

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA RÉSISTANCE À LA
FLEXION EN PIED DE DENT D'ENGRENAGES
CYLINDRIQUES À DENTURE DROITE TRAITÉS
THERMIQUEMENT PAR INDUCTION**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© SAMUEL AUSTIN

décembre 2011

Composition du jury :

Boumédiène Falah, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Jean Brousseau, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Philippe Bocher, codirecteur de recherche, École de technologie supérieure

Mohamed Bouazara, examinateur externe, Université du Québec à Chicoutimi

Dépôt initial le 29 avril 2011

Dépôt final le 15 décembre 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. Jean Brousseau, mon directeur de maîtrise, pour sa direction attentive, sa disponibilité et son support tout au long du projet.

J'aimerais également remercier M. Philippe Bocher, mon codirecteur de maîtrise, pour son aide précieuse et ses commentaires pertinents.

Mes remerciements vont aussi à l'équipe de l'ICIA, tout particulièrement Benjamin Larregain, Florent Bridier et Vincent Savaria pour tout le temps et les efforts qu'ils m'ont dédiés.

Je voudrais également remercier M. Gabriel Caron, étudiant à l'UQAR, pour l'aide qu'il m'a apportée.

Mes remerciements vont au personnel du département de mathématiques, informatique et génie de l'UQAR.

Finalement, je tiens à remercier le CRIAQ pour le financement apporté au projet.

RÉSUMÉ

Les engrenages sont utilisés dans divers secteurs industriels, notamment le secteur aérospatial. La tendance actuelle de l'industrie aérospatiale est de rechercher des moyens de diminuer les émissions polluantes générées par la fabrication et le fonctionnement de leurs produits. Le procédé de fabrication des engrenages comprend une étape de traitement thermique qui a pour effet d'améliorer la résistance à la flexion en pied de dent et à la pression de contact. La cémentation est actuellement le traitement préféré, car il améliore grandement la résistance des engrenages et est un procédé bien maîtrisé. L'induction thermique est un traitement thermique alternatif à la cémentation qui intéresse l'industrie aéronautique parce qu'il est moins polluant et qu'il donne des résultats prometteurs. Le présent mémoire présente une étude expérimentale de la résistance à la flexion en pied de dent de roues droites cylindriques en acier AISI 4340 traitées thermiquement par induction. Lors d'un traitement thermique par induction, plusieurs paramètres peuvent être variés (temps, fréquence, puissance, géométrie de l'inducteur, etc.). Les roues dentées ont été traitées selon neuf traitements différents dans lesquels sont variés le temps, la puissance et la fréquence. La résistance à la flexion en pied de dent est principalement fonction du profil de dureté et du profil des contraintes résiduelles. Seuls les profils de dureté ont été mesurés. Le mémoire explore les liens entre la résistance à la flexion en pied de dent et les paramètres des traitements thermiques par induction.

Mots-clés : induction, roue dentée, engrenage, dureté, fréquence, puissance, flexion, flexion simple

ABSTRACT

Gears are used in various industrial sectors, such as the aerospace sector. The current tendency in the aerospace sector is to look for ways of reducing pollutant emissions generated during the manufacture and operation of their products. The manufacturing process of gears includes a heat treatment step which has the effect of improving the tooth bending strength and the surface durability (pitting). Cementation is currently the preferred treatment because it significantly improves the resistance of gears and is well controlled. Induction is an alternate heat treatment that the aerospace industry is interested in developing because it is cleaner and gives promising results. This paper presents an experimental study of tooth bending strength of spur gears made of AISI 4340 steel heat treated by induction. During an induction heat treatment, several parameters can be controlled (time, frequency, power, inductor geometry, etc.). The gears used in this study have been treated according to nine different induction heat treatments using different adjustments of time, power and frequency. Tooth bending strength is primarily is mainly affected by the hardness profile and the residual stress profile. Only hardness profiles were measured. This thesis explores the relationship between tooth bending strength and induction heat treatment parameters.

Keywords: induction, gear, hardness, frequency, power, bending, single tooth bending fatigue

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ	ix
ABSTRACT.....	xi
TABLE DES MATIÈRES	xiii
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES TABLEAUX	xxi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xxix
SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE	1
CHAPITRE 1 : PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	1
1.1 État de la situation.....	1
1.1.1 Cémentation	2
1.1.2 Induction thermique	4
1.2 Problématique	5
1.3 Objectifs de la recherche	7
1.4 Méthodologie	8
1.5 Plan du mémoire	9
CHAPITRE 2 : APPLICATION DU PROCÉDÉ D'INDUCTION THERMIQUE AUX ENGRENAGES.....	11
2.1 Introduction	11
2.2 Application aux roues dentées cylindriques.....	13
2.2.1 Définitions	13
2.2.2 Facteurs d'influence.....	14
2.2.3 Influence de la fréquence	14
2.2.4 Durcissement superficiel et de contour.....	15
2.2.5 Influence du temps de chauffe sur la dissipation vers le cœur	17
2.2.6 Préchauffe	17
2.2.7 Effet de bord	18

2.3	Modes de défaillance et effets bénéfiques de l'induction thermique	18
2.3.1	Flexion.....	19
2.3.2	Pression de contact	20
2.3.3	Effets bénéfiques de l'induction thermique	20
CHAPITRE 3 : INSTALLATIONS ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX		23
3.1	Caractéristiques physiques des roues dentées	23
3.1.1	Matériau	23
3.1.2	Usinage.....	24
3.2	Machine à induction thermique	26
3.3	Inducteur	27
3.4	Développement des recettes	28
3.4.1	Facteurs d'influence	28
3.4.2	Nomenclature des recettes.....	29
3.4.3	Objectifs de développement de recette.....	31
3.4.4	Méthodologie de développement des recettes.....	32
3.5	Mesure de la profondeur durcie.....	34
3.5.1	Définition de la profondeur durcie	35
3.5.2	Méthodologie de mesure en tête et en creux de dent	36
3.5.3	Méthodologie de mesure à l'emplacement théorique du point le plus contraint en flexion.....	38
3.6	Banc d'essai en flexion simple	41
3.6.1	Description mécanique.....	41
3.6.2	Capteurs.....	47
	Présentation générale.....	47
	Capteurs de force.....	47
	Capteur de couple entre les deux arbres.....	47
	Capteur de déformation.....	48
	Capteur de déplacement	49
	Jauges de déformation ou de propagation de fissures	49

3.6.3	Position d'application de la charge sur la dent	50
3.6.4	Détection des fissures et arrêt automatique	52
3.7	Inspection par particules magnétiques	54
3.8	Essais en flexion simple	55
3.8.1	Espacement des dents soumises aux essais.....	55
3.8.2	Plage visée de nombre de cycles.....	56
3.8.3	Position d'application de la charge sur la dent	56
3.8.4	Ratio de chargement	58
3.8.5	Effets dynamiques.....	59
3.9	Intervalle de confiance et répétition des essais	60
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS		63
4.1	Recettes développées	63
4.2	Description des essais en flexion simple réalisés.....	74
4.3	Données des essais en flexion simple	76
4.3.1	Signaux des capteurs d'un essai en flexion simple.....	76
4.3.2	Moyennes des mesures aux 25 cycles.....	82
4.3.3	Nombre de cycles, longueur des fissures et critère d'arrêt	86
4.4	Mesure de la profondeur durcie	90
4.5	Inspection par particules magnétiques	105
4.6	Détection des fissures et arrêt automatique.....	106
CHAPITRE 5 : ANALYSE DES RÉSULTATS		111
5.1	Retour sur les objectifs.....	111
5.2	Méthodologie	111
5.2.1	Élaboration du modèle	112
5.2.2	Établir le classement des recettes.....	113
5.3	Simplification du modèle	114
5.3.1	Égalité de la valeur de β aux deux charges des essais d'une recette	114
5.3.2	Égalité de la valeur de β pour toutes les recettes	117

5.3.3	Égalité du coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF pour toutes les recettes	120
5.4	Modèle retenu	122
5.5	Comparaisons	132
5.5.1	Comparaisons selon les tests du rapport des vraisemblances	134
5.5.2	Comparaisons multiples de Tukey	137
5.5.3	Synthèse des deux méthodes de comparaison.....	140
5.5.4	Simulation du nombre d'essais à réaliser.....	140
5.6	Discussion des résultats	143
5.6.1	Recettes de classe A versus classe D	143
5.6.2	Recette B2 et chauffe en séquentiel ou en simultané	144
5.6.3	Profondeur durcie de la tangente à 30°	145
5.6.4	Profondeur durcie recommandée	146
5.6.5	Variation de la puissance en moyenne fréquence MF.....	148
5.6.6	Recette A1	149
CHAPITRE 6 : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS.....		151
ANNEXE I : CALCUL DU POINT LE PLUS HAUT DE CONTACT UNIQUE		159
ANNEXE II : ESSAIS DE FLEXION SIMPLE DANS LA LITTÉRATURE		167
ANNEXE III : STATISTIQUES.....		171
ANNEXE IV : MESURES DE MICRODURETÉ		179
ANNEXE V : DÉTECTION DE FISSURE SELON DEUX CAPTEURS DIFFÉRENTS ..		197
ANNEXE VI : RÉPÉTABILITÉ		201
ANNEXE VII : MISE EN PLAN DES ROUES DENTÉES		204
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		206

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Faces avant et arrière d'une roue dentée	13
Figure 2-2 : Exemple de durcissement à cœur.....	16
Figure 2-3 : Exemple de durcissement superficiel ou de contour.....	16
Figure 2-4 : Premier exemple de durcissement intermédiaire	16
Figure 2-5 : Deuxième exemple de durcissement intermédiaire	16
Figure 3-1 : Positionnement des composantes de la machine à induction thermique (non à l'échelle réelle)	27
Figure 3-2 : Classification de la forme de la zone durcie	30
Figure 3-3 : Schématisation de la procédure expérimentale de génération de recettes	33
Figure 3-4 : Profondeur durcie conventionnelle	35
Figure 3-5 : Plans de coupe passant par le milieu de la tête et par le milieu du creux de dent	37
Figure 3-6 : Section de tête et de creux de dent.....	37
Figure 3-7 : Section de tête ou de creux et lignes de mesure en pointillé	37
Figure 3-8 : Point de la tangente à 30 °.....	39
Figure 3-9 : Localisation des contraintes maximales en tension	40
Figure 3-10 : Plan de coupe situé à mi-denture	40
Figure 3-11 : Roue dentée, bloc d'acier et piédestal.....	42
Figure 3-12 : Photo de face du banc d'essai sans la plaque en place	43
Figure 3-13 : Photo de dessus du banc d'essai	43
Figure 3-14 : Photo de l'arrière du banc d'essai avec la plaque arrière en place.....	44
Figure 3-15 : Fourche positionnée entre la cellule de charge et la goupille	45
Figure 3-16 : Bras de levier positionné entre la goupille et l'arbre arrière	45
Figure 3-17 : Angle d'installation du bras de levier au début de chaque essai.....	46
Figure 3-18 : Capteur de déformation.....	48
Figure 3-19 : Circuit de lecture de jauge de propagation de fissure typique	50
Figure 3-20 : Jauge de propagation de fissure collée sur une dent	50

