

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6

Spécialité
ÉLECTRONIQUE
présentée

par **Gaétan MONARI**

pour obtenir le titre de **DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PARIS 6**

Sujet de la thèse :

Sélection de modèles non linéaires par leave-one-out

Etude théorique et application des réseaux de neurones au procédé de soudage par points

Soutenue le 3 novembre 1999

devant le jury composé de :

Mme	S. THIRIA	Rapporteur
M.	S. CANU	Rapporteur
Mme	B. DORIZZI	Examineur
M.	O. DIERAERT	Examineur
M.	G. DREYFUS	Examineur
M.	J. FRIGIÈRE	Examineur
M.	P. GALLINARI	Président
M.	G. PRADÈRE	Invité

REMERCIEMENTS

Le travail de recherche que décrit ce mémoire a été effectué dans le cadre d'une convention CIFRE entre la société SOLLAC (Groupe USINOR) et le Laboratoire d'Électronique de l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI).

Ce projet n'aurait jamais vu le jour sans Monsieur Francis SAUVAGE - directeur du Centre de Recherche et de Développement Métallurgiques (CRDM) de SOLLAC-Dunkerque - dont l'intérêt pour les techniques d'ingénierie de la connaissance n'est plus à démontrer, et qui a su faire le pari d'une combinaison réussie entre réseaux de neurones et soudage par points. Monsieur Hugues OBERLÉ - ancien responsable du Service Soudage par Résistance du CRDM – s'est également approprié ce défi et, tant par sa connaissance approfondie du procédé que sa formidable capacité d'analyse, a pu orienter judicieusement mes travaux pendant la première moitié de ma thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus sincère gratitude.

Monsieur le Professeur Gérard DREYFUS, directeur du laboratoire d'Électronique de l'ESPCI, a assuré avec rigueur et disponibilité l'encadrement universitaire de cette thèse. Sans a priori particulier, il a su concilier son intérêt pour les questions fondamentales avec les exigences très pratiques de la modélisation du soudage par points. Je tiens à le remercier, tant pour sa contribution au développement et à la présentation des idées décrites dans ce mémoire, que pour son soutien et pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ces trois dernières années.

Je suis extrêmement reconnaissant à Monsieur Olivier DIERAERT, responsable du Service Soudage par Résistance du CRDM, d'avoir repris "au vol" le suivi de cette étude, bien que découvrant à la fois les réseaux de neurones et le soudage par points. Il m'a permis de poursuivre mes travaux de manière autonome et s'est toujours impliqué avec pertinence dès que la situation l'exigeait.

Madame Sylvie THIRIA, Professeur à l'Université de Versailles et Monsieur Stéphane CANU, Professeur à l'INSA de Rouen ont accepté de consacrer une partie de leur temps à la lecture de mon manuscrit et à la rédaction d'un rapport sur mes travaux. Je les remercie d'autant plus d'avoir accepté cette mission que leurs commentaires ont sans aucun doute contribué à clarifier mes idées et à préciser la validité de certains de mes résultats.

Monsieur Joël FRIGIÈRE, de la Direction de Informatique Scientifique et Avancée d'USINOR a contribué à la diversité de mon jury de thèse en y apportant sa grande expérience de l'intégration en milieu industriel des techniques d'Ingénierie des Connaissances. Je lui en suis très reconnaissant.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Madame Bernadette DORIZZI, Professeur à l'INT d'EVRY, et Monsieur Patrick GALLINARI, Professeur à l'Université PARIS 6, qui ont accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je suis très sensible à l'honneur que m'a fait Monsieur Gérard PRADÈRE, ingénieur soudeur chez RENAULT, en acceptant mon invitation.

Je tiens à remercier Isabelle RIVALS et Léon PERSONNAZ, maîtres de conférences au laboratoire d'Électronique de l'ESPCI, pour avoir attiré mon attention sur l'utilisation du développement de Taylor, et notamment pour avoir démontré analytiquement, à partir d'une relation existant dans la littérature (formule 3.8), la relation (3.9) que j'avais établie empiriquement à partir de simulations.

