supérieure (A)
- ⑨ L'intensité débitée par les redresseurs en face inférieure (A)

Les variables relatives aux intensités des ponts et au format de la bande concernent l'influence de la densité de courant de travail, les taux visés des deux faces afin de tenir compte des effets d'une face riche sur une face pauvre, les paramètres principaux de définition de l'électrolyte pour l'évolution de la conductivité du bain, et la vitesse pour les phénomènes hydrodynamiques

La stratégie estime donc, à l'aide de ce modèle neuronal, le rendement de la ligne à partir des paramètres du nouveau point de fonctionnement et peut ainsi calculer le courant total réel à appliquer aux redresseurs.

II/ 6. DÉTERMINATION DE LA CONFIGURATION OPTIMALE :

Une fois les bornes de fonctionnement établies et la capacité future estimée, le module stratégie gère la répartition du courant total sur l'ensemble des redresseurs nécessaires au respect des consignes.

Le chapitre suivant expose les différentes solutions existant à Mardyck et ailleurs puis propose la solution la mieux adaptée au cas de l'étamage.

III/ 6.1. Régulation sur le dernier redresseur utilisé :

Cette technique est celle utilisée par la régulation actuelle (cf chapitre I). Il s'agit de répartir le courant total sur les n redresseurs nécessaires en appliquant une consigne de courant de référence maximale Irefmax sur n-1 redresseurs, le complément étant supporté par le dernier redresseur utilisé, comme le montre l'exemple suivant :

Exemple : Itot = 24000 A Irefmax = 4500 A Irefmin = 3200 A

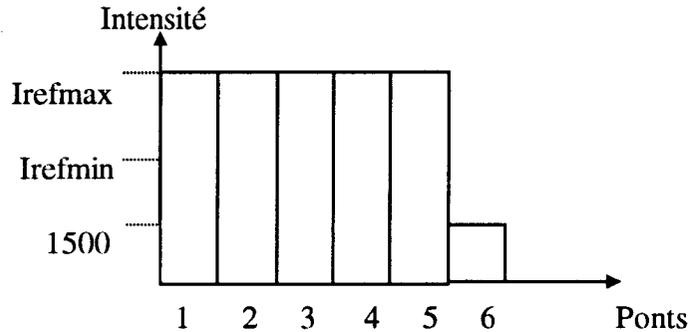


Figure V.3 : Répartition actuelle du courant sur les ponts.

Comme il a déjà été expliqué, le principal défaut de cette méthode est d'une part de laisser la possibilité au dernier redresseur de fonctionner dans des plages de densité inférieures à la densité minimale de bon étamage et d'autre part de créer des situations de pompage de ce dernier pont lorsque le complément nécessaire est inférieur au courant minimum d'enclenchement.

III/ 6.2. Régulation en équirépartition totale du courant :

Il s'agit ici d'une technique utilisée notamment sur la ligne d'électrozingage de Mardyck. Le principe est d'utiliser tous les redresseurs de la ligne et de répartir de façon égale le courant sur chacun de ces redresseurs.

Exemple : Itot = 24000 A Irefmax = 4500 A Irefmin = 3200 A

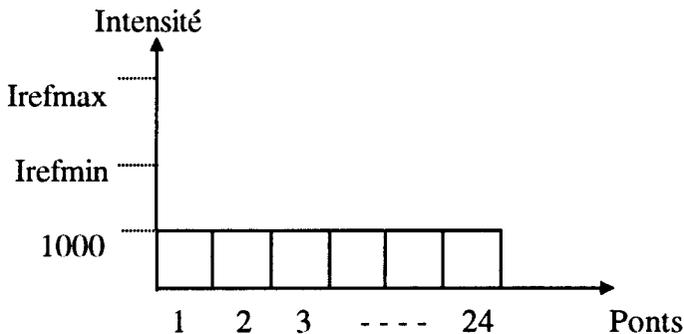


Figure V.4 : Répartition du courant en équirépartition totale.

Cette solution à l'avantage de garantir une densité de courant uniforme tout au long du passage de la bande dans les bacs, mais elle n'est pas envisageable dans le cadre de la ligne

d'étamage car elle provoquerait des intensités de consigne inférieures aux limites minimales acceptables.

III/ 6.3. Régulation en équirépartition minimale :

C'est une variante du cas précédent. Le courant total est réparti de façon uniforme sur le nombre de redresseurs minimum. Cette pratique est utilisée sur d'autres lignes d'étamage comme à Basse Indre par exemple.

Exemple : $I_{tot} = 24000 \text{ A}$ $I_{refmax} = 4500 \text{ A}$ $I_{refmin} = 3200 \text{ A}$

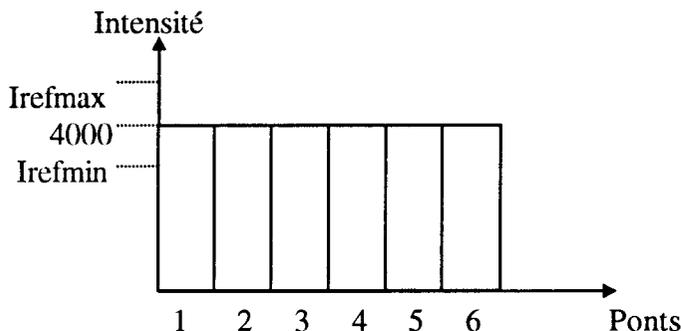


Figure V.5 : Répartition du courant en équirépartition minimale.

Cette solution a l'avantage de garantir une densité de courant uniforme tout au long du passage de la bande dans les bacs et qui est supérieure à l'intensité de consigne minimale acceptable.

III/ 6.4. Régulation en équirépartition partielle :

Cette méthode est un mélange original des solutions précédentes. Il s'agit de répartir le courant en séparant les redresseurs utiles en deux catégories :

- une partie que l'on appellera « partie fixe » au sein de laquelle les redresseurs ont pour consigne l'intensité maximale admissible I_{refmax}

- une seconde partie que l'on dénommera « partie mobile » et pour laquelle le courant restant est équiréparti. Le nombre de redresseurs constituant cette catégorie est tel que l'intensité d'équirépartition soit supérieure à I_{refmin} .

Exemple : $I_{tot} = 24000 \text{ A}$ $I_{refmax} = 4500 \text{ A}$ $I_{refmin} = 3200 \text{ A}$

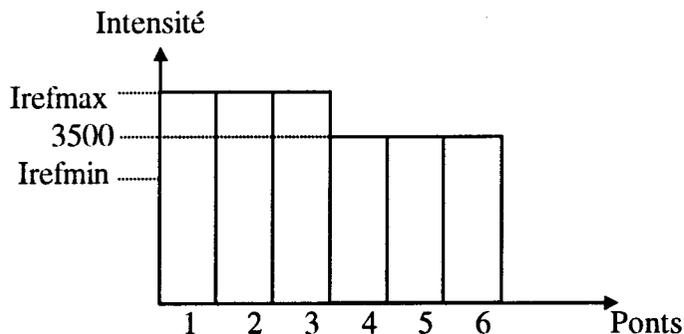
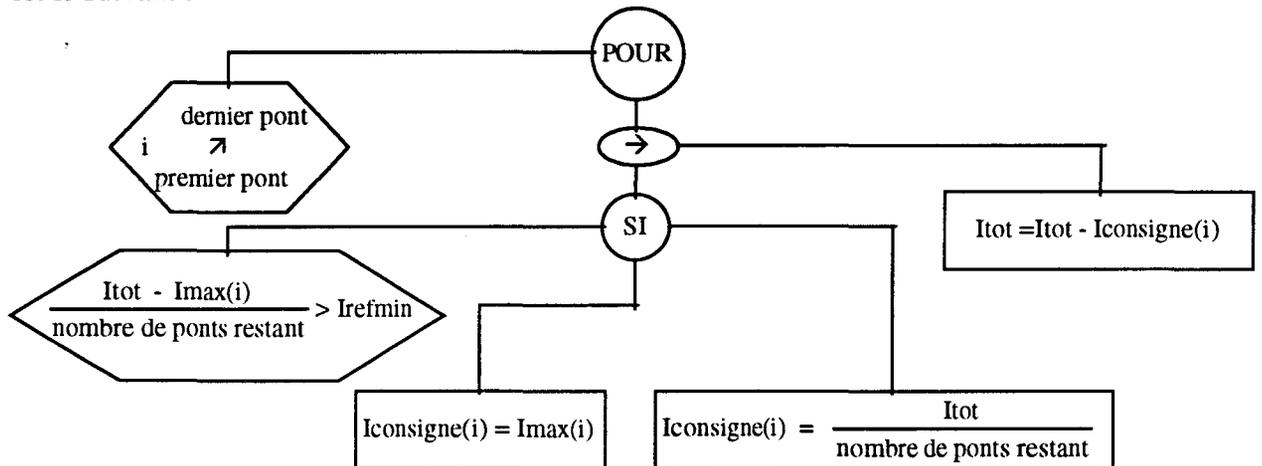


Figure V.6 : Répartition du courant en équirépartition partielle.