Figure 3-21 : Distance verticale entre l'axe de la roue dentée et la surface supérieure du bloc d'acier.....	51
Figure 3-22 : Point le plus haut de contact unique de la roue dentée inférieure	52
Figure 4-1 : Puissances de chauffe des recettes de classe A	67
Figure 4-2 : Puissances de chauffe des recettes de classe B	67
Figure 4-3 : Puissances de chauffe des recettes de classe C	68
Figure 4-4 : Puissances de chauffe des recettes de classe D	68
Figure 4-5 : Énergie fournie aux recettes de classe A.....	69
Figure 4-6 : Énergie fournie aux recettes de classe B	70
Figure 4-7 : Énergie fournie aux recettes de classe C	70
Figure 4-8 : Énergie fournie aux recettes de classe D.....	71
Figure 4-9 : Force sur le vérin lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1	77
Figure 4-10 : Couple entre les arbres lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1	77
Figure 4-11 : Force sur la dent lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1	77
Figure 4-12 : Déplacement du vérin lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1.....	78
Figure 4-13 : Déformation lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1	78
Figure 4-14 : Propagation de fissure (courbe inférieure) et déformation maximale (courbe supérieure).....	79
Figure 4-15 : Propagation de fissure (courbe inférieure) et force maximale sur la dent (courbe supérieure).....	79
Figure 4-16 : Photo de la jauge collée sur la dent 11 de la roue dentée A1-2.....	81
Figure 4-17 : Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles	82
Figure 4-18 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A1-1	94
Figure 4-19 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A1-1	94
Figure 4-20 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A2-1	95
Figure 4-21 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A2-1	95
Figure 4-22 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A2-2	96
Figure 4-23 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A2-2	96
Figure 4-24 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A3-1	97

Figure 4-25 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A3-1	97
Figure 4-26 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A4-1	98
Figure 4-27 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A4-1	98
Figure 4-28 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée B1-1	99
Figure 4-29 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée B1-1	99
Figure 4-30 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée B2-1	100
Figure 4-31 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée B2-1	100
Figure 4-32 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée C1-1	101
Figure 4-33 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée C1-1	101
Figure 4-34 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée D1-1	102
Figure 4-35 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée D1-1	102
Figure 4-36 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée D2-1	103
Figure 4-37 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée D2-1	103
Figure 4-38 : Profondeur durcie en creux de dent à mi-denture	104
Figure 4-39 : Photos des fissures de la roue dentée A1-2	106
Figure 4-40 : Longueur de la fissure en fonction de la roue dentée et de la charge	107
Figure 4-41 : Conditions d'arrêt ayant interrompu les essais	108
Figure 5-1 : Nombre de cycles des essais à 5,4 kN (recettes triées selon $t_{0,5}$ décroissant)	125
Figure 5-2 : Nombre de cycles des essais à 5,8 kN	125
Figure 5-3 : Nombre de cycles des essais à 6,4 kN (recettes triées selon $t_{0,5}$ décroissant)	126
Figure 5-4 : Nombre de cycles de la recette A1	127
Figure 5-5 : Nombre de cycles de la recette A2	128
Figure 5-6 : Nombre de cycles de la recette A3	128
Figure 5-7 : Nombre de cycles de la recette A4	129
Figure 5-8 : Nombre de cycles de la recette B1	129
Figure 5-9 : Nombre de cycles de la recette B2	130
Figure 5-10 : Nombre de cycles de la recette C1	130
Figure 5-11 : Nombre de cycles de la recette D1	131
Figure 5-12 : Nombre de cycles de la recette D2	131

Figure 5-13 : Estimés de la valeur de $t_{0,5}$ de toutes les recettes	132
Figure 5-14 : Nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$ à une charge de 5,8 kN en fonction de la profondeur durcie de la tangente à 30° (barres d'erreurs = ic_{inf} et ic_{sup} à $nc_{0,9}$)	145
Figure 5-15 : Plage de valeurs pour la cémentation et l'induction thermique	147
Figure VI-1 : Nombre de cycles des essais à 5,4 kN.....	202
Figure VI-2 : Nombre de cycles des essais à 6,4 kN.....	203

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Facteurs d'influence en fonction des étapes du traitement d'induction thermique	14
Tableau 2-2 : Zones durcies selon la fréquence (effet de peau)	15
Tableau 2-3 : Quantité de dissipation de chaleur vers le cœur	17
Tableau 2-4 : Avantages et inconvénients d'une dureté élevée en surface pour un acier	21
Tableau 3-1 : Composition chimique de l'acier AISI 4340 (Oberg et al., 2000)	24
Tableau 3-2 : Propriétés de l'acier AISI 4340 (Oberg et al., 2000)	24
Tableau 3-3 : Données nominales d'usinage des roues dentées	25
Tableau 3-4 : Liste des facteurs d'influence variés et non variés	29
Tableau 3-5 : Angle ζ_F selon la norme ISO, la norme AGMA et les éléments finis pour une charge appliquée au point le plus haut de contact unique sur des roues dentées de 15 à 105 dents	39
Tableau 4-1 : Paramètres des recettes de classe A	64
Tableau 4-2 : Paramètres des recettes de classe B	65
Tableau 4-3 : Paramètres des recettes de classe C	65
Tableau 4-4 : Paramètres des recettes de classe D	65
Tableau 4-5 : Énergie totale fournie en moyenne fréquence et en haute fréquence	71
Tableau 4-6 : Récapitulatif des essais complétés à 5,4 kN	75
Tableau 4-7 : Récapitulatif des essais complétés à 5,8 kN	75
Tableau 4-8 : Récapitulatif des essais complétés à 6,4 kN	75
Tableau 4-9 : Longueur de la fissure à chaque rupture de fil	81
Tableau 4-10 : Moyennes des mesures aux 25 cycles des roues dentées A1-1, A1-2, A2-1, A2-2	83
Tableau 4-11 : Moyennes des mesures aux 25 cycles des roues dentées A3-1, A4-1, B1-1 et B2-1	84
Tableau 4-12 : Moyennes des mesures aux 25 cycles des roues dentées C1-1, D1-1 et D2-1	85
Tableau 4-13 : Données de fin des essais sur les roues dentées A1-1, A1-2, A2-1, A2-2	87

Tableau 4-14 : Données de fin des essais sur les roues dentées A3-1, A4-1, B1-1 et B2-1	88
Tableau 4-15: Données de fin des essais sur les roues dentées C1-1, D1-1 et D2-1	89
Tableau 4-16 : Roues dentées A1-1, A2-1, A2-2, A3-1 et A4-1 attaquées au Nital.....	91
Tableau 4-17 : Roues dentées B1-1, B2-1, C1-1, D1-1 et D2-1 attaquées au Nital.....	92
Tableau 4-18 : Profondeur durcie.....	104
Tableau 4-19 : Profondeur durcie de la tangente à 30 °	105
Tableau 5-1 : Estimations du modèle non contraint à 5,4 kN	115
Tableau 5-2 : Estimations du modèle non contraint à 5,8 kN	115
Tableau 5-3 : Estimations du modèle non contraint à 6,4 kN	115
Tableau 5-4 : Estimations du modèle contraint selon β	116
Tableau 5-5 : Test du rapport des vraisemblances	116
Tableau 5-6 : Estimations du modèle non contraint.....	118
Tableau 5-7 : Estimations du modèle contraint selon β	118
Tableau 5-8 : Test du rapport des vraisemblances	119
Tableau 5-9 : Estimations du modèle non contraint.....	120
Tableau 5-10 : Estimations du modèle contraint selon le coefficient de force	121
Tableau 5-11 : Test du rapport des vraisemblances	122
Tableau 5-12 : Nombre de cycles et intervalles de confiance selon le modèle retenu à 5,4 kN.....	123
Tableau 5-13 : Nombre de cycles et intervalles de confiance selon le modèle retenu à 5,8 kN.....	124
Tableau 5-14 : Nombre de cycles et intervalles de confiance selon le modèle retenu à 6,4 kN.....	124
Tableau 5-15 : Différences statistiquement significatives ou non (vraisemblance).....	134
Tableau 5-16 : Classement des recettes selon A1	135
Tableau 5-17 : Classement des recettes selon A3	135
Tableau 5-18 : Classement des recettes selon A2	135
Tableau 5-19 : Classement des recettes selon A4	135
Tableau 5-20 : Classement des recettes selon C1	135

Tableau 5-21 : Classement des recettes selon B1	136
Tableau 5-22 : Classement des recettes selon D2	136
Tableau 5-23 : Classement des recettes selon D1	136
Tableau 5-24 : Classement des recettes selon B2	136
Tableau 5-25 : Classement des recettes	136
Tableau 5-26 : Différences statistiquement significatives ou non (Tukey)	137
Tableau 5-27 : Classement des recettes selon A1	137
Tableau 5-28 : Classement des recettes selon A3	138
Tableau 5-29 : Classement des recettes selon A2	138
Tableau 5-30 : Classement des recettes selon A4	138
Tableau 5-31 : Classement des recettes selon C1	138
Tableau 5-32 : Classement des recettes selon B1	138
Tableau 5-33 : Classement des recettes selon D2	139
Tableau 5-34 : Classement des recettes selon D1	139
Tableau 5-35 : Classement des recettes selon B2	139
Tableau 5-36 : Classement des recettes	139
Tableau 5-37 : Différences statistiquement significatives ou non	140
Tableau 5-38 : Nombre d'essais requis en moyenne	142
Tableau 5-39 : Nombre d'essais supplémentaires requis	142
Tableau 5-40 : Recettes similaires à l'exception de la puissance moyenne	148
Tableau 5-41 : Changement des paramètres comparativement à la recette A1	149
Tableau I-1 : Données pour le calcul du diamètre du cercle au point le plus haut de contact unique	160
Tableau I-2 : Données pour le calcul du rapport de conduite apparent	162
Tableau I-3 : Données pour le calcul des angles de roulement des diamètres de forme de pied au point primitif limité par les diamètres de tête de la roue et du pignon (début du profil actif)	163
Tableau I-4 : Données pour le calcul des angles de roulement du point primitif au diamètre de tête	164

Tableau I-5 : Données pour le calcul du pas angulaire du pignon et de la roue.....	164
Tableau I-6 : Données pour le calcul du diamètre au début de la développante.....	165
Tableau II-1 : Informations sur des essais en flexion simple dans la littérature	168
Tableau II-2 : Informations sur des essais en flexion simple dans la littérature (suite).....	169
Tableau IV-1 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée A1-1	180
Tableau IV-2 : Dureté des mesures sur la roue dentée A1-1	180
Tableau IV-3 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée A2-1	181
Tableau IV-4 : Dureté des mesures sur la roue dentée A2-1	181
Tableau IV-5 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée A2-2.....	182
Tableau IV-6 : Dureté des mesures sur la roue dentée A2-2	182
Tableau IV-7 : Caractéristiques des mesures sur la tête de la roue dentée A3-1	183
Tableau IV-8 : Dureté des mesures sur la tête de la roue dentée A3-1	183
Tableau IV-9 : Dureté des mesures sur la tête de la roue dentée A3-1 (suite).....	184
Tableau IV-10 : Caractéristiques des mesures sur le creux de la roue dentée A3-1	184
Tableau IV-11 : Dureté des mesures sur le creux de la roue dentée A3-1	185
Tableau IV-12 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée A4-1.....	186
Tableau IV-13 : Dureté des mesures sur la roue dentée A4-1	186
Tableau IV-14 : Dureté des mesures sur la roue dentée A4-1 (suite)	187
Tableau IV-15 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée B1-1	188
Tableau IV-16 : Dureté des mesures sur la roue dentée B1-1.....	188
Tableau IV-17 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée B2-1	189
Tableau IV-18 : Dureté des mesures sur la roue dentée B2-1.....	189
Tableau IV-19 : Dureté des mesures sur la roue dentée B2-1 (suite)	190
Tableau IV-20 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée C1-1	191
Tableau IV-21 : Dureté des mesures sur la roue dentée C1-1.....	191
Tableau IV-22 : Dureté des mesures sur la roue dentée C1-1 (suite)	192
Tableau IV-23 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée D1-1.....	193
Tableau IV-24 : Dureté des mesures sur la roue dentée D1-1	193
Tableau IV-25 : Dureté des mesures sur la roue dentée D1-1 (suite)	194