André ELISSEEFF, étudiant en thèse à l'Université de Lyon 2, m'a permis de situer mes travaux par rapport aux "Vapnikeries" et autres études théoriques sur la validité de l'estimation des performances en généralisation d'un modèle. Je lui suis grandement reconnaissant pour la pertinence de ces remarques et pour sa disponibilité.

Je tiens par ailleurs à remercier l'équipe du laboratoire d'Électronique de l'ESPCI : Frédérique MONCET, Brigitte QUENET, Isabelle RIVALS, Yacine OUSSAR, Léon PERSONNAZ, Jean-Luc PLOIX, Pierre ROUSSEL, Mathieu STRICKER, sans oublier Madame DROUDE, pour m'avoir accueilli, conseillé et soutenu pendant ces trois années.

De même, j'adresse un grand merci à tout le service Soudage par Résistance du CRDM en réservant une mention particulière à Anne CLAD et Thomas DUPUY, qui ont bien voulu me faire profiter de leur expertise en soudage par points, et qui ont indéniablement contribué au développement et à la rédaction des idées présentées dans ce document.

Anne, dont je partage l'existence avec bonheur depuis bientôt dix ans, m'a considérablement soutenu tout au long de ce projet, depuis son origine jusqu'à la rédaction du manuscrit final. Je la remercie du fond du cœur pour son soutien, sa disponibilité et sa patience.

Je n'aurais sans doute pas pu me concentrer uniquement sur mes travaux de recherche sans le concours d'un certain nombre de personnes du CRDM, et en premier lieu sans Marie-Claude SMOCH, Marie-Noëlle SWAL et Christine DEGROOTE. Je me permets donc de leur adresser l'expression de ma plus profonde affection.

Enfin j'aimerais associer à ce moment particulier de ma vie mes parents, mes frères et tous mes amis...

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1 INTRODUCTION AUX RÉSEAUX DE NEURONES	3
2 GÉNÉRALISATION ET ESTIMATION DES PERFORMANCES	13
3 ETUDE THÉORIQUE DU LEAVE-ONE-OUT	31
4 UTILISATION DU LEAVE-ONE-OUT POUR LA SÉLECTION DE MODÈLES	47
5 UN NOUVEL ALGORITHME D'APPRENTISSAGE	65
6 INTRODUCTION AU SOUDAGE PAR POINTS	75
7 LA MODÉLISATION DU SOUDAGE PAR POINTS	87
8 DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE NEURONAL DU SOUDAGE PAR POINTS	105
CONCLUSION	131
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	133
ANNEXE 1 : CALCUL DES h_{ii}	141
ANNEXE 2 : SURAJUSTEMENT ET REDONDANCE DE COEFFICIENTS	143
ANNEXE 3 : DÉMONSTRATION DE LA RELATION (3.8)	147
ANNEXE 4 : PROCÉDÉ D'ORTHONORMALISATION DE GRAM-SCHMIDT	149
ANNEXE 5 : CARACTÉRISTIQUES DES PRODUITS UTILISÉS	151