Remarque : Pour des raisons de simplification, dans les exemples précédents, la consigne maximale d'un redresseur est supposée être I_{refmax} , sans tenir compte de l'effet de saturation. Dans la version réelle de détermination des courants, l'intensité de consigne maximale n'est pas I_{refmax} mais la valeur minimale entre l'intensité de référence max et l'intensité de saturation du redresseur considéré : $I_{max}(i) = \text{Minimum}[I_{refmax} ; I_{sat}(i)]$

Pour reprendre l'exemple donné, le raisonnement à suivre pour la répartition du courant est le suivant :



Le premier avantage d'une telle répartition du courant est de permettre une bonne attaque de la bande par les premières passes d'étamage qui débitent un courant maximum. En effet, une densité de courant forte en début d'électrodéposition permettant une meilleure germination des cristaux d'étain sur la bande (cf chapitre III) et, de ce fait, une meilleure répartition du revêtement, il est important de conserver dans la répartition du courant cette caractéristique de la régulation actuelle.

D'autre part, le fait d'avoir les derniers ponts en équirépartition élimine le problème de faible densité de courant du seul pont en régulation de la répartition actuelle, et garantie une intensité d'enclenchement des redresseurs en dehors de leur zone de non linéarité.

Enfin, le fait de n'avoir que quelques ponts en équirépartition permet de garder sur ceux-ci une dynamique plus importante face aux légères perturbations du régime permanent que dans le cas de l'équirépartition minimale et, comme il sera montré plus loin, les variations de consignes des redresseurs en phases transitoires sont inférieures dans cette méthode à celles de l'équirépartition minimale.

III/ 6.5. Exemples :

Les exemples suivants illustrent à partir de macro développées sous EXCEL la répartition optimale définie par le module stratégie face à plusieurs environnements.

Le panneau de commande propose deux séries de réglage :

- ✓ Une série de réglages manuels qui concerne les paramètres principaux de l'environnement (Épaisseur, largeur, température, concentration), ainsi que les consignes de taux et de vitesse. Il est également possible à ce niveau d'imposer des consignes minimales et/ou maximales de courant de référence.

✓ Une série de réglages automatiques qui calcule à partir des données précédentes, les intensités totales nécessaires, les densités de courant limites et leur équivalent en terme d'intensité de référence.

Réglages automatiques			
J max (A/dm ²)	40,00	I tot sup (A)	46486
J min (A/dm ²)	20,00	I tot inf (A)	49022
FACE SUPÉRIEURE		FACE INFÉRIEURE	
Irefmax (A)	4500	Irefmax (A)	4500
Irefmin (A)	3600	Irefmin (A)	3600
Réglages manuels			
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Lancer la configuration</div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Transférer vers "Régulation"</div>	
Larg (mm)	1200,00	Vitesse (m/mn)	650,00
Épai (mm)	0,26	Temp (°C)	32,00
		[SN2+] (g/l)	30,00
FACE SUPÉRIEURE		FACE INFÉRIEURE	
Taux (g/m ²)	2,20	Taux (g/m ²)	2,32
Irefmax (A)		Irefmax (A)	
Irefmin (A)		Irefmin (A)	

Figure V.7 : Zone de réglages du module stratégie :

Le bouton « lancer la configuration » démarre le calcul de répartition du courant qui s'affiche sous la forme du tableau suivant :

FACE SUPÉRIEURE					FACE INFÉRIEURE				
pont N°	ES/HS	Usure	I _{max}	I _{con}	pont N°	ES/HS	Usure	I _{max}	I _{con}
1	1	1	4500	4500	1	1	8	4500	4500
2	1	3	4500	4500	2	1	6	4500	4500
3	1	8	4500	4500	3	1	50	4404.4	4404.4
4	1	10	4500	3844	4	1	1	4500	4500
5	1	0	4500	3844	5	1	20	4500	4500
6	1	6	4500	3844	6	1	6	4500	3993
7	1	4	4500		7	1	4	4500	
22	1	4	4500		22	1	20	4500	
23	1	9	4500		23	1	20	4500	
24	1	17	4500		24	1	5	4500	

Capa max : 108000

Capa max : 107904

Figure V.8 : Répartition du courant par la stratégie :

Les indications d'état « en service » ou « hors service » des redresseurs, tout comme l'usure de ceux-ci sont à entrer de façon manuelle. La macro s'occupe de calculer les intensités max de chacun des redresseurs et la répartition optimale du courant par la détermination de chaque intensité de consigne Icon.

Il est intéressant de remarquer dans cet exemple la prise en compte de la saturation du pont n°3 de la face inférieure qui voit son intensité de consigne Icon suivre sa capacité maximale de débit. D'autre part, l'optimisation de la répartition propose une partie mobile constituée de trois ponts pour la face supérieure et d'un seul pont pour la face inférieure. Les intensités de ces parties mobiles sont évidemment supérieures aux minima calculés par le modèle (3844 et 3993 pour un minimum de 3600 A).

III/ MODULE DE RÉGULATION

III/ 1. INTRODUCTION :

Le rôle du module de régulation est double. Il doit dans un premier temps gérer le régime permanent, c'est à dire le mode de fonctionnement général de la ligne en suivant incrément par incrément le taux déposé à chaque pas. Son second rôle, et non le moindre, est de gérer les phases transitoires définies par la stratégie.

Ici encore, le suivi du taux déposé sur chacun des incréments en cours de traitement sera déterminant sur la conduite des redresseurs situés en aval. La régulation est donc également chargée des enclenchements et déclenchements des redresseurs de façon à atteindre de façon optimale le point de fonctionnement établi par la stratégie.

Pour cela il faut définir les états possibles par lesquels peuvent passer chacun des redresseurs:

✓ **État de départ** : à 0 il indique que le redresseur en question n'est pas utilisé dans la configuration de départ, à 1 le redresseur est utilisé au départ.

✓ **État de fin** : à 0 il indique que le redresseur en question ne sera pas utilisé dans la configuration d'arrivée prévue par la stratégie, à 1 le redresseur sera utilisé en final.

✓ **État virtuel** : il s'agit de l'état transitoire que prend un redresseur qui doit changer de mode de fonctionnement entre le point de départ et la situation finale. Cet état permet à un redresseur d'être pris en compte pour le calcul de répartition du courant selon certaines conditions sans toutefois avoir de consigne de courant réelle.

Ces modes de fonctionnement sont expliqués maintenant de façon plus détaillée à travers les deux régimes de régulation prédéfinis.

III/ 2. FONCTIONNEMENT EN RÉGIME PERMANENT :

On qualifie le fonctionnement en cours de régime permanent lorsque l'état final déterminé par la stratégie a été atteint.

A partir de cet instant, la régulation gère de façon autonome le déroulement des tâches jusqu'au prochain ordre de transition.

Comme cela a été expliqué lors de la présentation de l'architecture générale, plusieurs tâches séquentielles sont effectuées à chaque avancée de la bande d'un incrément. Le schéma de la Figure V.9 rappelle la définition d'un incrément qui se caractérise comme étant un morceau de

bande de longueur un demi bac d'étamage et qui correspond, pour le morceau de bande considéré, au passage devant un pont d'anodes.

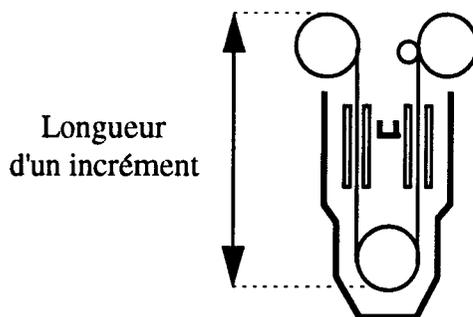


Figure V.9 : définition d'un incrément :

Le nombre d'incrément à traiter par la régulation est directement fonction du revêtement désiré et de la vitesse de la ligne. Il peut aller de 1 jusqu'à 24 qui est le nombre maximum de passes disponibles sur chacune des faces.

III/ 2.1. Suivi du dépôt d'étain :

A chaque avancée de la bande de la longueur d'un demi bac, la régulation calcule pour chacun des incréments de la zone d'étamage, c'est à dire du premier pont jusqu'au dernier utilisé, la quantité d'étain restant à déposer pour respecter le taux visé. Ce qui se traduit par l'équation suivante:

$$\tau_i(t) = \tau_i(t - I) + K \cdot \left(\frac{I_i}{Vit}\right)_{mesuré} \quad (V.1)$$

avec : τ_i : le taux d'étain déposé sur l'incrément i

I_i : l'intensité moyenne débitée par le redresseur i pendant le passage de l'incrément.

Vit : la vitesse moyenne de la ligne pendant le passage de l'incrément.

K : Constante liée à la largeur bande et à la loi de Faraday.

C'est à partir de ce suivi que le calcul du courant que devra recevoir chacun des incréments pourra être calculé ultérieurement.

III/ 2.2. Suivi de la saturation des redresseurs :

A chaque itération, le courant de saturation de chacun des redresseurs en fonctionnement est calculé à partir des mesures de tension et de courant réellement débités. La formule relative est la suivante :

$$Isat_i(t) = U \max_i \cdot \left(\frac{I_i}{U_i}\right)_{mesuré} \quad (V.2)$$

avec : $Isat_i$: le courant limite de saturation du redresseur i

$Umax_i$: tension maximum du redresseur (généralement 24 Volt)

I_i : l'intensité moyenne du redresseur i pendant la durée de passage de l'incrément.

U_i : tension moyenne du redresseur i pendant la durée de passage de l'incrément.