Tableau IV-26 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée D2-1	195
Tableau IV-27 : Dureté des mesures sur la roue dentée D2-1	195
Tableau IV-28 : Dureté des mesures sur la roue dentée D2-1 (suite).....	196
Tableau V-1 : Nombre de cycles et longueur de la fissure au moment de la détection par un capteur.....	198

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 3-1 : Dureté Vickers	36
Équation 3-2 : Limite de déformation maximale.....	53
Équation 3-3 : Ratio de chargement (R)	58
Équation 5-1 : Facteur d'échelle de la distribution de Weibull	117
Équation 5-2 : Nombre de cycles prédit au 50 ^e percentile de la distribution de Weibull	123
Équation I-1 : Rayon du cercle au point le plus haut de contact unique.....	160
Équation I-2 : Rapport de conduite équivalent	161
Équation I-3 : Angle d'hélice de base	161
Équation I-4 : Rapport de conduite apparent	161
Équation I-5 : Angles de roulement des diamètres de forme de pied au point primitif limité par les diamètres de base	162
Équation I-6 : Angles de roulement des diamètres de forme de pied au point primitif limité par les diamètres de forme de pied	162
Équation I-7 : Angles de roulement des diamètres de forme de pied au point primitif limité par les diamètres de tête de la roue et du pignon (début du profil actif)	163
Équation I-8 : Angles de roulement du point primitif au diamètre de tête	163
Équation I-9 : Pas angulaire du pignon et de la roue	164
Équation I-10 : Diamètre au début de la développante.....	165
Équation III-1 : Fonction de répartition de la distribution de Weibull	172
Équation III-2 : Percentile de la distribution de Weibull.....	172
Équation III-3 : 63,2 ^e percentile de la distribution de Weibull	172
Équation III-4 : Facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w dans une équation du premier degré	173
Équation III-5 : Fonction log-vraisemblance de Weibull	174
Équation III-6 : Degrés de liberté de la distribution χ^2	174
Équation III-7 : Statistique du test du rapport des vraisemblances.....	175
Équation III-8 : Seuil de signification.....	175

Équation III-9 : Test de Tukey pour même nombre d'échantillons dans les deux traitements comparés.....	176
Équation III-10 : Test de Tukey pour différent nombre d'échantillons dans les deux traitements comparés.....	176

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

µm :	Micromètre
χ^2 :	Distribution khi carré
AMS :	Aerospace Material Specification
Bhn :	Échelle de dureté Brinell
C :	Carbone
Cr :	Chrome
CRIAQ :	Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec
ÉTS :	École de technologie supérieure
HF :	Haute fréquence
HV :	Échelle de dureté Vickers
ICIA :	Institut de Conception et d'Innovation en Aérospatiale
MF :	Moyenne fréquence
mm :	Millimètre
max :	Maximum
min :	Minimum
Mn :	Manganèse
Mo :	Molybdène
MPa :	Mégapascal
Ni :	Nickel
P :	Phosphore
PWC :	Pratt & Whitney Canada
R :	Logiciel de calcul statistique (www.r-project.org)
s :	Seconde
S :	Soufre
Si :	Silicium

xxx

UQAR : Université du Québec à Rimouski

SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

α_W :	Facteur d'échelle de la distribution de Weibull (voir note)
α_S :	Seuil de signification statistique (voir note)
β :	Facteur de forme de la distribution de Weibull
ζ_F :	Angle entre une ligne de référence tangente au profil et une ligne passant par le centre de la tête d'une dent et de l'axe d'une roue dentée
cF :	Coefficient de force maximale appliquée sur la dent
cR :	Coefficient de recette
F_{\max} :	Force maximale appliquée sur la dent [kN]
ic_{\inf} :	Intervalle de confiance inférieur
ic_{\sup} :	Intervalle de confiance supérieur
lv :	Log-vraisemblance
n :	Nombre de données utilisées pour estimer les paramètres du modèle
$nc_{0,9}$	Niveau de confiance de 90%
R :	Ratio de chargement
T :	Statistique du test du maximum de vraisemblance
$t_{0,5}$:	Nombre de cycles prédit au 50e percentile

Note : Dans la littérature, α est le symbole utilisé pour représenter le facteur d'échelle de la distribution de Weibull et le seuil de signification statistique. Des indices sont ajoutés aux symboles pour ne pas les confondre entre eux.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

1.1 État de la situation

Le virage vert influe sur un nombre grandissant de secteurs d'activité. L'industrie aéronautique n'y fait pas exception. Le remplacement des procédés énergivores et polluants par des procédés équivalents écoénergétiques et moins polluants offre de nombreux avantages (amélioration de l'image des entreprises auprès du public, diminution des impacts sur l'environnement, diminution des risques de contact accidentel avec des produits toxiques pour les employés, diminution des coûts énergétiques, etc.). Cette révolution touche le traitement thermique des roues dentées utilisées pour former des engrenages.

Selon la définition de la norme ISO 112-1-1998, une roue dentée est un « organe denté destiné à en mouvoir un autre, ou à être mû par l'action des dents venant successivement en contact ». Selon la même norme, un engrenage est un « mécanisme élémentaire constitué de deux roues dentées, mobiles autour d'axes de position relative invariable, et dont l'une entraîne l'autre par l'action des dents venant successivement en contact ».

On se sert de roues dentées et d'engrenages pour de multiples usages dans divers secteurs industriels. L'industrie aéronautique utilise des roues dentées dans ses moteurs. Le judicieux choix du procédé de fabrication de cette pièce élémentaire et son optimisation permettent de répondre au défi de produire des moteurs plus légers et plus économes en carburant. Afin de répondre à ce défi de taille, les roues dentées produites doivent avoir une longue durée de vie, un faible poids et la capacité de supporter de grandes charges.

Les deux modes principaux de défaillance en fatigue des engrenages sont la défaillance par flexion et par pression de contact (piqûre). Les normes AGMA 2001-B88 et ISO 6336 présentent toutes les deux des méthodes de calcul de la capacité de charge d'engrenages droits et hélicoïdaux. La partie cinq de la norme ISO 6336 traite des matériaux et des traitements thermiques. La norme AGMA 2004-C08 traite elle aussi des matériaux et de leurs traitements thermiques. La capacité de charge dépend de nombreux facteurs nommés facteurs d'influence. Les méthodes de calcul des normes mentionnées proposent des formules contenant les principaux facteurs d'influence relatifs à la défaillance en flexion et par pression de contact. Le choix du matériau et du traitement thermique sont deux facteurs d'influence.

Selon une étude de défaillance de plus de 1500 engrenages, 32 % de toutes les défaillances se produisaient en fatigue par flexion (Alban, 1988; Woods, Daniewicz et Nellums, 1999). Cela montre que la défaillance en flexion est un mode de défaillance non négligeable. C'est dans ce contexte que l'utilisation de traitements qui améliorent la capacité des engrenages à résister à la flexion en pied de dent prend tout son sens. On peut les cataloguer en trois groupes qui sont les traitements thermiques chimiques, thermiques non chimiques et non thermiques : la cémentation, la nitruration, la nitrocarburation, la carbonitruration sont des traitements thermiques chimiques; l'induction thermique, le durcissement par trempe au laser et le durcissement superficiel à la flamme sont des traitements thermiques non chimiques; le grenaillage est un traitement non thermique. Certains de ces traitements peuvent être combinés. Par exemple, l'effet du grenaillage sur des roues dentées traitées par cémentation a été étudié par certains chercheurs (Benedetti et al., 2002; Garibay et Chang, 1987; Zurn et Razim, 1989).

1.1.1 Cémentation

La cémentation est un traitement thermique fréquemment utilisé par l'industrie de fabrication de roues dentées à grande échelle. Ce procédé a pour avantages de grandement

augmenter la résistance aux défaillances par flexion et par pression de contact (piqûre) (Asi et al., 2007). On peut faire la distinction entre plusieurs méthodes de cémentation (cémentation à la poudre, cémentation liquide, cémentation gazeuse, cémentation sous pression réduite, cémentation par bombardement ionique).

La cémentation gazeuse est encore largement utilisée par l'industrie aéronautique. Ce procédé est privilégié pour deux raisons majeures. Il existe depuis longtemps, ce qui fait qu'il est bien maîtrisé, et la capacité de charge qu'il permet d'atteindre est élevée, ce qui fait qu'il est un bon choix lorsqu'une grande capacité de charge à faible poids est requise.

Le procédé de cémentation gazeuse consiste à diffuser du carbone à partir d'un gaz dans la structure austénitique d'un acier chauffé à haute température pour ensuite le tremper. Le traitement est long, car il requiert d'attendre que le carbone diffuse dans la pièce. Il résulte de ce traitement une couche dure en surface qui améliore les propriétés de résistance à la piquûre et à la flexion de l'acier. La vitesse de refroidissement et le contenu en carbone de l'acier ont tous deux un effet sur la dureté et sur l'épaisseur de la couche durcie. Il est connu qu'un traitement de cémentation appliqué à une roue a toujours pour effet de causer des distorsions dans cette pièce (Murzin et Ponomarev, 1975).

Puisque le carbone diffuse à travers toutes les surfaces de la pièce traitée, il faut masquer les zones qui ne doivent pas être traitées. Un traitement typiquement utilisé à cette fin est le placage au cuivre à base d'arsenic. Ce placage doit être enlevé après avoir traité la pièce, ce qui requiert d'utiliser des produits chimiques polluants. Certaines entreprises, telles que Fairfield, ont remplacé avec succès le procédé de placage polluant par un procédé de placage moins polluant (Fairfield mfg. co. inc., 2004).

Le taux de diffusion du carbone dans la pièce dépend de la teneur en carbone de l'acier. Il est nécessaire que la teneur en carbone de l'acier soit faible, soit moins de 0,3 %, afin que la diffusion ait lieu rapidement et profondément. L'acier AMS 6265 remplit cette

condition. C'est un matériau qui est utilisé pour fabriquer des engrenages traités par cémentation.

En appliquant un placage sur les faces avant et arrière d'une roue à denture extérieure, le carbone pénètre la pièce uniquement par la surface de contour de la pièce. La profondeur de diffusion du carbone est quasi constante. En d'autres mots, la profondeur durcie est approximativement la même partout sous la surface de contour de la pièce. La profondeur durcie est la même sous la tête d'une dent que sous le creux d'une dent. La profondeur est également la même sur toute la largeur de la dent à un diamètre donné. Cela est décrit comme étant un durcissement de contour avec un profil durci uniforme.

1.1.2 Induction thermique

L'induction thermique est une alternative envisagée pour remplacer la cémentation gazeuse. En plus de fournir une capacité de charge élevée et d'être moins polluante et énergivore que la cémentation gazeuse, elle a l'avantage d'être beaucoup plus rapide à utiliser. Typiquement, la phase de chauffage de l'induction thermique dure tout au plus quelques secondes. Puisque seule une mince couche en surface est chauffée, les distorsions causées par le traitement sont moindres que celles causées par le traitement de cémentation et les dépenses énergétiques sont plus faibles. De plus, comparativement à la cémentation, l'induction thermique nécessite l'usage d'aucun gaz et d'aucun placage, ce qui contribue à en faire un procédé plus vert. Les connaissances entourant l'induction thermique sont en cours de devenir plus matures. L'industrie aéronautique se tourne actuellement vers l'induction thermique et supporte des projets de recherche dans le domaine. Des entreprises comme PWC montrent de l'intérêt pour ce procédé.