TABLE DES MATIERES DETAILLEE

INTRODUCTION	1
1 INTRODUCTION AUX RÉSEAUX DE NEURONES	3
Résumé	3
1.1 Introduction	3
1.1.1 Les neurones	3
1.1.2 Les réseaux de neurones non bouclés	5
1.2 Propriété fondamentale des réseaux de neurones non bouclés	7
1.2.1 L'approximation universelle	7
1.2.2 La parcimonie	8
1.2.3 De l'approximation de fonction à la modélisation statistique	8
1.3 Mise en œuvre des réseaux de neurones	9
1.3.1 la fonction de coût	10
1.3.2 Le calcul du gradient	10
1.3.3 L'algorithme d'optimisation	10
2 GÉNÉRALISATION ET ESTIMATION DES PERFORMANCES	13
Résumé	13
2.1 Introduction	14
2.2 Le dilemme biais / variance	14
2.3 La validation croisée	16
2.4 La régularisation	18
2.4.1 Early stopping	18
2.4.2 Pénalisation de la fonction de coût (weight decay)	19
2.5 Le surajustement	20
2.5.1 Discussion : qu'est-ce que le surajustement ?	20
2.5.2 Détection du surajustement	21
2.6 Les intervalles de confiance	23
2.6.1 Introduction	23
2.6.2 Différence entre performance du modèle et intervalle de confiance ?	24
2.6.3 Comment interpréter les intervalles de confiance ?	27
2.7 Bornes sur les performances de généralisation	29
3 ETUDE THÉORIQUE DU LEAVE-ONE-OUT	31
Résumé	31
3.1 Introduction	31
3.2 Approximation locale de la solution des moindres carrés	32
3.3 Effet du retrait d'un exemple de l'ensemble d'apprentissage	33
3.3.1 Effet du retrait d'un exemple sur sa prédiction	34
3.3.2 Effet du retrait d'un exemple sur l'intervalle de confiance de sa prédiction	35

3.3.3	Interprétation des h_{ij}	36
3.4	Validation des résultats de leave-one-out	38
3.4.1	Interprétation géométrique de l'estimation des performances en leave-one-out	39
3.4.2	Limite de l'approche : cas du retrait d'un exemple avec forte influence	42
3.5	Conclusion	46
4	UTILISATION DU LEAVE-ONE-OUT POUR LA SÉLECTION DE MODÈLES	47
	Résumé	47
4.1	Introduction - définition du problème	47
4.2	Sélection de modèle sur la base des performances d'apprentissage (pour une architecture donnée)	49
4.2.1	1 ^{ère} méthode : choisir le modèle pour lequel l'EQMA est minimale	50
4.2.2	2 ^{ème} méthode : choisir un "minimum de rang plein" de la fonction de coût	52
4.2.3	Conclusion	55
4.3	Sélection de modèle sur la base de E_a (pour une architecture donnée)	56
4.4	Sélection des minima sur la base de E_p (pour une architecture donnée)	57
4.4.1	Qualité de la sélection	57
4.4.2	Qualité de l'estimation des performances de généralisation	58
4.5	Sélection de l'architecture optimale	60
4.5.1	Utilisation des intervalles de confiance	61
4.5.2	Amélioration progressive des modèles	63
4.6	Conclusion	64
5	UN NOUVEL ALGORITHME D'APPRENTISSAGE	65
	Résumé	65
5.1	Introduction	65
5.2	Algorithme pour la minimisation de J^*	66
5.2.1	Calculs du coût et du gradient	66
5.2.3	Modification des coefficients	67
5.2.3.a	<i>Rappel : l'algorithme de Levenberg-Marquardt</i>	67
5.2.3.b	<i>Adaptation à la minimisation de J^*</i>	68
5.2.4	En résumé	69
5.3	Mise en œuvre de l'algorithme	70
5.3.1	Etude des contraintes	70
5.3.2	Mise en œuvre de l'algorithme	71
5.4	Conclusion	73
6	INTRODUCTION AU SOUDAGE PAR POINTS	75
	Résumé	75
6.1	Généralités	75
6.1.1	Principe	76
6.1.2	Déroulement du cycle de soudage	76
6.1.3	Paramètres de soudage	77
6.1.4	Mécanisme de formation de la soudure	78