Ce résultat est communiqué à la régulation pour le suivi en continu et à la stratégie qui l'utilisera en cas de transitoire autre que les changements de vitesses.

III/ 2.3. Mise à jour du rendement :

III/ 2.3.1. Principe de calcul :

La lecture donnée par la jauge constitue la référence du taux réellement déposé. A ce titre, elle joue le rôle de capteur qui boucle le processus. La valeur du taux moyen lu par la jauge après un balayage de la largeur de la bande sert à affiner le rendement ligne afin d'atteindre en sortie le taux visé exact. La représentation du schéma de l'incidence du rendement est présenté Figure V.16 :

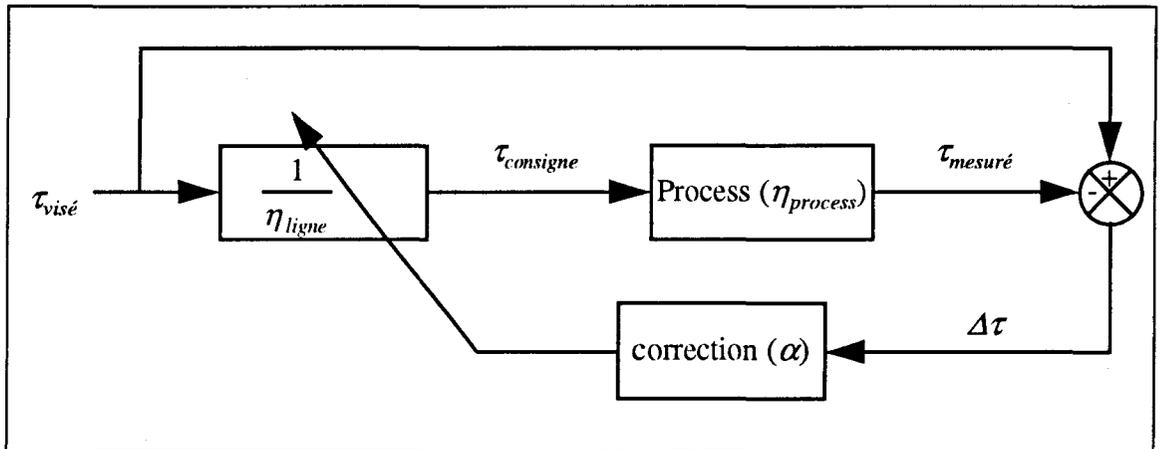


Figure V.10 : Schéma de correction du rendement.

Trois dénominations de rendement sont à distinguer dans cette architecture:

✓ η_{jauge} : rendement lié à la lecture de la jauge : $\eta_{jauge} = \frac{\tau_{mesuré}}{\tau_{visé}} = \frac{\eta_{process}}{\eta_{ligne}}$ (V.3)

✓ $\eta_{process}$: rendement réel de la ligne qui est le but à atteindre.

✓ η_{ligne} : rendement théorique de la ligne, calculé au départ par la stratégie en utilisant le modèle neuronal.

Afin d'éviter les oscillations la correction du rendement est soumise à un coefficient d'amortissement α ($0 < \alpha < 1$).

A l'instant t , la jauge a terminé son balayage et calcule le taux moyen lu sur la bande : $\tau_{mesuré}(t)$. Cette valeur est à comparer avec la valeur théorique de consigne relative à la partie lue par la jauge, en tenant donc compte du décalage entre le dernier pont utilisé et la jauge (figure V.11).

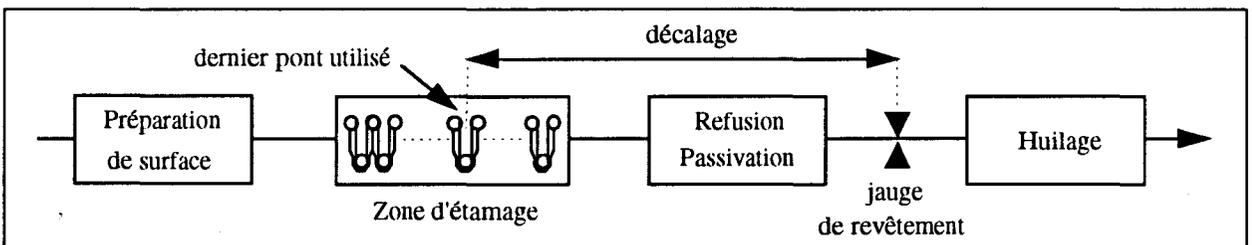


Figure V.11 : Décalage de la jauge.

La mesure de la jauge à l'instant t est comparée à la valeur théorique de l'instant $t-1$ (prise en compte du décalage) et le rendement jauge se définit par : $\eta_{jauge} = \frac{\tau_{mesuré}(t)}{\tau_{visé}(t-1)}$ (V.4)

L'écart observé entre $\eta_{process}$ et η_{ligne} se traduit par : $\Delta\tau = \eta_{ligne}(t-1) \cdot [\eta_{jauge}(t) - 1]$ (V.5)

La correction du rendement n'est pas directement l'écart total observé mais est proportionnelle à celui ci avec le facteur α . Il vient donc : $\eta_{ligne}(t) = \eta_{ligne}(t-1) + \alpha \cdot \Delta\tau$ (V.6)

Soit en final : $\eta_{ligne}(t) = \eta_{ligne}(t-1) \cdot [1 + \alpha \cdot [\eta_{jauge}(t) - 1]]$ (V.7)

III/2.3.2. Déroulement du cycle :

Dans le fonctionnement de la régulation, lorsqu'une modification de rendement est faite, il faut attendre de constater le résultat obtenu avant de définir une autre modification. Le temps de réponse de la régulation face aux modifications de rendement (Δt) est donc égal au temps d'avancée de la bande depuis le dernier pont utilisé jusque sous la jauge, plus le temps d'un balayage de la jauge sur la bande.

➤ **$\Delta t = \text{Temps d'avancée de la bande} + \text{Temps d'un balayage jauge.}$**

Cette condition allonge le temps de réponse de la régulation mais constitue le seul moyen d'avoir un retour réel des modifications.

Le dernier point à prendre en considération est l'erreur de mesure de la jauge. En effet, il ne faut pas confondre un écart entre le taux mesuré et le taux réel qui aurait pour origine la consigne de régulation, avec un écart issu d'une mesure fluctuante de la jauge. Pour cela il est important d'introduire les notions de reproductibilité et de répétabilité de la mesure, qui sont rappelées dans le tableau suivant.

	Jauge ligne		Jauge cabine
	Face Inf (g/m ²)	Face Sup (g/m ²)	(g/m ²)
Répétabilité	0.011	0.012	0.010
Reproductibilité	0.037	0.022	0.011

Figure V.12 : Capabilité de la jauge.

Afin d'éviter un pompage continu du réglage du rendement autour de sa valeur réelle, il ne faut corriger η_{ligne} que si l'écart entre le taux réel et le taux visé est supérieur à l'erreur moyenne de la jauge, que l'on considère au vu des résultats exposés à 0.03 g/m².

- Si $|\tau_{mesuré} - \tau_{visé}| > 0.03$ alors la correction est à faire
- Si $|\tau_{mesuré} - \tau_{visé}| \leq 0.03$ l'écart est considéré comme inhérent à l'erreur de mesure de la jauge et il n'y a pas lieu de corriger le rendement ligne.

III/ 3. FONCTIONNEMENT EN RÉGIME TRANSITOIRE :

III/ 3.1. Introduction :

Il faut distinguer plusieurs types de régimes transitoires :

- ✓ les changements de taux qui interviennent de façon prévisible lors des changements de produit ou sur la volonté des opérateurs.
- ✓ les changements de redresseurs qui prennent en compte d'une part l'arrêt imprévisible suite à une panne d'un redresseur, et d'autre part la demande de coupure d'un redresseur par les opérateurs (changement d'anodes ou de largeur, gestion des anodes insolubles).
- ✓ les changements de vitesse demandés par les opérateurs ou imposés suite à un problème technique.

Chaque phase transitoire est gérée par la régulation qui doit amener la ligne au point de fonctionnement défini par la stratégie. Pour cela elle dispose d'algorithmes spécifiques à la tâche demandée. Les cas de transitoires de vitesse se classent en deux catégories que sont les accélérations et les ralentissements. Les changements de taux ainsi que les changements de redresseurs sont gérés de façons identiques par un seul algorithme.

III/ 3.2. Changements de taux ou de redresseur :

Ces deux types de transitoires sont réunis sous le même algorithme car ils présentent le même schéma de résolution. Tous deux nécessitent un suivi incrément par incrément avec la possibilité de commander de façon individuelle chacun des redresseurs afin d'éviter les limites de l'ancienne régulation. Le déroulement des transitoires est présenté pour un changement de taux d'un taux fort vers un taux plus faible. Le raisonnement est exactement le même pour un changement de redresseurs dont un exemple est exposé plus loin.

III/ 3.2.1. Réaction de l'ancienne régulation :

Le tableau suivant (figure V.13) montre immédiatement les limites de la régulation individuelle en décomposant pas par pas le passage d'un changement de taux dans la zone d'étamage. L'état de départ est une quantité totale à déposer de 72 vers une quantité de 39.