L'induction thermique, contrairement à la cémentation, n'apporte pas d'ajout de carbone à la pièce traitée pendant le traitement. Il faut donc que la pièce contienne préalablement une teneur suffisante en carbone pour obtenir une grande dureté après

traitement (Dossett, 2007). Selon Rudnev (Rudnev et al., 2003b), des teneurs en carbone de 0,4 % à 0,55 % sont fréquemment utilisées pour traiter des engrenages.

Contrairement à la cémentation, l'uniformité du profil durci n'est pas garantie, car elle varie en fonction de plusieurs facteurs. L'induction thermique est présentée plus en détail au chapitre 2.

C'est dans ce contexte que le projet « Induction hardening of bevel gears for aerospace applications » du CRIAQ se positionne.

1.2 Problématique

L'objectif global du projet du CRIAQ est de développer des outils de simulation et d'optimisation pour faciliter le développement de produits et permettre l'application de l'induction thermique à des géométries complexes incluant les roues dentées hélicoïdales et coniques.

Un outil de modélisation idéal permet d'optimiser la conception et la fabrication d'une pièce en fonction des conditions d'utilisations et de la durée de vie souhaitée de cette pièce. Cette nouvelle façon de regarder la conception d'une pièce en intégrant les avantages du procédé de fabrication fait partie d'une nouvelle philosophie de conception que l'on nomme « virtual manufacturing » (Souza, Sacco et Porto, 2006). Les outils qui existent à ce jour ne donnent pas des résultats suffisamment précis pour optimiser le procédé d'induction thermique appliqué aux engrenages. De plus, ces outils ont généralement été développés pour des géométries simples et pour des gammes d'aciers utilisées dans l'industrie automobile.

La première étape du projet du CRIAQ est de développer et valider un modèle pour des géométries simples de roues dentées tel que les roues droites cylindriques pour ensuite

transférer les connaissances acquises sur des géométries plus complexes telles que des roues hélicoïdales et coniques. L'atteinte de l'objectif global va se faire en combinant le travail de plusieurs chercheurs. Chaque chercheur a un ou plusieurs objectifs à atteindre afin de répondre à des interrogations ou questions sur le sujet.

C'est dans ce cadre que se situe le présent projet qui consiste à réaliser une campagne d'essais sur des roues dentées traitées par induction thermique, à obtenir des données pratiques et à faire l'analyse de ces données.

Un traitement d'induction thermique est appliqué à une roue dentée par l'utilisation d'une machine-outil contrôlée par un programme. La combinaison des paramètres utilisés pour le traitement d'induction thermique d'une roue dentée constitue une recette. Plusieurs paramètres peuvent être variés dans une recette. Les cinq paramètres fondamentaux sont la fréquence, la puissance, la durée, la géométrie de l'inducteur et les conditions de trempe (Rudnev et al., 2003a).

La résistance en flexion de roues dentées dépend du matériau, du traitement thermique et de la rugosité de surface des pieds (Iso 6336-5:2003, 2003). Un traitement d'induction thermique a pour effet de générer des contraintes résiduelles et de durcir l'acier traité. Le profil des contraintes résiduelles et le profil de dureté dépendent donc tous deux de la recette du traitement d'induction thermique. Il est possible de couper une roue dentée et de réaliser des mesures sur la surface de coupe le long d'une ligne débutant près de la surface de la dent et finissant en profondeur dans la dent. Les contraintes résiduelles et la dureté varient en fonction de la profondeur le long de la ligne, ce que l'on nomme respectivement le profil des contraintes résiduelles et le profil de dureté. On obtient divers profils de dureté en employant diverses recettes. Plusieurs recettes différentes peuvent mener à l'obtention d'approximativement la même profondeur durcie dans une région donnée de la roue dentée.

Les normes actuellement en vigueur pour le calcul de la capacité de charge de roues droites cylindriques mentionnent les contraintes résiduelles et expliquent leurs effets. Cependant, la mesure des contraintes résiduelles n'est pas exigée par ces normes. Le facteur principal dont la mesure est exigée est la profondeur durcie.

L'utilisation d'un traitement thermique de cémentation sur une roue dentée externe cause un durcissement de profondeur quasi égale sur tout le contour externe de la roue. C'est un durcissement de contour. La cémentation ne permet pas de contrôler séparément la profondeur durcie en différents points du profil. La cémentation augmente grandement la résistance à la flexion en pied de dent. Pour la cémentation, il est alors conclu qu'une profondeur durcie quasi égale en tout point du profil permet de grandement améliorer la résistance à la flexion. À cause de cette conclusion et parce qu'aucune preuve du contraire n'est disponible, il est supposé qu'une profondeur durcie, obtenue par cémentation, quasi égale en tout point du profil est optimale pour augmenter la résistance à la flexion en pied de dent.

1.3 Objectifs de la recherche

L'objectif principal du projet est d'étudier expérimentalement la résistance à la flexion en pied de dent de roues cylindriques à denture droite ayant subi un durcissement de contour par induction thermique.

Le choix des paramètres de chauffe du traitement d'induction thermique permet de contrôler séparément la profondeur sous les flancs et sous le creux de dent. Il est possible de développer des recettes de durcissement de contour et des recettes de durcissement à cœur. Puisque ces classes de recettes, ainsi que des classes intermédiaires, peuvent être obtenues par induction thermique, l'hypothèse qu'un durcissement de contour améliore plus la résistance à la flexion en pied de dent qu'un durcissement à cœur peut être vérifiée et fait partie des objectifs.

L'hypothèse est émise que plusieurs recettes peuvent mener au même profil de dureté tout en générant des profils des contraintes résiduelles différents. Dans ce cas, il est supposé que plusieurs recettes ayant le même profil de dureté peuvent avoir des résistances à la flexion en pied de dent différentes.

1.4 Méthodologie

Afin de satisfaire l'objectif principal, on procède à une campagne d'essais en fatigue en flexion simple à quelques niveaux de charge sur des roues dentées traitées par induction thermique selon différentes recettes. La première étape est d'usiner toutes les roues dentées qui seront utilisées dans le même matériau et selon la même mise en plan. Ces roues dentées sont par la suite traitées par induction thermique selon des recettes de durcissement de contour et des recettes de durcissement à cœur. Un banc d'essai conçu pour appliquer une charge cyclique sur une dent à la fois est utilisé pour réaliser les essais de flexion simple. Un nombre de cycles est obtenu pour chaque essai. Le nombre de cycles, les niveaux de charge et les recettes sont les données utilisées pour développer un modèle statistique de la durée de vie en fonction des niveaux de charge et des recettes. Ce modèle statistique est employé pour comparer les recettes les unes par rapport aux autres. Pour chaque recette, plus d'un essai est réalisé à chacun des niveaux de charge. Les niveaux de charge sont choisis de façon à obtenir des défaillances en flexion simple entre dix mille et dix millions de cycles. Le nombre de cycles minimum est fixé à dix mille cycles, car il n'est pas souhaité que la contrainte maximale dépasse la limite élastique du matériau (Iso 6336-3:2006, 2008). Le nombre de cycles maximal est fixé à dix millions de cycles afin de limiter la durée des essais. Dix millions de cycles est un nombre maximal de cycles que l'on retrouve typiquement dans la littérature (voir annexe II). Des résultats antécédents à ceux de l'actuelle campagne d'essais ont été utilisés pour estimer les charges de la campagne d'essais de façon à respecter le nombre de cycles minimal et le nombre de cycles maximal souhaités. Un essai est arrêté lorsqu'une fissure est détectée par l'instrumentation du banc d'essai. Lorsqu'une charge est appliquée sur une dent d'une roue dentée non

fissurée en pied de dent, une déflexion de la dent par rapport au corps de la roue dentée est observée. La présence d'une fissure en pied de dent cause un accroissement de la déflexion. La déflexion maximale est notée en début d'essai et surveillée tout au cours de l'essai. Une fissure est détectée quand la déflexion maximale au cours d'un essai augmente d'une certaine quantité par rapport au début de l'essai. À la fin des essais, les longueurs des fissures sont mesurées en utilisant l'inspection par particules magnétiques.

L'hypothèse qu'un durcissement de contour améliore plus la résistance à la flexion en pied de dent qu'un durcissement à cœur est vérifiée en comparant les recettes entre elles à l'aide du modèle statistique développé.

L'hypothèse que plusieurs recettes peuvent mener au même profil de dureté tout en générant des profils des contraintes résiduelles différents est explorée dans le présent projet par le développement de plusieurs recettes ayant des profils de dureté en pied de dent similaires. Aucune mesure des contraintes résiduelles n'est cependant réalisée. La durée de vie d'une roue dentée en flexion en pied de dent est influencée par ses profils des contraintes résiduelles et ses profils de dureté. Dans le cas où des différences seraient mesurées entre les résistances à la flexion en pied de dent des diverses recettes étudiées ayant des profils de dureté similaires, l'hypothèse que cette différence est au moins en partie explicable par des niveaux de contraintes résiduelles différents sera évoquée et retenue. Des mesures des profils de dureté sont réalisées pour chaque recette et une brève analyse de l'influence de la profondeur durcie sur la résistance en fatigue est présentée.

1.5 Plan du mémoire

Le chapitre 2 introduit le procédé d'induction thermique (théorie de fonctionnement, application aux roues dentées et impact du traitement sur les modes de défaillance des engrenages). Le chapitre 3 porte sur les installations et le protocole expérimental. Le chapitre 4 présente toutes les données mesurées. Dans le chapitre 5, les données du chapitre

4 sont analysées. Le chapitre 6 fait un retour sur la problématique, sur les objectifs, sur la méthodologie, sur le travail réalisé, sur les résultats obtenus et sur l'atteinte des objectifs puis termine par un exposé des suites à donner au projet.

CHAPITRE 2

APPLICATION DU PROCÉDÉ D'INDUCTION THERMIQUE AUX ENGRENAGES

2.1 Introduction

La trempe est un procédé auquel on a recours pour augmenter la dureté d'un acier. Cette augmentation de dureté est causée par une modification de la structure cristalline de l'acier, due à la présence du carbone. L'augmentation de dureté par l'usage de la trempe requiert d'utiliser un acier ayant une teneur moyenne en carbone, soit 0,3 % à 0,6 %, et ayant une bonne trempabilité. Les aciers faiblement alliés combinent ces caractéristiques. La trempe d'un acier se réalise en deux étapes. La première étape consiste à austénitiser la structure cristalline de l'acier. Typiquement, l'acier 4340 est austénétisé à une température de 802 °C à 829 °C (Oberg et al., 2000). La deuxième étape consiste à refroidir l'acier jusqu'à la température ambiante à un taux suffisamment élevé pour transformer sa structure cristalline principalement en martensite. La température finale de transformation en martensite des aciers ordinaires au carbone se situe sous la température ambiante (Rudnev et al., 2003a). Ainsi, suite au refroidissement jusqu'à la température ambiante, la transformation en martensite est incomplète et de l'austénite résiduelle est présente.

Le procédé d'induction thermique permet la chauffe rapide de pièces conductrices d'électricité. On l'utilise lors de la phase de chauffe d'une trempe. La phase de chauffe par induction thermique se déroule de la façon suivante.

- Une pièce à traiter est placée au centre de l'enroulement d'un inducteur.
- Un courant alternatif circule dans l'inducteur.
- Le courant génère un champ électromagnétique alternatif autour de l'inducteur.

- Le champ électromagnétique pénètre la pièce et des courants de Foucault sont générés dans la pièce.

De la chaleur est générée par effet Joule et par perte par hystérésis. La profondeur de pénétration des courants dépend de la conductivité électrique du matériau, de la perméabilité relative du matériau et de la fréquence.