6.1.4 Géométrie d'un point soudé	80
6.2 Caractérisation d'une tôle d'acier revêtues	80
6.2.1 Le domaine de soudabilité	81
6.2.2 La dégradation des électrodes	83
6.3 Conclusion	85
7 LA MODÉLISATION DU SOUDAGE PAR POINTS	87
Résumé	87
7.1 Introduction	87
7.2 Modélisation du soudage par points	88
7.2.1 La soudabilité d'une tôle	88
7.2.2 Le point soudé	90
7.2.3 La commande du soudage par points	93
7.2.4 Conclusion	94
7.3 Caractéristiques de la qualité de la soudure	94
7.3.1 Introduction	95
7.3.2 Les signaux électriques	95
7.3.3 Les signaux mécaniques	100
7.3.4 Conclusion	104
8 DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE NEURONAL DU SOUDAGE PAR POINTS	105
Résumé	105
8.1 Introduction	106
8.2 Enjeux de la modélisation	107
8.2.1 Domaine de validité souhaité	107
8.2.2 Incertitude sur la mesure du diamètre de bouton	109
8.3 Principe de la modélisation	111
8.3.1 Base d'apprentissage initiale	112
8.3.2 Sélection des entrées	113
8.3.3 Modélisation et utilisation des intervalles de confiance	115
8.3.4 Conclusion	116
8.4 Application	116
8.4.1 Contrôle de la qualité des soudures	116
8.4.1.a Cas du produit GA	117
8.4.1.b Cas du produit GZ 2	120
8.4.1.c Conclusion et perspectives	122
8.4.2 Dégradation des électrodes	124
8.4.2.a Loi de commande utilisée	124
8.4.2.b Application aux produits GA et GZ 2	125
8.4.2.c Conclusion	127
8.5 Conclusion - perspectives industrielles	128
8.5.1 Conclusion	128
8.5.2 Perspectives industrielles	129

CONCLUSION	131
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	133
ANNEXE 1 : CALCUL DES h_{ii}	141
ANNEXE 2 : SURAJUSTEMENT ET REDONDANCE DE COEFFICIENTS	143
ANNEXE 3 : DÉMONSTRATION DE LA RELATION (3.8)	147
ANNEXE 4 : PROCÉDÉ D'ORTHONORMALISATION DE GRAM-SCHMIDT	149
ANNEXE 5 : CARACTÉRISTIQUES DES PRODUITS UTILISÉS	151

INTRODUCTION

Bien qu'il soit universellement utilisé pour l'assemblage des carrosseries automobiles, le procédé de soudage par points n'est pas encore complètement maîtrisé. En effet, il n'existe pas de méthode fiable pour contrôler de manière non destructive la qualité de soudures, pourtant effectuées à réglages constants : la variabilité du procédé, et en particulier de l'état des électrodes de soudage, est telle que cette qualité change dans des proportions inacceptables.

D'un point de vue pratique, le manque de garantie sur la qualité de chaque soudure oblige à réaliser un nombre excessif de points soudés par pièce. Par ailleurs, la seule méthode dont disposent les industriels pour augmenter leur confiance en la qualité des soudures, est d'utiliser des intensités de soudage significativement plus élevées que nécessaire, ce qui accélère le processus de dégradation des électrodes, et conduit à des arrêts fréquents de la production.

Compte tenu du nombre de phénomènes physiques qui interviennent lors d'une soudure par point, de la rapidité et du caractère transitoire de ces phénomènes, il est exclu d'aborder ce problème par une approche utilisant les techniques de modélisation numérique. En revanche, des travaux récents montrent qu'il peut être avantageux d'avoir recours à des méthodes statistiques. Après examen, la non-linéarité du problème et le nombre de paramètres entrant en jeu font des réseaux de neurones d'excellents candidats à la résolution de cette question : avec des propriétés mathématiques bien établies et des algorithmes d'apprentissage très performants, les réseaux de neurones surpassent, lorsqu'ils sont convenablement mis en œuvre, les techniques classiques de modélisation non linéaire.

L'une des principales difficultés rencontrées par les utilisateurs de modèles statistiques non linéaires est le dimensionnement correct des modèles, de manière à ce qu'ils présentent des performances aussi bonnes lors de leur utilisation (sur une base de test) que lors de leur ajustement (sur une base d'apprentissage). L'une des méthodes utilisées pour procéder à la sélection de modèles est connue sous le nom de *leave-one-out*. Il s'agit d'estimer les performances de généralisation d'un modèle à partir des erreurs de prédiction commises sur un exemple lorsque celui-ci ne fait pas partie de la base d'apprentissage.