	1		2		3		4		5	
Pas	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr
1	4500	57	4500	42	4500	27	4500	12	3600	0
2	4500	24	4500	42	4500	27	4500	12	3600	0
3	4500	24	4500	9	4500	27	4500	12	3600	0
4	4500	24	4500	9	4500	-6	4500	12	3600	0
5	4500	24	4500	9	4500	-6	4500	-21	3600	0
6	4500	24	4500	9	2700	0	0	-6	0	-21
7	4500	24	4500	9	2700	0	0		0	-6

Figure V.13 : Suivi d'un incrément pas par pas avec l'ancienne régulation

Le premier incrément de bande devant subir le changement de taux est en gras. Les colonnes qr expriment la quantité restant à déposer sur l'incrément après le dépôt relatif à l'intensité débitée par le redresseur de la colonne considérée.

Exemple : Au pas 1, le dernier incrément de l'état initial est en face du redresseur 1 qui débite 4500 A ce qui correspond, à la vitesse de 300m/min, à un dépôt de 15, il reste donc $72-15=57$ à déposer sur cet incrément lorsqu'il sera en face du redresseur 2, au pas n°2.

Chaque ligne correspond à un pas de la régulation qui applique une consigne maximale à tous les redresseurs sauf le dernier qui fait le complément.

La situation montre que pour garder un taux correct sur le dernier incrément de la situation initiale (72) il faut quatre redresseurs à 4500 A et un cinquième à 3600 A. Par contre pour satisfaire un incrément dans l'état final avec une quantité déposée de 39 il faut deux redresseurs à 4500A et un à 2700 A. Entre ces deux états, la phase transitoire débutée par l'incrément en trait gras indique un sur étamage impossible à éviter ($qr < 0$). En effet, au pas 4, l'incrément en gras a besoin sous le redresseur 3 de 2700 A pour compléter exactement le revêtement, mais comme les redresseurs 4 et 5 débitent encore afin de compléter les derniers incréments devant recevoir un total de 72, l'intensité de consigne du redresseur 3 est de 4500 A, donc supérieure au nécessaire. Cette situation se retrouve également au pas 5. Ce n'est qu'au pas 6, lorsque le dernier incrément de l'état initial est terminé que la régulation corrige la consigne en coupant directement les ponts superflus et en régulant sur le redresseur 3.

III/ 3.2.2. Déroulement suivant la nouvelle régulation :

La commande individuelle de chacun des redresseurs permet de palier à ce type de conséquences, comme le montre l'exemple suivant, avec le même changement de taux que dans l'exemple précédent.

Pas	1		2		3		4		5	
	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr
1	4500	57	4500	42	4500	27	4050	14	4050	0
2	4500	24	4500	42	4500	27	4050	14	4050	0
3	4500	24	3601	12	4500	27	4050	14	4050	0
4	4500	24	3601	12	3601	0	4050	14	4050	0
5	4500	24	3601	12	3601	0	0	0	4050	0
6	4500	24	3601	12	3601	0	0	0	0	0

Figure V.14 : Suivi d'un incrément pas par pas avec la nouvelle régulation

En effet, dès le pas n°3, le premier incrément de la nouvelle configuration (en gras) reçoit l'intensité du régime final sous chaque redresseur. Ceci n'empêche pas que le dernier incrément de l'état initial continue lui aussi à recevoir le dépôt correct tout au long de son passage. Il est à noter de surcroît que la répartition du courant est, pour chaque incrément, conforme à la répartition optimale calculée par la stratégie, avec une partie fixe et une partie mobile.

III/ 3.2.3. Exemples :

Exemple 1 : Ce premier exemple montre le comportement de la régulation face à la coupure du pont n°3. L'état de départ utilise les ponts 1,2,3 en partie fixe et les ponts 4,5,6 en équirépartition. L'état final, lui, a remplacé le redresseur 3 par le premier en fonctionnement qui est ici le n°8.

	Vit	Qtot	1		2		3		4		5		6		7		8	
départ	350	71.5	4500	1	4500	1	4500	1	3844	2	3844	2	3844	2	0	0	0	0
fin	350	71.5	4500	1	4500	1	0	0	4500	1	3844	2	3844	2	3844	2	0	0

Pas	Vit	1		2		3		4		5		6		7		8		Itot lg	Itot inc
		Int	qr	Int	qr	Int	qr												
1	350	4500	59	4500	46	4500	33	3844	22	3844	11	3844	0	0	0	0	25032	25032	
2	350	4500	59	4500	46		46	3844	22	3844	11	3844	0	0	0	0	20531	25032	
3	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	11	3844	0	0	0	0	21188	25032	
4	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	0	0	0	0	21188	25032	
5	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	11	0	0	0	21188	25032	
6	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	11	11	0	0	21188	25032	
7	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	11	11	3844	0	25032	25032	
8	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	11	11	3844	0	25032	25032	

L'enchaînement des pas de régulation fait apparaître que la priorité est à la coupure du redresseur n°3 qui intervient dès le premier pas du transitoire (pas n°2). Par contre, l'enclenchement du redresseur n°8 se fait au moment où il est indispensable (pas n°7). Entre ces deux phases le décalage des intensités des redresseurs n°4,5 et 6 se fait de façon progressive en synchronisation avec l'avancement de la bande.

Les deux dernières colonnes indiquent les sommes des courants par ligne pour la première et par incrément pour la seconde. Si le courant total peut varier d'une ligne à l'autre du fait des enclenchements et déclenchements de redresseurs, le seul critère de validité au niveau du produit est le courant total reçu par chacun des incréments, courant qui lui est constant tout au long de la phase transitoire.

Exemple 2 : Ce second exemple montre la réaction face à un double changement de redresseurs, avec l'enclenchement d'un nouveau pont en amont de l'état initial (le n°1) et un en aval (le n°8).

	Vit	Qtot	1		2		3		4		5		6		7		8	
départ	350	71.5	0	0	4500	1	4500	1	4500	1	3844	2	3844	2	3844	2	0	0
fin	350	71.5	4500	1	4500	1	0	0	4500	1	3844	2	3844	2	0	0	3844	2

Pas	Vit	1		2		3		4		5		6		7		8		Itot lg	Itot inc
		Int	qr	Int	qr														
1	350		72	4500	59	4500	46	4500	33	3844	22	3844	11	3844	0	0	25032	25032	
2	350	4500	59	4500	59	4500	46	4500	33	3844	22	3844	11	11	0	0	25687	25032	
3	350	4500	59	4500	46	4500	46	4500	33	3844	22	3844	11	11	3844	0	29531	25032	
4	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	11	11	3844	0	25032	25032	
5	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	11	11	3844	0	25032	25032	
6	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	11	11	3844	0	25032	25032	
7	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	11	11	3844	0	25032	25032	
8	350	4500	59	4500	46		46	4500	33	3844	22	3844	11	11	3844	0	25032	25032	

L'intérêt de cet exemple est de faire ressortir le principe de l'algorithme de changement de redresseur. Le redresseur n°1 est enclenché dès le début de la phase transitoire car son fonctionnement est indispensable pour pouvoir couper les redresseurs n° 3 et 7. D'ailleurs, la régulation attend que le premier incrément qui ait eu l'effet du pont n°1 se présente sous le pont n°3 avant de couper ce dernier, car c'est seulement à ce moment (pas n°4) que la capacité avale de la ligne sera suffisante pour compléter le dépôt. Le cas du transfert du pont n°7 au pont n°8 se fait de façon identique à celle du premier exemple.

Ici encore il faut noter une différence fondamentale entre le courant total délivré par l'ensemble des redresseurs à un instant donné (colonne Itotlg) et le courant total reçu par chacun des incréments (Itotinc) qui lui, par sa valeur constante indique la régularité de la quantité déposée dans le long de la bande.

III/ 3.3. Traitement d'une accélération:

III/ 3.3.1. Positionnement du problème :

L'inconvénient majeur de la gestion précédente des accélérations était de subir la vitesse et de ne réagir qu'au dernier moment face aux besoins en courant. Pour illustrer ces propos il suffit de suivre pas par pas un incrément tout au long de son passage dans la zone d'étamage à travers l'exemple suivant:

Exemple : Le tableau de la figure V.15 simule le passage de la bande dans la zone d'étamage. La première ligne indique le numéro du redresseur. Dans cet exemple cinq redresseurs sont en fonctionnement (1, 2, 4, 5,6) dont quatre sont enclenchés (1, 2, 4, 5) et servent à la constitution du dépôt. Le numéro 3 est hors service. Chaque colonne des redresseurs est divisée en deux parties, à gauche le courant débité par le redresseur et à droite la quantité de revêtement qu'il reste à déposer sur l'incrément situé en face de ce même redresseur.

L'incrément suivi qui sera appelé n, est en marquage gras. Chaque ligne du tableau correspond à un pas de la régulation qui calcule, pour chacun des incréments, le courant de consigne du redresseur en face de celui-ci.