La circulation de courants dans un matériau ayant une résistance électrique non nulle produit de la chaleur. C'est ce phénomène qui est appelé effet Joule. Parce que la direction du courant dans l'inducteur s'inverse à chaque cycle, les pôles du champ magnétique s'inversent à chaque cycle. Lorsqu'un matériau ferromagnétique est à proximité d'un champ magnétique, le matériau se magnétise dans le sens du champ auquel il est exposé. Le changement d'orientation du champ magnétique de la pièce génère de la chaleur. C'est ce phénomène qui est appelé perte par hystérésis.

Une fois la température d'austénitisation atteinte pour tout le volume de matériau à durcir, la pièce est refroidie rapidement par une douche de liquide de refroidissement. Un taux de refroidissement trop élevé augmente les risques de développement de fissures dans les pièces traitées. Le taux de refroidissement est contrôlé par le choix du liquide de refroidissement.

Soumettre un matériau à un revenu consiste à chauffer le matériau à une certaine température, maintenir la pièce à cette température pour un certain temps et refroidir à un certain taux de refroidissement. Revenir une pièce sert à diminuer les risques de développement de fissures, à relâcher les contraintes résiduelles, à augmenter la ténacité et la ductilité de l'acier, à éliminer la fragilité et dans certains cas à améliorer la stabilité géométrique (Davis, 2005; Rudnev et al., 2003a). Un revenu peut être réalisé au four ou par induction thermique. Pour obtenir le même effet selon ces deux méthodes, des températures et des durées différentes sont utilisées. Le revenu par induction thermique est de moins

longue durée, mais à plus haute température qu'un revenu au four (Rudnev et al., 2003a). Selon la norme ISO 6336 (Iso 6336-5:2003, 2003), il est nécessaire de revenir au four toute roue dentée ayant été durci superficiellement.

2.2 Application aux roues dentées cylindriques

La section 2.2.1 donne une courte liste de définitions de termes employés. La section 2.2.2 introduit les facteurs d'influence. La section 2.2.3 présente l'influence de la fréquence sur la profondeur et la localisation de la chauffe. La section 2.2.4 traite de l'influence du temps, de la fréquence et de la puissance sur la forme de la zone durcie. L'influence du temps de chauffe sur la dissipation de chaleur vers le cœur est discutée dans la section 2.2.5. La section 2.2.6 fournit des informations sur la préchauffe. Pour terminer, la section 2.2.7 explique ce qu'est l'effet de bord.

2.2.1 Définitions

Pour faciliter la représentation des résultats, voici quelques définitions. Une des deux surfaces perpendiculaires à l'axe de la roue est la face avant. La surface parallèle à la face avant située de l'autre côté du plan de symétrie est la face arrière (figure 2-1).

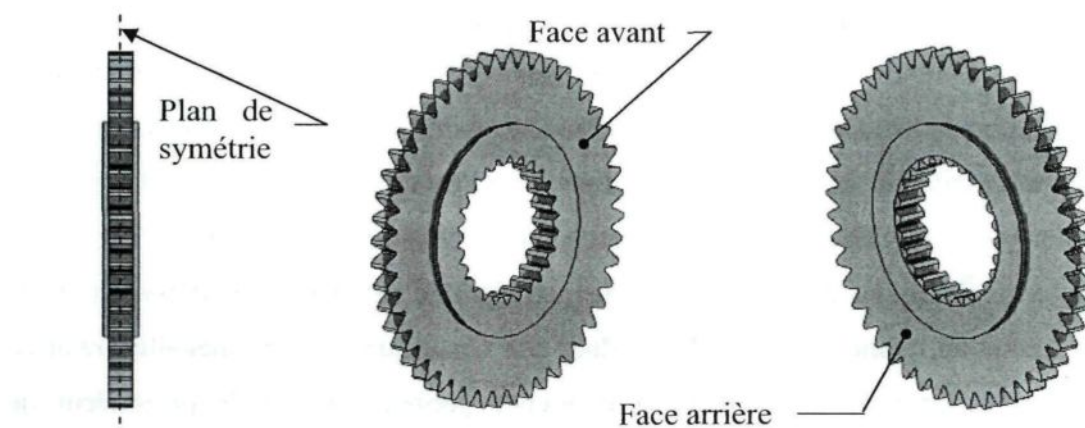


Figure 2-1 : Faces avant et arrière d'une roue dentée

2.2.2 Facteurs d'influence

Plusieurs facteurs influencent les profils de dureté et les profils des contraintes résiduelles obtenus à la suite d'un traitement d'induction thermique. Ces facteurs sont appelés facteurs d'influence. Le tableau 2-1 présente les facteurs d'influence lors des différentes étapes du traitement d'induction thermique.

Tableau 2-1 : Facteurs d'influence en fonction des étapes du traitement d'induction thermique

Étape du traitement	Facteurs d'influence
Chauffe par induction thermique	<ul style="list-style-type: none"> • Temps • Fréquence • Puissance • Géométrie de l'inducteur
Refroidissement par douche de solution de trempe à base de polymères après la chauffe par induction thermique	<ul style="list-style-type: none"> • Géométrie de l'appareillage de douche • Débit du liquide de refroidissement • Pourcentage de concentration de la solution polymérique
Revenu réalisé après la trempe	<ul style="list-style-type: none"> • Température • Temps

2.2.3 Influence de la fréquence

La fréquence du courant circulant dans l'inducteur influe sur la profondeur de pénétration des courants dans la pièce traitée. Pour cette raison, la fréquence employée a une influence sur la localisation de la zone chauffée. À fréquence élevée, les courants ont tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. C'est ce qu'on appelle l'effet de peau en électromagnétisme (Sadiku, 2001). La profondeur de pénétration des courants dépend de la conductivité électrique du matériau, de la perméabilité relative du matériau et de la fréquence. Pour un même matériau, la conductivité électrique et la perméabilité relative sont constantes. Ainsi, le contrôle de la fréquence permet d'ajuster la profondeur de pénétration. En accord avec l'effet de peau, lors de la chauffe par induction thermique

d'une roue droite cylindrique, les hautes fréquences causent une augmentation de la température principalement localisée aux têtes et flancs des dents tandis que les moyennes fréquences causent une augmentation de la température principalement localisée aux creux des dents (Barka et al., 2007). Cet effet de la fréquence sur la localisation de la zone chauffée est résumé au tableau 2-2. En utilisant une combinaison de moyenne et de haute fréquences, on contrôle la profondeur de matière chauffée au niveau des têtes, des flancs et des creux des dents. Il est possible d'utiliser la moyenne fréquence et la haute fréquence dans la même recette. Si ces deux fréquences sont appliquées l'une après l'autre, on dit qu'il s'agit d'une recette en séquentiel. Si les deux fréquences sont appliquées en même temps, on dit qu'il s'agit d'une recette en simultané.

Tableau 2-2 : Zones durcies selon la fréquence (effet de peau)

Facteurs	Zones de la roue dentée qui subissent une augmentation de température
Moyenne fréquence	Creux et fonds de dents
Haute fréquence	Têtes et flancs de dents

2.2.4 Durcissement superficiel et de contour

Le temps, la fréquence et la puissance sont des facteurs d'influence de la chauffe par induction thermique. Ces facteurs influent sur la forme de la zone durcie. Deux formes de zones durcies sont définies dans la norme ISO 6336 (Iso 6336-5:2003, 2003), soit le durcissement à cœur (voir figure 2-2) et le durcissement superficiel (voir figure 2-3). Le durcissement superficiel est appelé durcissement de contour dans d'autres références. Un durcissement de contour peut également décrire toute recette traitée par induction thermique, peu importe la profondeur durcie, car c'est le contour de la roue qui est durci. Durcissement de contour a donc deux significations. La signification à employer est comprise selon le contexte.

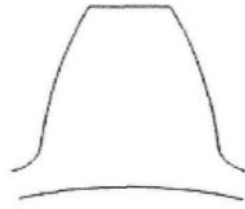


Figure 2-2 : Exemple de durcissement à cœur

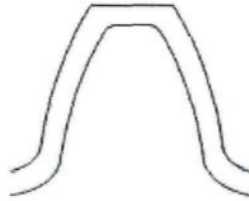


Figure 2-3 : Exemple de durcissement superficiel ou de contour

Il est également possible d'obtenir des profils de durcissement intermédiaires (figure 2-4 et figure 2-5).

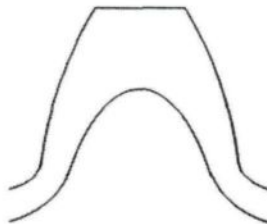


Figure 2-4 : Premier exemple de durcissement intermédiaire

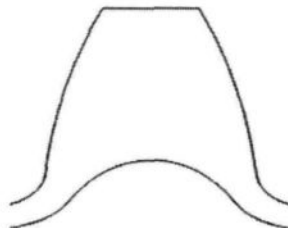


Figure 2-5 : Deuxième exemple de durcissement intermédiaire

Rappelons que l'atteinte des objectifs énoncés à la section 1.3 requiert de traiter des roues dentées selon différentes formes de zone durcies.

2.2.5 Influence du temps de chauffe sur la dissipation vers le cœur

Le cœur non chauffé de la roue dentée agit comme dissipateur thermique. La chaleur des zones chauffées se dissipe vers le corps de la roue dentée. Une longue durée de chauffe et une puissance de chauffe faible contribuent à ce que la dissipation de chaleur vers le cœur soit élevée. À l'inverse, une courte durée de chauffe et une puissance de chauffe élevée contribuent à ce que la dissipation de chaleur vers le cœur soit faible. Si l'objectif est de réaliser une recette ayant une zone durcie très profonde, un long temps de chauffe et une basse puissance sont choisis. À l'inverse, si l'objectif est de réaliser une recette ayant une zone durcie peu profonde, un faible temps de chauffe et une haute puissance sont choisis.

Tableau 2-3 : Quantité de dissipation de chaleur vers le cœur

Facteurs	Quantité de dissipation vers le cœur
Long temps de chauffe et basse puissance	Élevée
Court temps de chauffe et haute puissance	Faible

2.2.6 Préchauffe

La majorité des recettes développées au cours de ce projet utilisent une préchauffe lors du procédé d'induction thermique. La chauffe après laquelle la température d'austénitisation est atteinte est nommée chauffe finale. La préchauffe est une chauffe réalisée avant la chauffe finale. Une préchauffe est constituée d'une chauffe à basse fréquence à faible puissance sur un temps relativement long. L'objectif est de chauffer la couche de matériau à durcir jusqu'à une température 100 °C à 350 °C sous la température A_{c1} (Rudnev, 2009), afin d'augmenter localement la température initiale lors de la chauffe finale. Cela diminue la quantité d'énergie nécessaire à la chauffe finale et diminue les gradients de température dans la pièce. Les gradients de température résultent en des expansions thermiques d'intensité différente à différents endroits dans la pièce. Ces

expansions thermiques causent l'apparition de contraintes thermiques qui si elles sont suffisamment élevées, causent des déformations plastiques et des fissures (Mackenzie, 2007).

Un court laps de temps est inséré entre la préchauffe et la chauffe finale. Ce temps de pause est suffisamment long pour qu'il se produise une légère dissipation de chaleur qui contribue à diminuer les gradients de température à l'intérieur du volume de matériau chauffé.

2.2.7 Effet de bord

L'effet de bord est caractérisé par une déformation du champ magnétique aux extrémités d'une pièce chauffée par induction thermique. Cet effet est principalement responsable de la non-uniformité du profil de température sur la largeur de la pièce (Rudnev et al., 2003a).

Lors de la chauffe par induction thermique d'une roue dentée, l'effet de bord se manifeste par une profondeur durcie plus élevée près des faces avant et arrière qu'à mi-largeur de denture. Des effets de bords sont observés en pied de dent pour toutes les recettes étudiées dans ce mémoire. Par contre, ce ne sont pas toutes les recettes qui montrent un effet de bord à la tête des dents (voir les tableaux 4-16 et 4-17).