La première partie de ce mémoire, qui comprend 5 chapitres, est consacrée à l'étude théorique du *leave-one-out*, au cours de laquelle nous montrerons les limites de la mise en œuvre classique de cette méthode, puis nous définirons une manière plus fiable et plus rapide de procéder. Nous montrerons également la relation existant entre le *leave-one-out* et les intervalles de confiance sur la sortie d'un modèle.

La deuxième partie de ce mémoire, c'est-à-dire les chapitres 6 à 8, a pour but d'exposer les applications de l'étude théorique au contrôle de qualité et à la commande du procédé de soudage par points.

Les définitions relatives aux réseaux de neurones sont présentées dans le chapitre 1, ainsi que la propriété mathématique fondamentale des réseaux à une couche de neurones cachés sigmoïdaux, c'est-à-dire l'approximation parcimonieuse. Le principe de la mise en œuvre des réseaux de neurones par "apprentissage" est ensuite décrit.

Le chapitre 2 débute par une revue des deux principales méthodes employées pour faire face au dilemme biais / variance : la validation croisée, dont le leave-one-out est un cas particulier, et la régularisation. Nous introduisons ensuite les notions de surajustement et d'intervalles de confiance associés à la sortie d'un modèle, notions qu'il est indispensable de maîtriser lors de la mise en œuvre de modèles non linéaires paramétrés.

Dans le chapitre 3, nous voyons qu'il est possible, grâce à l'utilisation d'un développement de Taylor, de calculer l'effet, sur le modèle, du retrait d'un exemple de la base d'apprentissage et nous introduisons la notion d'influence d'un exemple sur l'estimation des paramètres d'un modèle. Dans certains cas, nous montrons pourquoi la méthode classique, par minimisation du coût quadratique, ne permet pas d'envisager raisonnablement le retrait d'un exemple de la base d'apprentissage.

La sélection de modèles sur le principe du leave-one-out est examinée en détail dans le chapitre 4. Nous prouvons que l'estimation des performances de généralisation d'un modèle, calculée d'après les résultats du chapitre 3, est à la fois plus fiable et plus rapide que celle qui est obtenue par la mise en œuvre traditionnelle du leave-one-out. Par ailleurs, nous définissons un critère de sélection de modèles à partir des intervalles de confiance sur la prédiction des exemples d'apprentissage.

Le chapitre 5, qui clôt la première partie de ce mémoire, présente un nouvel algorithme d'apprentissage fondé sur une fonction de coût définie d'après les résultats du chapitre 4. Nous montrons les perspectives qu'offre cet algorithme lorsqu'il est mis en œuvre après convergence de la minimisation classique du coût quadratique.

Les principes fondamentaux du soudage par points sont présentés dans le chapitre 6. Nous insistons plus particulièrement sur les notions de *domaine de soudabilité* d'un produit et de *durée de vie* des électrodes.

Le chapitre 7 débute par un exposé des différentes possibilités d'envisager la modélisation du soudage par points. Nous montrons que la prédiction de la qualité d'une soudure à partir des conditions opératoires nécessite la mesure, pendant le processus de soudage, de grandeurs pertinentes caractérisant le développement du noyau fondu. La deuxième moitié de ce chapitre est consacrée à l'étude de 4 signaux acquis lors d'une soudure, et à la définition de caractéristiques de la qualité du point.

Le chapitre 8 est divisé en deux parties bien distinctes :

- à partir des spécificités du procédé de soudage par points et des outils présentés dans les 5 premiers chapitres de ce mémoire, nous proposons une méthodologie précise permettant de construire et d'améliorer progressivement un modèle de prédiction du diamètre de bouton valable pour un produit donné dans un domaine de validité choisi,
- l'application de cette procédure sur deux types de tôles est ensuite présentée. Après avoir donné les performances des modèles ainsi obtenus, nous examinons l'impact de ces modèles, sur le processus de dégradation des électrodes, lorsque ceux-ci sont mis en œuvre dans le cadre d'une loi de commande optimisée de l'intensité de soudage.