Quantité total à déposer : $Q_{tot} = 62$													
	1			2		3		4		5		6	
	Vit	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr
V₁	265	4500	45	4500	28		26	4500	7	780	0		0
V₂	279	4500	46	4500	30		28	4500	10	1978	0		0
V₃	293	4500	47	4500	31		30	4500	13	3058	0		0
V₄	306	4500	48	4500	33		31	4500	15	4050	0		0
V₅	318	4500	48	4500	34		33	4500	17	4500	1		0
V₆	330	4500	49	4500	35		34	4500	19	4500	4	490	0

Figure V.15 : Suivi d'un incrément pas par pas avec l'ancienne régulation

Pour le premier pas, l'incrément n est en face du redresseur 1 qui débite 4500 A, la vitesse varie de 265 à 279 m/mn, la quantité qu'il restera à déposer sur l'incrément au pas suivant est 45. Lorsque la vitesse atteint V_2 , l'incrément suivi s'est déplacé et se situe alors en face du redresseur 2. Par le même calcul que précédemment, il est déterminé le taux restant à déposer, et ainsi de suite jusqu'au redresseur 5. Lorsque l'incrément n est face au redresseur 5, la capacité de ce dernier est insuffisante pour déposer le reste du revêtement nécessaire. C'est seulement à cet instant que la régulation décide d'enclencher un pont supplémentaire, le numéro 6.

Un double problème survient alors car, d'une part le temps physique d'enclenchement engendre un retard pur non négligeable qui provoquera un sous étamage sur l'incrément n , et d'autre part même si ce temps d'enclenchement est négligé pour les faibles vitesses, l'intensité de consigne du redresseur 6 est inférieure à l'intensité minimale d'enclenchement. Cela se traduira également par un déficit.

L'inconvénient majeur de la stratégie adoptée est donc de ne pas anticiper l'évolution de la vitesse au cours du transitoire. C'est le but à rechercher pour une nouvelle régulation.

III/ 3.3.2. Notion de vitesse moyenne de passage :

Pour ne pas être devant un problème d'enclenchement tardif ou d'intensité de consigne insuffisante sur le dernier redresseur il faut connaître dès l'entrée dans la zone d'étamage d'un nouvel incrément la quantité de courant totale nécessaire à la consigne de dépôt demandée, et par conséquent il faut prévoir l'influence de l'accélération.

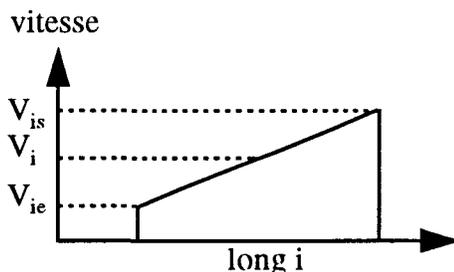
Cette quantité de courant totale nécessaire pour revêtir un incrément du taux voulu est directement proportionnelle au temps et donc à la vitesse de passage de cet incrément devant les ponts en service. Cette vitesse, que nous appellerons V_{moy} , se définit donc comme étant la vitesse moyenne de passage de la bande devant les ponts en service de la zone d'étamage.

Remarque : Il est nécessaire de ne considérer dans le calcul de V_{moy} que les temps de passage devant les ponts en service (c'est à dire les ponts dont les redresseurs débitent du courant), car ce sont les seuls à participer à l'électrodéposition.

La vitesse moyenne d'un incrément est la synthèse de deux termes qui sont :

✓ V_i , la vitesse moyenne de passage d'un incrément devant un pont i :

Si l'on considère le passage d'un incrément devant un redresseur i , on peut définir :



avec :

V_{ie} : vitesse de l'incrément à l'entrée du redresseur i
 V_{is} : vitesse de l'incrément à la sortie du redresseur i
 long i : longueur du pont d'anode i

La longueur d'un pont d'anode est connue et fixe. La vitesse d'entrée de l'incrément dans la zone d'étamage est connue également, ainsi que la pente d'accélération (notée a).

Il vient donc :
$$V_{is} = \sqrt{V_{ie}^2 + 2 \cdot a \cdot \text{long}} \quad (V.8)$$

Si on appelle Δt le temps de passage devant le pont :
$$\Delta t = \frac{V_2 - V_1}{a} \quad (V.9)$$

V_i se traduit alors par :
$$V_i = \frac{\text{long}}{\Delta t} \quad (V.10)$$

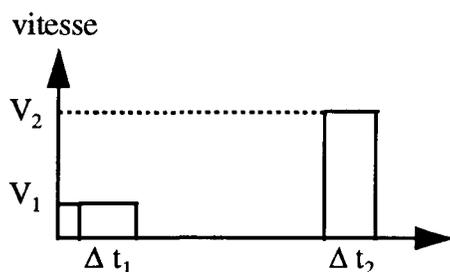
Soit encore en réunissant (V.8), (V.9), et (V.10) :
$$V_i = \frac{V_{is}^2 - V_{ie}^2}{2 \cdot a} \cdot \frac{a}{V_{is} - V_{ie}} \quad (V.11)$$

La vitesse moyenne de passage d'un incrément devant un pont d'anode i est donc la moyenne arithmétique de la vitesse à l'entrée du pont V_{ie} et de la vitesse à la sortie du pont V_{is} .

$$V_i = \frac{V_{ie} + V_{is}}{2} \quad (V.12)$$

✓ V_m , la vitesse moyenne de passage d'un incrément devant deux ponts :

Soit un incrément qui passe devant deux ponts (de longueur long) en service numérotés 1 et 2 :



avec :

V_1 : vitesse moyenne de passage devant le pont 1

V_2 : vitesse moyenne de passage devant le pont 2

Δt_1 : temps de passage devant le pont 1

Δt_2 : temps de passage devant le pont 2

La vitesse V_m se calcule par :
$$V_m = \frac{2 \cdot \text{long}}{\Delta t_1 + \Delta t_2} = \frac{2 \cdot \text{long}}{\frac{\text{long}}{V_1} + \frac{\text{long}}{V_2}} = \frac{2}{\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}} \quad (V.13)$$

La vitesse moyenne de passage d'un incrément devant deux ponts d'anodes 1 et 2 est donc la moyenne géométrique des vitesses moyennes de passage devant chacun des ponts 1 et 2.

$$V_m = \frac{2}{\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}} \quad (V.14)$$

L'extension de ce calcul à l'ensemble des ponts en service devant lesquels passe l'incrément devient :

$$V_{moy} = \frac{\text{Nb de red en fonction}}{\sum_{i=\text{prem}}^{\text{der}} \frac{1}{V_i}} \quad (V.15)$$

avec : prem : le numéro du premier pont passé

der : numéro du dernier pont passé

V_i : vitesse moyenne (arithmétique) de passage devant le pont i.

Exemple : Pour reprendre l'exemple précédent, les vitesses à prendre en considération sont les vitesses moyennes devant les redresseurs 1, 2, 4 et 5. Il vient, par calcul de la moyenne harmonique:

$$V_{\text{moy}} = \frac{4}{\frac{2}{V_1 + V_2} + \frac{2}{V_2 + V_3} + \frac{2}{V_4 + V_5} + \frac{2}{V_5 + V_6}} \quad (\text{V.16})$$

III/ 3.3.3. Calcul de capacité :

La capacité totale en courant au moment où l'incrément n entre dans la zone d'étamage est connue comme étant :

$$I_{\text{capa}} = \sum_{i=1}^5 I_{\text{max}}(i) \quad (\text{V.17})$$

avec $I_{\text{max}}(i)$ l'intensité maximale du redresseur i (en tenant compte de la saturation) si celui ci est en fonctionnement.

Il vient donc que la capacité maximum de la ligne, en terme de dépôt, au moment où l'incrément suivi arrive devant le premier redresseur en service est :

$$Q_{\text{max}} = \frac{I_{\text{capa}}}{V_{\text{moy}}} \quad (\text{V.18})$$

Pour l'exemple proposé $Q_{\text{max}} = 60$. Puisque $Q_{\text{max}} < Q_{\text{tot}}$ il faut ajouter un redresseur supplémentaire, le numéro 6.

La consigne d'enclenchement est donc prévue dès l'entrée de l'incrément dans le bain, soit suffisamment tôt pour s'affranchir des délais physiques d'enclenchement.

III/ 3.3.4. Répartition du courant :

Puisqu'il est prévu d'utiliser le redresseur 6, la répartition du courant se fera de façon à ce que toutes les intensités de consigne soient dans les zones linéaires de fonctionnement. Toutefois, si l'enclenchement du redresseur 6 se fait immédiatement, ce dernier ne devra débiter une intensité que lorsque l'incrément suivi (noté n) sera arrivé en face de lui. Il passe donc par une phase de fonctionnement virtuel durant laquelle il sera comptabilisé dans la répartition du courant de l'incrément n et de ses successeurs mais pas dans celle des incréments en amont de n. Le résultat est décrit dans le tableau suivant:

Quantité total à déposer : $Q_{\text{tot}} = 62$													
	1		2		3		4		5		6		
	Vit	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr	Int	qr
V_1	265	4500	45	4500	28		27	4500	9	2317	0		0
V_2	279	4500	46	4500	30		28	4500	11	2705	0		0
V_3	293	4500	47	4500	31		30	4500	13	3230	0		0
V_4	306	4500	48	4500	33		31	4500	15	4043	0		0
V_5	318	4500	48	4500	34		33	4500	17	2528	8		0
V_6	330	4500	49	4500	35		34	4500	19	2966	9	2528	0

Figure V.16 : Suivi d'un incrément pas par pas avec la nouvelle régulation

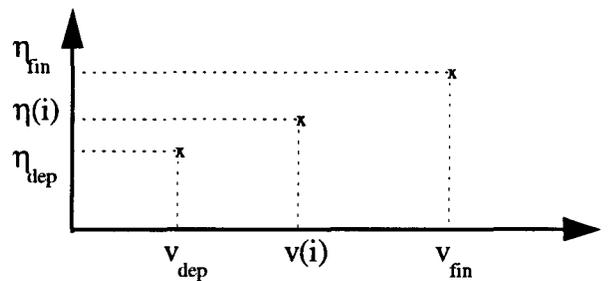
L'intensité sur les premiers redresseurs reste identique au cas précédent, car la logique de répartition impose un courant maximum sur le plus de redresseurs possible, par contre à partir du cinquième pas le complément se fait sur les redresseurs 5 et 6 qui débitent tous les deux un courant supérieur au courant d'enclenchement. Le dépôt est donc plus précis.