2.3 Modes de défaillance et effets bénéfiques de l'induction thermique

Les deux principaux modes de défaillances des engrenages sont la défaillance par flexion en pied de dent et par pression de contact (piqûre). Le calcul de la capacité de charge selon la résistance à ces modes de défaillance est présenté dans les parties deux et trois de la norme ISO 6336 (Iso 6336-2:2006, 2008; Iso 6336-3:2006, 2008).

2.3.1 Flexion

Lorsque la contrainte subie par un acier dépasse sa limite d'élasticité, le matériau se déforme de façon permanente. Une charge appliquée à une dent d'une roue dentée peut être suffisamment faible pour que les déformations plastiques soient invisibles dans le domaine macroscopique tout en étant suffisamment élevées pour causer de très petites déformations plastiques dans le domaine microscopique. Lorsque la charge est appliquée et retirée à répétition, et que la contrainte en tension en pied de dent est suffisamment élevée, une fissure s'amorce finalement, pour ensuite se propager jusqu'à rupture complète de la dent du corps de la roue dentée. Ce phénomène est appelé fatigue des matériaux. Les fissures en pied de dent qui se propagent jusqu'à rupture sont généralement localisées dans les profils de raccordement en pied de dent sollicités en traction. Dans ce cas, il est question d'une défaillance en flexion.

Les fissures en flexion apparaissent en pied de dent et elles s'amorcent en surface ou sous la surface (Stephens et al., 2000). Elles s'amorcent en premier au point faible de la pièce. Ainsi, une fissure peut s'amorcer en surface ou sous la surface. Le durcissement d'une épaisseur suffisante de matière en pied de dent d'une roue dentée augmente la résistance à la flexion en pied de dent de cette roue et retarde l'amorçage de fissure à la fois en surface et sous la surface.

La norme ISO 6336-3 (Iso 6336-3:2006, 2008) fournit une plage de profondeurs durcie en pied de dent d'une roue dentée traitée par cémentation applicable afin de résister aux contraintes flexion. Une telle plage de profondeurs n'est pas fournie pour des roues traitées par induction thermique. Il est cependant probable que les valeurs optimales pour l'induction thermique se situent près de celles pour la cémentation.

Des contraintes résiduelles sont générées dans le matériau lors de la transformation en martensite de la couche de matériau traitée par induction thermique. Ces contraintes sont en

compression à la surface et elles deviennent en tension à une certaine distance sous la surface, afin qu'il y ait équilibre des contraintes résiduelles. Les contraintes en compression sont bénéfiques pour la résistance en flexion et les contraintes en tension sont néfastes pour la résistance en flexion. Il est donc avantageux pour améliorer la résistance à la flexion que les contraintes résiduelles en compression soient près de la surface, là où les contraintes dues à la charge appliquée sont maximales, et que les contraintes résiduelles en tension soient en profondeur sous la surface, là où les contraintes dues à la charge appliquée sont plus faibles. Puisque la profondeur durcie influence les profils des contraintes résiduelles, l'hypothèse est émise qu'il existe une plage de profondeurs durcie optimale pour générer des profils des contraintes résiduelles qui améliorent la résistance à la flexion.

2.3.2 Pression de contact

Les engrenages défont également par pression de contact (piqûre). Lorsqu'une dent d'une roue dentée en rotation applique une charge sur une dent d'une seconde roue dentée en rotation, une charge ayant une direction perpendiculaire à la surface est appliquée et se déplace le long de la ligne de conduite, sur le flanc actif. Cela a pour effet de générer des contraintes sous la surface du flanc actif. Avec un nombre répété de cycles d'application de la charge, les fissures peuvent apparaître sous la surface et remonter jusqu'à la surface. Il s'ensuit un arrachement de matière ayant la forme d'un petit cratère que l'on appelle piquûre. Le durcissement d'une profondeur suffisante de la région du flanc actif d'une roue dentée augmente la résistance à la pression de contact de cette roue.

2.3.3 Effets bénéfiques de l'induction thermique

Le durcissement des dents d'une roue dentée en acier augmente sa résistance à la flexion en pied de dent et sa résistance à la pression de contact comparativement à une roue dentée de dureté inférieure. Une augmentation de la dureté augmente la limite d'élasticité de l'acier et permet à l'acier de supporter une plus grande charge avant de se déformer

plastiquement. Comme mentionné à la section 2.3.1, l'amorçage d'une fissure est principalement un phénomène de déformation plastique. Pour cette raison, l'augmentation de la limite élastique a un effet positif sur l'augmentation de la résistance à la flexion en pied de dent.

Les principaux avantages et inconvénients de l'augmentation de la dureté en surface des dents d'une roue dentée en acier sont présentés au tableau 2-4 (Asm international handbook committee, 2004; Iso 6336-5:2003, 2003; Oberg et al., 2000; Pavlina et Van tyne, 2008; Rudnev et al., 2003a; Stephens et al., 2000).

Tableau 2-4 : Avantages et inconvénients d'une dureté élevée en surface pour un acier

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la limite élastique de l'acier. • Augmentation de la résistance à la fatigue. • Apparition de contraintes résiduelles bénéfiques. • Augmentation de la limite d'endurance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la ductilité. • Augmentation de la vitesse de propagation des fissures. • Augmentation de la sensibilité à l'entaille. • Augmentation de la fragilité, ce qui signifie que le matériau a plus tendance à se rompre sous l'effet d'un choc.

Il est intéressant de savoir que le cœur non chauffé de la roue dentée agit comme stabilisateur et limite les déformations des dents pendant le traitement thermique. Ainsi, l'induction thermique est connue pour générer peu de déformations dans la pièce traitée (Oberg et al., 2000).

CHAPITRE 3

INSTALLATIONS ET PROTOCOLES

EXPÉRIMENTAUX

Ce chapitre présente les composantes, les installations et les protocoles expérimentaux qui ont servi dans le cadre de cette étude. La section 3.1 porte la description des caractéristiques physiques des roues dentées. La section 3.2 couvre la description de la machine à induction thermique utilisée pour traiter les roues dentées. La section 3.3 présente l'inducteur utilisé dans la machine à induction thermique pour traiter les roues dentées. La section 3.4 fournit la méthodologie de développement des recettes. La section 3.5 porte sur la procédure de mesure de la profondeur durcie. La section 3.6 donne une description du banc d'essai en flexion simple. La section 3.7 traite de la méthode d'inspection par particules magnétiques. La section 3.8 présente des informations sur les essais en flexion simple. La section 3.9 explique ce que sont des intervalles de confiance et explique l'impact de la répétition des essais sur la largeur des intervalles de confiance.

3.1 Caractéristiques physiques des roues dentées

Les roues dentées utilisées au cours de l'expérimentation ont toutes été usinées par la même entreprise, dans le même acier avec le même outil de coupe. La section 3.1.1 donne des informations sur le matériau dans lequel les roues dentées sont usinées. La section 3.1.2 présente des informations au sujet de l'usinage des roues dentées.

3.1.1 Matériau

Les roues dentées ont été usinées dans de l'acier AISI 4340. La composition chimique de cet acier est présentée au tableau 3-1 et ses propriétés sont présentées au

tableau 3-2. La dureté initiale avant usinage de l'acier utilisé se situait entre 35 et 41 HRC. Cela équivaut à une dureté de 345 HV à 402 HV (Oberg et al., 2000).

Tableau 3-1 : Composition chimique de l'acier AISI 4340 (Oberg et al., 2000)

Composition (%)							
C	Mn	P (max)	S (max)	Si	Ni	Cr	Mo
0,38-0,43	0,60-0,80	0,035	0,040	0,15-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30

Tableau 3-2 : Propriétés de l'acier AISI 4340 (Oberg et al., 2000)

Traitement	Résistance à la traction	Limite d'élasticité	Dureté		
	MPa		Bhn	HRC ^a	HV ^a
Normalisé à 871 °C	1278,98	861,84	363	39	382
Recuit à 810 °C	744,63	472,29	217	18	230
^a Conversion à partir de la dureté Brinell (Oberg et al., 2000)					

3.1.2 Usinage

Les roues dentées ont été usinées avec un outil de la compagnie Dathan Tool & Gauge Co. Ltd ayant le numéro de pièce client s25-012-4 et le numéro de référence Dathan 43/28. L'outil utilisé est du type outil pignon. Une mise en plan en unités impériales a été utilisée. Les roues dentées ont été fabriquées en respectant les données d'usinage présentées dans le tableau 3-3. La mise en plan des roues dentées est fournie à l'annexe VII.

Tableau 3-3 : Données nominales d'usinage des roues dentées

Caractéristique	Valeur
Nombre de dents	48
Diametral pitch, (po ⁻¹)	(12,0000)
Module, mm	2,1167
Angle de pression, degrés	25,000 °
Épaisseur apparente, mm (po)	3,32486 (0,1309)
Diamètre de base, mm (po)	91,95308 (3,6202)
Diamètre de pied, mm (po)	96,30664 (3,7916)
Diamètre primitif, mm (po)	101,60000 (4,0000)
Diamètre de tête, mm (po)	105,8418 (4,167)
Largeur de denture, mm (po)	6,350 (0,25)
Rayon minimum du flanc de raccordement ^a , mm (po)	0,7366 (0,029)
Dépouille de tête	Aucune
Dépouille d'extrémité	Aucune
Dégagement de pied	Aucun
Coefficient de déport	0
Fini	Tel quel après usinage par outil pignon
^a Calculé à partir du profil théorique de la roue dentée obtenu selon les dimensions de l'outil pignon	

Lorsqu'une roue dentée subit un traitement thermique, le matériau se déforme quelque peu. Dans le domaine aérospatial, il est pratique courante de rectifier le profil de la roue après le traitement thermique afin de minimiser les déformations. Cela requiert d'usiner la roue en y laissant un surplus de matière. Lors de la rectification finale, une mince couche de matière est retirée. La profondeur durcie générée par le traitement thermique doit être un peu plus élevée que la profondeur durcie cible parce que la rectification finale enlève une épaisseur de matière. En plus d'augmenter la précision et d'éliminer l'effet des distorsions causées par le traitement thermique, la rectification a pour effet d'améliorer le fini de surface.

Les roues dentées utilisées pour les essais ont été usinées selon le profil final, sans surplus de matière. Il a été choisi de ne pas procéder à une rectification finale. Au niveau des distorsions, cela est tout à fait acceptable puisque les essais sont réalisés sur un banc d'essai en flexion simple. Lorsque les essais se font en rotation, il est d'autant plus important d'avoir des profils de qualité, car les roues dentées tournent à de grandes vitesses de rotation. Au niveau du fini de surface, il est acceptable que les roues aient le fini de surface généré par l'outil pignon parce que le fini est le même pour toutes les roues dentées. Les essais servent à comparer les recettes les unes aux autres. L'important est donc d'avoir le même fini de surface sur toutes les roues dentées.

3.2 Machine à induction thermique

Les roues dentées ont été traitées par induction thermique avec une machine de trempe de contour DB1000CN - 1B, équipée d'un générateur multifréquence SINAC 650/950 S MFC, composé d'une partie générateur MF et d'une partie générateur HF, de la compagnie EFD Induction. La liste des caractéristiques de la machine à induction thermique est la suivante.

- Elle fonctionne en moyenne fréquence (10 kHz) et en haute fréquence (variable de 150 kHz à 250 kHz, s'adapte à l'inducteur et à la pièce, environ 190 kHz avec l'inducteur et les roues dentées utilisées), en séquentiel et en simultané.
- Elle peut fournir des puissances élevées sur un court laps de temps.
- Elle permet la rotation de la pièce.
- Elle permet un déplacement rapide de la pièce dans la direction Z (positions de chargement, dans l'inducteur et dans la douche).
- Elle intègre une douche de refroidissement.