Remarque sur la répartition du courant: L'exemple précédent montre une différence entre la technique de répartition du courant lors du régime transitoire et celle du régime permanent. En effet, dans le premier cas la partie fixe est définie comme étant le plus grand nombre possible de redresseurs utilisés à leur capacité maximale avec la condition que le courant de consigne de la partie mobile soit supérieur à l'intensité minimale de référence. Par contre, lors d'une phase transitoire, le seuil d'enclenchement n'est plus l'intensité minimale de référence mais l'intensité minimale d'enclenchement fixée arbitrairement à 2250 A.

Ce choix est justifié par plusieurs raisons: tout d'abord ce courant est supérieur à l'intensité physique d'enclenchement qui est de l'ordre de 500A, donc il n'y a aucun risque d'être dans la zone non linéaire des redresseurs. D'autre part, pour les formats de bande les plus larges, la densité de travail correspondant est de l'ordre de 12.5 A/dm² ce qui reste dans le domaine d'électrodéposition réalisable (en terme de rendement du pont), même si elle sort des zones définies par la stratégie (les études sur le bas courant ont montré que l'intensité faible du dernier pont n'est pas le facteur déclenchant des défauts d'aspect). Enfin, en utilisant cette technique, la partie mobile (partie dynamique) est limitée au plus à deux redresseurs ce qui est suffisant pour faire face à un changement de vitesse entre deux pas de régulation, et permet de garder un nombre de redresseurs maximum en partie fixe dont la gestion et la conduite sont beaucoup plus faciles à contrôler.

III/ 3.3.5. Mise à jour du rendement :

Le modèle de détermination du rendement montre une influence forte du paramètre vitesse. La stratégie en tient compte puisqu'elle détermine la configuration du régime permanent final en fonction du rendement simulé par le réseau neuronal. Mais il faut gérer également la transition entre le passage d'un fonctionnement ayant un rendement de départ appelé η_{dep} vers un régime final ayant un rendement η_{fin} , par le passage de valeurs intermédiaires $\eta(i)$ qui correspondent aux caractéristiques propres au passage de l'incrément.



Il est impossible de prendre en compte les valeurs lues par la jauge pendant le transitoire de vitesse à cause du décalage de celles ci par rapport à la zone de traitement. D'autre part, il serait trop long de faire appel au modèle neuronal à chaque pas de la régulation pour connaître les rendements intermédiaires.

Au cours de l'accélération, il n'est pas aberrant de considérer tous les paramètres constants (en dehors de la vitesse). En effet, le format de la bande reste identique ainsi que les taux visés. La température du bain et le rapport des concentrations sont les seuls à être susceptibles d'évoluer mais si cela est le cas ce sera avec une inertie grande face à la durée de l'accélération. Quant aux intensités de références, sauf priorité manuelle, elles sont dépendantes de paramètres supposés fixes.

L'exemple représenté Figure V.17 montre le comportement du rendement en fonction de la vitesse lorsque tous les autres paramètres sont constants. L'évolution quasi linéaire permet de conclure qu'une interpolation linéaire des rendements intermédiaires au cours du transitoire est suffisante pour décrire correctement le phénomène.

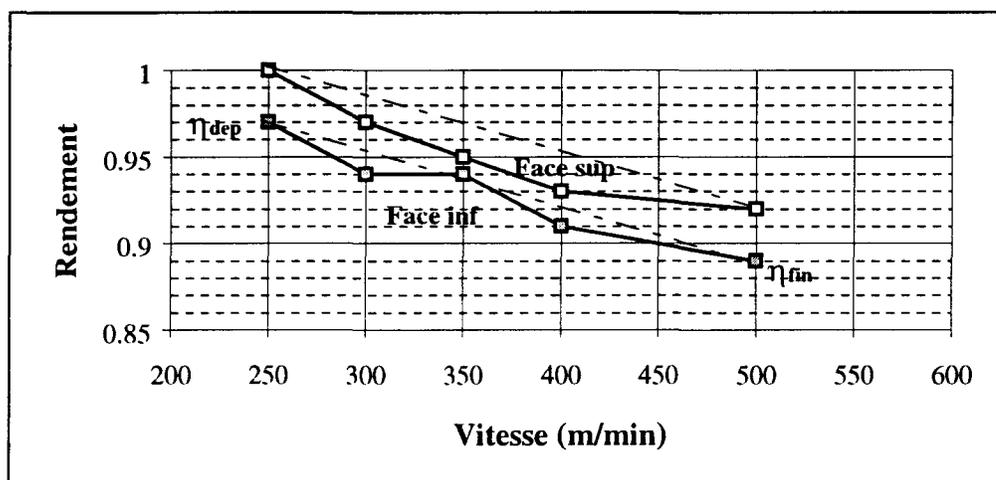


Figure V.17 : Évolution du rendement en fonction de la vitesse.

De la même façon qu'elle calcule la vitesse moyenne de chaque nouvel incrément entrant dans la zone d'étamage, la régulation peut déterminer, à condition de connaître η_{dep} et η_{fin} , le rendement intermédiaire $\eta(i)$ de la ligne correspondant au passage de cet incrément.

Ainsi, à chaque nouveau pas de la régulation, le taux de consigne appliqué à l'incrément i qui arrive en face du premier redresseur en fonctionnement sera :

$$\eta(i) = \eta_{dep} + (\eta_{fin} - \eta_{dep}) \times \frac{v_{moy}(i) - v_{dep}}{v_{fin} - v_{dep}} \quad (V.19)$$

III/ 3.3.6. Exemples :

Les exemples suivants sont les résultats de simulations effectuées à partir des macros développées sous Excel.

➤ Le premier cas montre une accélération de 420 à 580 m/min, avec une quantité visée de 42,3. Les points les plus intéressants à développer dans ce cas sont :

✓ pas 1 : Dernier pas du régime permanent de départ, la partie fixe est constituée des redresseurs 1, 2 et 3, et la partie mobile du seul redresseur 4.

✓ pas 2 : Début du transitoire. L'algorithme d'accélération prend la main. Le contrôle de capacité provoque la mise en route virtuelle du redresseur 5 qui s'enclenche mais ne débitera une intensité qu'au pas n°5.

✓ pas 3 à 24 : L'évolution de la saturation est prise en compte tout au long du régime transitoire, comme le montre entre autre le comportement du redresseur 1. Le plus de

CHAPITRE V : ÉTUDE DE LA NOUVELLE RÉGULATION

redresseurs possibles sont utilisés à intensité maximum, le complément étant fait par le dernier pont tant que la capacité de ce dernier le permet. Dans le cas contraire la répartition se fait en équirépartition sur les deux derniers redresseurs jusqu'à ce que l'avant dernier puisse être utilisé au maximum tout en laissant une consigne supérieure à 2250 A sur le dernier pont.

✓ pas 25 : La vitesse finale est atteinte et tous les redresseurs prévus sont en fonctionnement, l'algorithme d'accélération est terminé est la régulation passe en régime permanent.

✓ pas >25 : Le traitement des derniers incréments ayant subi une variation de vitesse durant leur passage s'achève progressivement et le régime final se met en place.

	Vit	Qtot	1		2		3		4		5		6		Irefmin	Irefmax
dép	420	42.3	4500	1	4500	1	4500	1	4250	2	0	0	0	0	3416	4500
fin	580	42.3	4051	1	4500	1	4079	1	4500	1	3691	2	3691	2	3416	4500

Pas	Vit	1		2		3		4		5		6	
		Int	qr										
1	420	4500	32	4500	21	4500	10	4250	0				
2	420	4500	32	4500	21	4500	10	4296	0		0		
3	429	4500	32	4500	21	4500	11	4437	0		0		
4	438	4500	32	4500	22	4500	11	2361	5		0		
5	447	4500	32	4500	22	4500	12	2531	6	2361	0		
6	456	4500	32	4500	22	4500	12	2723	6	2531	0		
7	464	4500	33	4500	23	4500	13	2911	6	2723	0		
8	472	4500	33	4500	23	4500	13	3095	6	2911	0		
9	480	4500	33	4500	24	4500	14	3276	7	3095	0		
10	488	4500	33	4500	24	4500	14	4500	5	3276	0		
11	496	4500	33	4500	24	4500	15	4500	5	2388	0		
12	504	4500	33	4500	24	4500	15	4500	6	2739	0		
13	512	4500	34	4500	25	4500	16	4500	7	3083	0		
14	519	4500	34	4500	25	4500	16	4500	7	3421	0		0
15	527	4458	34	4500	25	4486	16	4500	8	3753	0		0
16	534	4402	34	4500	25	4430	17	4500	8	4079	0		0
17	541	4346	34	4500	26	4375	17	4500	9	2222	4		0
18	548	4292	34	4500	26	4320	18	4500	9	2410	4	2222	0
19	556	4238	35	4500	26	4267	18	4500	10	2617	5	2410	0
20	562	4185	35	4500	27	4213	19	4500	11	2829	5	2617	0
21	569	4132	35	4500	27	4161	19	4500	11	3034	5	2829	0
22	576	4080	35	4500	27	4109	20	4500	12	4109	4	3034	0
23	580	4051	35	4500	27	4079	20	4500	12	3386	6	2334	0
24	580	4051	35	4500	28	4079	20	4500	12	3521	6	3386	0
25	580	4051	35	4500	28	4079	20	4500	13	3616	6	3521	0
26	580	4051	35	4500	28	4079	20	4500	13	3669	6	3616	0
27	580	4051	35	4500	28	4079	20	4500	13	3691	6	3669	0
28	580	4051	35	4500	28	4079	20	4500	13	3691	6	3691	0
29	580	4051	35	4500	28	4079	20	4500	13	3691	6	3691	0
30	580	4051	35	4500	28	4079	20	4500	13	3691	6	3691	0

➤ Le second cas montre un ralentissement de 500 à 350 m/min, avec une quantité visée de 48,8.

Les points les plus intéressants à développer dans ce cas sont :

✓ pas 1 : C'est le dernier pas du régime permanent de départ, la partie fixe est constituée des redresseurs 1, 2 et 3, et la partie mobile des redresseurs 4, 5 et 6.

✓ pas 2 : C'est le début du transitoire. L'algorithme de ralentissement prend la main, les quatre premiers ponts sont au maximum et le complément se fait sur les deux derniers.

✓ pas 3 à 18 : La répartition suit toujours le même schéma; le nombre de redresseurs est utilisé à pleine échelle et le complément se fait en équirépartition sur les deux derniers ponts jusqu'à ce que l'avant dernier puisse supporter seul le complément. A ce moment le dernier redresseur peut être coupé.

✓ pas 19 La vitesse finale est atteinte et seuls les redresseurs prévus sont en fonctionnement, l'algorithme de ralentissement est terminé et la régulation passe en régime permanent.

✓ pas >19 : Le traitement des derniers incréments ayant subi une variation de vitesse durant leur passage s'achève progressivement et le régime final se met en place.

Exemple 2: Ralentissement de 500 à 350 m/min.

	Vit	Qtot	1		2		3		4		5		6		Irefmin	Irefmax
dép	500	48.8	4500	1	4500	1	4500	1	3627	2	3627	2	3627	2	3416	4500
fin	350	48.8	4500	1	4500	1	4500	1	3567	2	0	0	0	0	3416	4500

Pas	Vit	1		2		3		4		5		6	
		Int	qr										
1	500	4500	40	4500	31	4500	22	3627	15	3627	7	3627	0
2	500	4500	40	4500	31	4500	22	4500	13	3570	7	3599	0
3	492	4500	40	4500	30	4500	21	4500	12	3072	6	3570	0
4	484	4500	39	4500	30	4500	21	4500	12	2969	6	3072	0
5	476	4500	39	4500	30	4500	21	4500	12	2830	6	2969	0
6	468	4500	39	4500	30	4500	20	4500	11	2657	6	2830	0
7	459	4500	39	4500	29	4500	20	4500	10	2465	6	2657	0
8	451	4500	39	4500	29	4500	19	4341	10	2269	5	2465	0
9	442	4500	38	4500	28	4500	19	4136	10	4341	0	2269	0
10	433	4500	38	4500	28	4500	18	3928	9	4136	0		
11	424	4500	38	4500	28	4500	17	3716	9	3928	0		
12	415	4500	38	4500	27	4500	17	3500	9	3716	0		
13	406	4500	38	4500	27	4500	16	3280	8	3500	0		
14	396	4500	37	4500	26	4500	15	3055	8	3280	0		
15	386	4500	37	4500	25	4500	14	2826	8	3055	0		
16	376	4500	37	4500	25	4500	13	2592	7	2826	0		
17	365	4500	36	4500	24	4413	13	2364	7	2592	0		
18	354	4500	36	4500	23	4232	12	4413	0	2364	0		
19	350	4500	36	4500	23	4500	11	4232	0				
20	350	4500	36	4500	23	4500	10	3717	0				
21	350	4500	36	4500	23	4500	10	3595	0				
22	350	4500	36	4500	23	4500	10	3567	0				
23	350	4500	36	4500	23	4500	10	3567	0				
24	350	4500	36	4500	23	4500	10	3567	0				
25	350	4500	36	4500	23	4500	10	3567	0				
26	350	4500	36	4500	23	4500	10	3567	0				
27	350	4500	36	4500	23	4500	10	3567	0				
28	350	4500	36	4500	23	4500	10	3567	0				
29	350	4500	36	4500	23	4500	10	3567	0				
30	350	4500	36	4500	23	4500	10	3567	0				

CHAPITRE VI:
CONCLUSIONS

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour but de définir une nouvelle régulation de la ligne d'étamage électrolytique de Sollac Mardyck.

Le déroulement des chapitres a été réalisé de façon à présenter étape par étape les différents axes de recherches qui furent indispensables à la synthèse finale.

C'est ainsi que l'étude de la répartition primaire du courant sur la bande a montré des fluctuations possibles de la densité de courant sur cette dernière si certaines précautions ne sont pas prises, telles que :

- le verrouillage des supports d'anodes, mis en place afin d'éviter les variations inopinées de la distance entre les anodes et la bande. De cette façon, non seulement la répartition du courant sur la bande est constante, mais la dissolution des anodes est uniforme sur toute leur longueur et respecte l'estimation d'usure faite par le calculateur ;
- le respect des fourchettes de température et des rapports de concentrations des constituants de l'électrolyte afin de maintenir la résistivité du bain constante.

D'autre part, la limitation des effets hydrodynamiques dans les cellules permettrait d'éviter une usure non uniforme des anodes, et si l'influence de l'épaisseur de la bande reste mineure pour l'instant il deviendra nécessaire de revoir les distances entre la bande et les têtes d'anodes en cas de nouvelles diminutions d'épaisseur, afin de rééquilibrer la courbe de répartition primaire du courant.

En ce qui concerne l'effet de saturation des redresseurs, la mise en équation du phénomène permet une modélisation précise. En effet, l'erreur moyenne totale entre le modèle et la réalité est de 4,13 % pour la face supérieure et de 3,76 % pour la face inférieure, toutes vitesses confondues. Ce qui correspond, en terme d'intensité, à une erreur comprise entre 200 et 300 ampères par redresseur, ce qui est la tolérance due aux imprécisions de mesure. Ce modèle vient s'intégrer pleinement dans la nouvelle régulation.

L'étude suivante avait pour but de redéfinir exactement les zones de fonctionnement idéales pour avoir un étamage de bonne qualité, à travers les paramètres de température et de concentration en étain stanneux de l'électrolyte d'une part, et de la densité de courant de l'électrolyse d'autre part. Elle a été présentée à travers la résolution de l'apparition d'un défaut d'aspect sur la bande. La mise en oeuvre des actions décidées a fait chuter le tonnage d'acier dérouté de façon significative puisque l'objectif initial était d'arriver en fin d'année 1996 à un ratio de 7 t/10 kt et que le résultat obtenu était de 0.3 t/10 kt en novembre 1996, ce qui correspond à un gain annuel de 360 kF.

La tendance du marché de l'étamage vers des épaisseurs de revêtement de plus en plus faibles implique une précision de plus en plus grande dans le processus d'électrodéposition. Un des problèmes majeurs de la régularité du revêtement sur la bande au cours du temps est la capacité de prévoir le rendement exact de la ligne en fonction de son environnement direct à un instant précis. Le développement d'un modèle de détermination de ce rendement utilisant des réseaux de neurones a permis d'obtenir une précision très fine de l'estimation du taux d'étain

déposé sur la bande dès les premiers mètres de fonctionnement, c'est à dire durant toute la période qui précède le premier diagnostic de la jauge de revêtement. La mise en situation industrielle de ce modèle a montré que lors des changements de configurations, dans aucun cas l'écart entre le taux réel et le taux visé provoqué par l'estimation du rendement du modèle neuronal n'est inférieur à -5%, et que 20% seulement des écarts positifs sont entre 5 et 10%. La moyenne se situe à 3.3% pour le modèle neuronal contre 13.3% pour l'ancienne table, ce qui fait que le gain apporté par cette modernisation est estimé à 500kF par an, dans la seule utilisation des changements de taux. Une extension de ce réglage prédictif aux autres transitoires (changements de vitesses, de largeur produit) devrait être mise en place prochainement avec la rénovation générale de la régulation du dépôt d'étain et augmentera d'autant plus les gains de production.