Cette machine permet de développer des recettes combinant la moyenne et la haute fréquence, en séquentiel ou en simultané. Il est également possible de développer des recettes ayant des temps de chauffe très courts. Il est important de faire tourner la pièce

traitée pendant la chauffe afin d'uniformiser l'effet de la chauffe sur tout le pourtour de la pièce. En ce qui concerne la position de chargement de la roue dentée, l'inducteur et la douche sont localisés à des hauteurs différentes (figure 3-1). Dès la fin de la chauffe, la pièce est rapidement déplacée dans la douche et refroidie. La douche refroidit la pièce à l'aide d'un haut débit de solution de trempe à base de polymères. On définit la face avant de la roue comme étant la face supérieure lors du traitement et la face arrière comme étant la face inférieure.

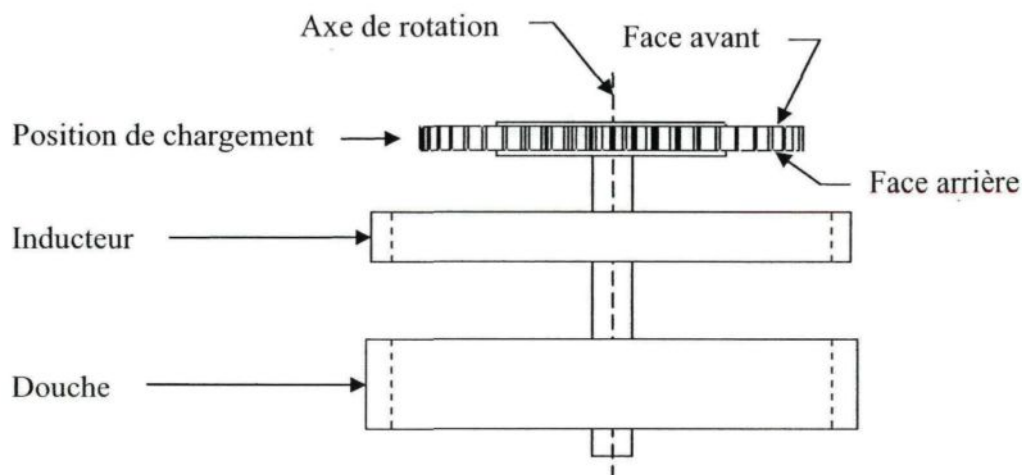


Figure 3-1 : Positionnement des composants de la machine à induction thermique (non à l'échelle réelle)

3.3 Inducteur

L'inducteur est fabriqué par la compagnie EFD Induction. Il s'agit d'un inducteur à un seul tour. Le numéro de pièce EFD est le 26875 / 31. Il est composé d'une partie active et d'un système de refroidissement. La partie active est un enroulement d'un tour en cuivre Cu-c. Le système de refroidissement est un enroulement d'un tour également en cuivre Cu-C qui est en contact avec la partie active et la refroidit pendant la chauffe. Le cuivre Cu-c est un cuivre désoxydé (exempt d'oxygène). Il est utilisé, car il possède une excellente conductivité électrique et thermique.

Le diamètre intérieur (110 mm) de la partie active est légèrement supérieur au diamètre de tête (105,8418 mm) des roues dentées traitées. Il y a donc un entrefer d'un peu plus de 2 mm entre l'inducteur et la roue dentée.

L'épaisseur de la partie active est de 7 mm et la largeur de denture des roues dentées utilisées est de 6,350 mm. Lorsque la pièce est bien centrée par rapport à la partie active, la partie active dépasse de 0,325 mm de chaque côté de la roue. Une erreur de positionnement axial entraîne des effets de bord et donc des profondeurs durcies différentes aux deux faces de la roue.

3.4 Développement des recettes

Le développement des recettes comprend les étapes suivantes.

- Connaître et contrôler les facteurs d'influence qui agissent sur la dureté et la profondeur durcie (section 3.4.1).
- Choisir les noms des recettes (section 3.4.2).
- Établir quels sont les objectifs (section 3.4.3).
- Respecter une méthodologie afin de combler les besoins définis (section 3.4.4).

3.4.1 Facteurs d'influence

Les facteurs d'influence sont présentés à la section 2.2. Le tableau ci-dessous les énumère à nouveau et indique si le facteur est varié ou non au cours de l'expérimentation.

Tableau 3-4 : Liste des facteurs d'influence variés et non variés

Étape du procédé	Paramètre	Paramètre varié
Chauffe par induction thermique	Temps	Varié
	Fréquence	Varié
	Puissance	Varié
	Géométrie de l'inducteur	Constant
Refroidissement par douche	Géométrie de l'appareillage de douche	Constant
	Débit du liquide de refroidissement	Constant
	Pourcentage de concentration de la solution polymérique	Constant
Revenu après refroidissement	Température	Constant
	Temps	Constant

Les recettes sont développées en variant seulement les facteurs liés à la chauffe par induction thermique. Tous les autres facteurs sont conservés constants.

3.4.2 Nomenclature des recettes

Rappelons que l'atteinte des objectifs énoncés à la section 1.3 requiert de traiter des roues dentées selon différentes formes de zone durcies. La figure 3-2 montre la classification de la forme de la zone durcie utilisant les lettres A, B, C et D. Ces lettres sont utilisées dans la nomenclature des recettes.

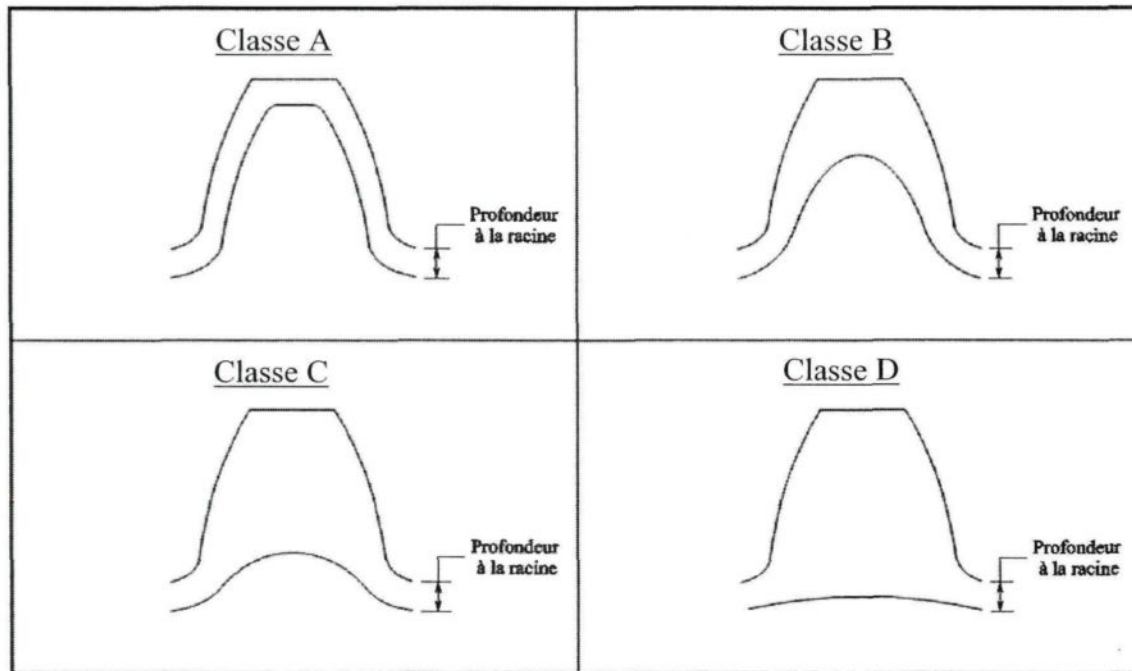


Figure 3-2 : Classification de la forme de la zone durcie

Les classes A, B, C et D ont approximativement la même profondeur durcie en creux de dent à mi-largeur de denture. Une recette de classe A est une recette de durcissement de contour. Une recette de classe B est une recette intermédiaire entre recette de durcissement de contour et recette de durcissement à cœur, mais elle se rapproche plus de la recette de durcissement de contour. Une recette de classe C est une recette intermédiaire entre une recette de durcissement de contour et une recette de durcissement à cœur, mais elle se rapproche plus de la recette de durcissement à cœur. Une recette de classe D est une recette de durcissement à cœur. Il est important de rappeler que pour permettre de quantifier l'effet du type de contour sur les performances en flexion, toutes les recettes développées devront avoir approximativement la même profondeur au milieu du creux à mi-denture.

	A	1	-	1
Classification de la forme de la zone durcie				
A = zone durcie très mince au centre de la tête de la dent à mi-denture				
B = zone durcie mince au centre de la tête de la dent à mi-denture				
C = zone durcie profonde au centre de la tête de la dent à mi-denture				
D = zone durcie très profonde au centre de la tête de la dent à mi-denture				
Numéro de la recette				
1 = première recette pour une classification donnée				
2 = deuxième recette pour une classification donnée				
3 = troisième recette pour une classification donnée				
4 = quatrième recette pour une classification donnée				
Numéro de la roue dentée				
1 = premier engrenage pour une classification et recette données				
2 = deuxième engrenage pour une classification et recette données				

Les recettes sont nommées selon la nomenclature présentée ci-dessus. Le premier caractère est une lettre qui indique la classification de la forme de la zone durcie. Le second caractère est un chiffre qui indique s'il s'agit de la première, deuxième, troisième ou quatrième recette ayant la forme de zone durcie indiquée par le premier caractère. Le troisième caractère indique s'il s'agit de la première ou de la deuxième roue dentée traitée selon la recette indiquée par les deux premiers caractères. Ainsi, les deux premiers caractères indiquent la recette et le troisième indique la roue dentée.

3.4.3 Objectifs de développement de recette

Les paramètres de temps, de fréquence et de puissance ont été choisis de façon à obtenir des recettes qui respectent les objectifs suivants.

- Obtenir approximativement la même profondeur durcie au milieu du creux à mi-largeur de denture pour toutes les recettes.
- Développer au moins une recette pour chaque classe définie à la section 3.4.2.
- Durcir tout le contour des dents, ce qui inclut les têtes, les flancs et les creux des dents.

3.4.4 Méthodologie de développement des recettes

Le développement d'une recette se fait en suivant la procédure itérative d'essai et erreur présentée à la figure 3-3.