Ces études consécutives, émanant d'un audit technique approfondi de la ligne d'étamage de Sollac Mardyck, ont débouché sur l'élaboration d'algorithmes nouveaux de régulation, avec une approche plus anticipative de la gestion des phases transitoires. Le principe se divise en deux parties :

- un module est chargé de définir la configuration optimale des redresseurs à utiliser en fonction de leur prédisposition à la saturation, ainsi que la densité de courant idéale en fonction des zones de fonctionnements garantissant un dépôt couvrant. Cet organe utilise les données de l'environnement proche (type de produit, conditions de fonctionnement) et détermine le fonctionnement de la ligne à partir des modèles définis dans les chapitres II, III, et IV ;

- un module qui gère le suivi de la bande dans la zone d'étamage incrément par incrément, tant dans les régimes permanents que lors des phases transitoires, en respectant les critères définis par la stratégie. Une des approches nouvelles de cette partie est d'anticiper les changements de vitesse, plutôt que de réagir au fur et à mesure des variations.

L'utilisation de cette nouvelle régulation permet d'avoir sur la bande un taux d'étain régulier quelque soit le mode de fonctionnement, le but fixé étant de pouvoir garantir des variations du revêtement inférieures à 10% autour du taux visé.

Le développement s'est arrêté au stade des simulations sur ordinateurs PC qui donnent des résultats très encourageants. La phase d'implantation industrielle est lancée et devrait être finalisée en fin d'année 1999.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [ABDI-94] **ABDI Hervé**, *Les réseaux de neurones*, PUG, 1994
- [AUB-76] **AUBRUN P.**, *Interprétation de quelques faits se produisant lors de l'étamage électrolytique en milieu agité*, Revue de métallurgie, pp. 734-744, Novembre 1976
- [AUB-M7960] **AUBRUN P.**, *Produits plats minces : aciers pour emballage*, Techniques de l'ingénieur, traité de métallurgie, M7960
- [BAC-87] **BACKELANDT B., GYTHIEL J.C., DE GUERRY**, *Étamage : régulation de l'épaisseur de l'étain par microprocesseur*, La technique moderne, pp41-42, Mars-Avril 1987
- [BER-94] **BÉRANGER G., HENRY G., SANZ G.**, *Le livre de l'acier*, Éditeurs scientifiques, chap. 27, 1994
- [BOR-96] **BORDES A.**, *Les lignes de revêtements : Aciers pour emballage*, Centre d'Études Supérieures de la Siderurgie, 1996
- [BOR-90] **BORNE P., DAUPHIN-TANGUY G., RICHARD J.P., et al**, *Commande et optimisation des processus, Méthodes et techniques de l'ingénieur*, Technip, 1990
- [CAT-K810] **CATONNE J.C.**, *Constantes thermodynamiques électrochimiques - Potentiels standards des solutions aqueuses*, Techniques de l'ingénieur, Constantes d'électrochimie appliquée, K810
- [CHA-96] **CHAUVEAU E.**, *Mécanismes d'électrodéposition*, Centre d'Études Supérieures de la Siderurgie, 1996
- [CYB-89] **CYBENKO G.**, *Approximation by superpositions of a sigmoidal function*, *Mathematics of control, signal and system*, vol. 2 pp 303-314, 1989
- [DAV-91] **DAVALLO E., NAIM P.**, *Des réseaux de neurones*, Paris Eyrolles, 1991
- [DES-97] **DESCHAMPS D., BORNE P., HANNICQUE D.**, *Regulation model of an electrolytic tinning line*, 15th IMACS World Congress, vol. 3 pp. , Berlin 1997
- [DES-98] **DESCHAMPS D., BORNE P., HANNICQUE D.**, *Modélisation du rendement électrolytique d'une ligne d'étamage par réseau neuronal*, Séminaire du GRAISyHM, pp 54-61. , 19 mars 1998
- [DOH-94] **DOHERTY S.K., GOMM J.B., WILLIAMS D.**, *Practical considerations on the implementation of neural networks for non-linear system identification*, IEEE-SMC, IMACS International Symposium on Signal Processing Robotics and Neural Networks, pp. 564-567, 1994
- [DROS-92] **DROESBEKE J.J.**, *Éléments de statistique*, Ellipse, 1992

BIBLIOGRAPHIE

- [DZI-94] **DZIELINSKI A.**, *Function approximation with neural networks*, IEEE-SMC, IMACS International Symposium on Signal Processing Robotics and Neural Networks, pp. 560-563, 1994
- [EPEL-76] **EPELBOIN A., KSOURI M., LEJAY E., et al.**, *Intermédiaires adsorbés et électrocristallisation*, J. Electroanal. Chem., n°65 pp373-389, 1976
- [GRA-92] **GRAIS Bernard**, *Méthodes statistiques*, Dunod, 1992
- [GUY-88] **GUYON M.L., BILLEN L., FRITZINGER B. et al.**, *Connaissance de l'étamage industriel*, Rapport interne 1871.MLG/YS du Centre de Recherches du Fer Blanc, 1988
- [GUY-90] **GUYON M.L., TISSIER F., FRITZINGER B. et al.**, *Détermination de la plage utile d'un électrolyte industriel Partie II*, Rapport interne 2159.MLG/YS du Centre de Recherches du Fer Blanc, 1990
- [GUY2-90] **GUYON M.L., TISSIER F., FRITZINGER B. et al.**, *Incidence des conditions d'électrodéposition sur le rendement de l'étamage*, Rapport interne 2188.MLG/YS du Centre de Recherches du Fer Blanc, 1990
- [GUY-89] **GUYON M.L., TISSIER F., PIERRAT S. et al.**, *Détermination de la plage utile d'un électrolyte industriel Partie I*, Rapport interne 2061.MLG/YS du Centre de Recherches du Fer Blanc, 1989
- [HER-94] **HERAULT J., JUTTEN C.**, *Réseaux de neurones et traitement du signal*, Hermès, 1994
- [HER-91] **HERTZ J., ANDERS K., PALMER R.G.**, *Introduction to the theory of neural computation*, Santa Fe Institute, vol.1, 1991
- [HOE-84] **HOEL Paul G.**, *Statistique mathématique*, A.Colin, 1984
- [JOD-94] **JODOUIN J.F.**, *Les réseaux neuromimétiques*, Hermès, 1994
- [KRI-96] **KRICKEBERG Klaus**, *Petits cours de statistiques*, Springer, 1996.
- [LAC-M1591] **LACOURCELLE L.**, *Revêtements métalliques par voie électrolytique*, Techniques de l'ingénieur, M1591
- [LES-96] **LESAGE M.**, *Détermination de la capacité d'une jauge de mesure de revêtement*, Centre d'Études Supérieures de la Siderurgie, 1996
- [MON-97] **MONFORT Alain**, *Cours de statistique mathématique*, collection ESA, Economica, 1997
- [OSO-92] **OSOWSKI S.**, *Fast learning algorithms for feedforward multilayer neural networks*, IEEE Trans. On circuits and systems, vol.39, pp. 453-474, 1992

BIBLIOGRAPHIE

- [PLA-86] **PLAUT D., NAWLAN S., HINTON G.**, *Experiments on learning by back-propagation*, technical report CMU-CS-86-126, Department of computer Science, Canargie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- [ROS-J1802] **ROSSET R.**, *Conduction processus faradiques et non faradiques*, Techniques de l'ingénieur, Électrochimie, J1802
- [ROS-J1804] **ROSSET R.**, *Courbes Intensité-potentiel : théorie et pratique*, Techniques de l'ingénieur, Électrochimie, J1804
- [USS-91] **U.S.Steel group**, *Manual for the USS Electrolytic tinning process*, Seventh edition, July 1991
- [VAN-80] **VAN HAASTRECHT G.C., NEDRELOF C.R.**, *Mathematical modelling of current distribution during tinplate production*, 2nd International Tinplate Conference, London, paper n°8, 1980
- [VOG-88] **VOGL T.P., MANGIS J.K., RIGLER A.K. et al.**, *Accelerating the convergence of the backpropagation method*, Biological Cybernetics, vol 59, pp. 257-263, 1988

Résumé

La protection contre la corrosion apportée par l'étain fait que le marché mondial de l'acier étamé est essentiellement orienté vers la production d'emballages, parmi lesquels la fabrication des boites boissons est en constante expansion. Les exigences liées à ce produit sont très fortes, car il faut être capable de déposer sur une bande d'acier de grande largeur (>1m) qui défile à une vitesse élevée (maximum 720 m/min) une couche d'étain de moins d'un micron avec une marge d'erreur inférieure à 10% du taux. Ce mémoire présente un modèle de régulation d'une ligne d'étamage électrolytique qui répond à ces critères. Après une présentation générale, le processus d'électrodéposition est expliqué en détail, suivi de la présentation de la ligne d'étamage de Sollac Mardyck. Puis l'étude porte sur les phénomènes de répartition locale du courant dans les cellules d'électrodéposition et propose une modélisation des limitations du courant global causées par les conditions de production. La troisième partie de ce mémoire définit les plages de fonctionnement optimal de la ligne à travers la résolution de l'apparition d'un défaut d'aspect engendré par une dérive du process. La maîtrise de la quantité d'étain déposée sur une bande d'acier dépendant fortement du rendement du processus d'électrodéposition, un modèle de détermination de ce rendement est ensuite présenté, modèle construit à partir d'un réseau de neurones. La synthèse de ces études débouche finalement sur la proposition d'une nouvelle architecture de la régulation de la ligne d'étamage, permettant un dépôt très précis de l'étain sur la bande d'acier, que ce soit en régime permanent ou lors des phases transitoires de fonctionnement.