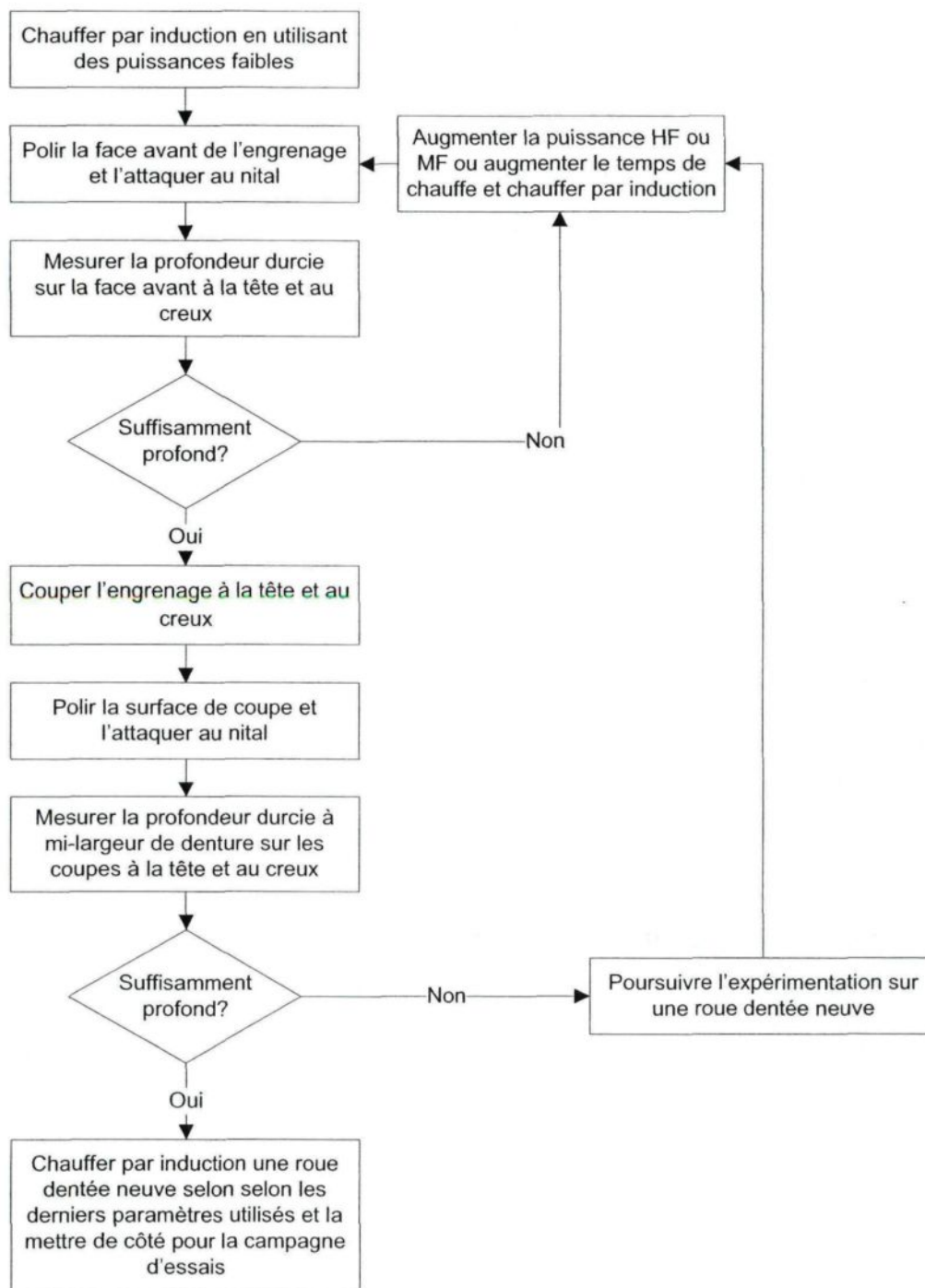


Figure 3-3 : Schématisation de la procédure expérimentale de génération de recettes

La première étape consiste à traiter une roue selon une recette à basse puissance pour ensuite regarder quel est l'impact de cette recette sur la profondeur durcie des faces avant et

arrière. Si la profondeur durcie n'est pas suffisante, traiter la même roue dentée soit à une puissance supérieure ou à la même puissance, mais plus longtemps. Procéder ainsi jusqu'à ce que la profondeur des faces externes soit suffisante. Couper la roue dentée au milieu du creux et mesurer la profondeur durcie à mi-largeur de denture. Une roue coupée ne peut être réutilisée. Si la recette ne donne pas la profondeur souhaitée, ajuster les paramètres de trempe, traiter un nouvel engrenage, le couper et mesurer la profondeur durcie en creux de dent. Si la profondeur est satisfaisante, traiter une nouvelle roue et la mettre de côté pour les essais expérimentaux. Les roues utilisées pour les essais en flexion simple sont traitées par induction thermique une seule fois. Après le traitement d'induction thermique, les roues dentées subissent un revenu au four pendant 2 heures à 149 °C, pour être ensuite refroidies à l'air ambiant.

La procédure pour obtenir une profondeur durcie choisie au milieu du creux à mi-largeur de denture est itérative et destructive. Afin de limiter le nombre de roues dentées détruites, un certain écart entre la profondeur mesurée et la profondeur cible est toléré. Cela signifie que les profondeurs durcies au milieu de creux à mi-largeur de denture des recettes retenues peuvent différer quelque peu les unes des autres.

3.5 Mesure de la profondeur durcie

Cette section porte sur la mesure de la profondeur durcie. La section 3.5.1 définit ce qu'est la profondeur durcie. La section 3.5.2 explique la méthodologie employée pour réaliser les mesures de profondeur durcie en tête de dent et en creux de dent, tandis que la section 3.5.3 présente celle employée pour réaliser les mesures à l'emplacement théorique du point le plus contraint.

3.5.1 Définition de la profondeur durcie

Une courbe de dureté en fonction de la profondeur est appelée un profil de dureté. Selon un article (Klaren et al., 1990) paru dans le ASM Handbook volume 4 (Asm international handbook committee, 1991), la profondeur durcie conventionnelle est définie comme étant la distance perpendiculaire à la surface à laquelle une dureté spécifiée est atteinte. La dureté spécifiée est typiquement un peu plus élevée que la dureté à cœur. La dureté moyenne à cœur des roues dentées utilisées est de 344 HV. Il a été décidé que la dureté spécifiée serait de 400 HV. Ainsi, on définit la profondeur durcie conventionnelle comme étant la distance perpendiculaire à la surface à laquelle une dureté de 400 HV est atteinte. Lorsque deux points de mesure voisins donnent respectivement une dureté inférieure et supérieure à 400 HV, on calcule la profondeur durcie conventionnelle par interpolation entre les deux points de mesure (figure 3-4). La terminologie profondeur durcie est retenue pour le reste du mémoire lorsqu'il est question de la profondeur durcie conventionnelle.

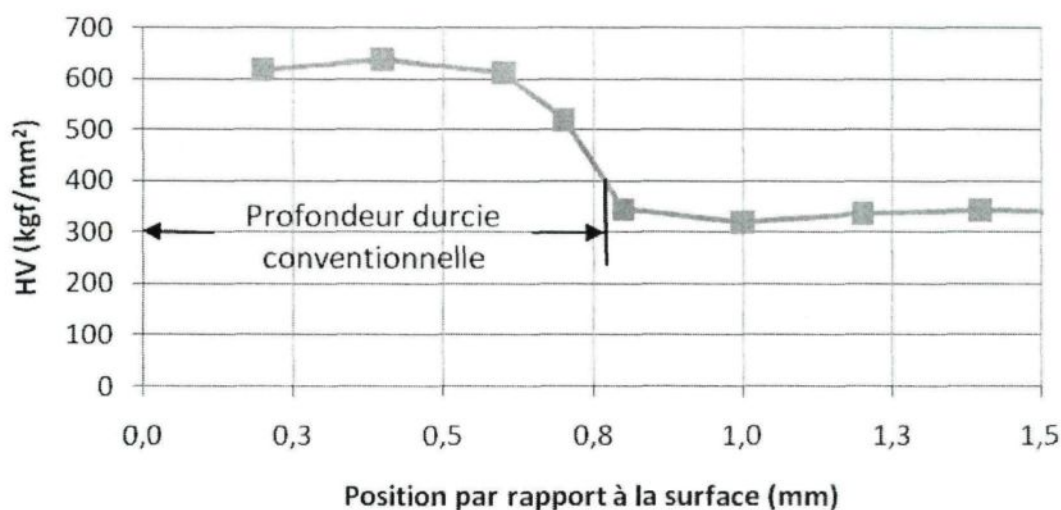


Figure 3-4 : Profondeur durcie conventionnelle

3.5.2 Méthodologie de mesure en tête et en creux de dent

Le Nital est une solution d'alcool et d'acide nitrique. On s'en sert pour révéler la microstructure des aciers au carbone. Une attaque chimique au Nital noircit la zone non martensitique. Cela permet de distinguer à l'œil nu la zone durcie de la zone non durcie. Le Nital est utilisé avant de photographier la zone durcie. Le Nital n'est pas utilisé lors des mesures à l'aide d'un microduromètre.

Un microduromètre est un appareil de mesure qui applique une faible charge connue sur un pénétrateur de diamant, en forme de pyramide à base carrée. Les dimensions de l'empreinte sont mesurées pour évaluer la dureté du matériau. L'échelle de mesure Vickers (HV) est utilisée. La dureté Vickers (HV), dont les unités sont kgf/mm^2 , est calculée selon l'équation à la section 3.3.5 de la norme ASTM E384 – 99 (équation 3-1).

Équation 3-1 : Dureté Vickers

$$HV = 1,8544 \frac{P_1}{d_1^2}$$

Où

P_1 : force appliquée en kgf sur le pénétrateur de diamant

d_1 : longueur en mm de la diagonale de la trace laissée par le pénétrateur de diamant

La dureté d'une roue dentée soumise au procédé d'induction thermique varie en fonction de la position dans la pièce. Il est possible de mesurer la dureté à l'intérieur de la roue dentée. Cela requiert de pratiquer une coupe, de figer la pièce coupée dans une rondelle de résine, de polir la surface de coupe et d'effectuer des mesures à l'aide d'un microduromètre. Les mesures sont réalisées le long d'une ligne perpendiculaire à la surface de la dent. Les résultats des mesures sont affichés sur une figure sur laquelle l'axe des ordonnées est la dureté et l'axe des abscisses est la distance entre le point de mesure et la surface de la dent. La courbe obtenue est appelée un profil de dureté. Pour chacune des recettes testées, des coupes ont été effectuées au milieu de la tête et au milieu du creux de dent tel que présenté à la figure 3-5.

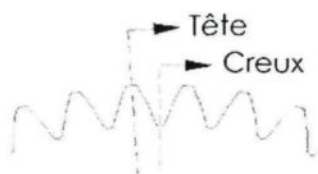


Figure 3-5 : Plans de coupe passant par le milieu de la tête et par le milieu du creux de dent

La figure 3-6 montre un exemple de section selon les plans de coupe de tête et de creux.

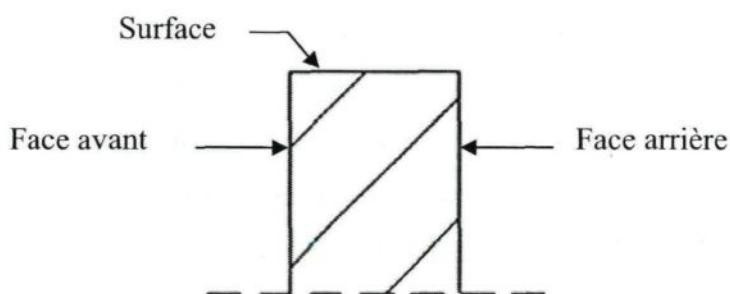


Figure 3-6 : Section de tête et de creux de dent

La profondeur durcie est plus faible à mi-largeur de denture qu'aux faces avant et arrière (section 2.2.7). Il arrive également que les profondeurs durcies des faces avant et arrière ne soient pas identiques. Pour ces raisons, la profondeur durcie est mesurée le long de trois lignes positionnées près de la face avant, près de la face arrière et à mi-denture (figure 3-7).

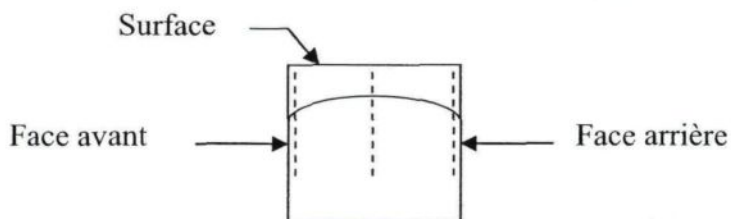
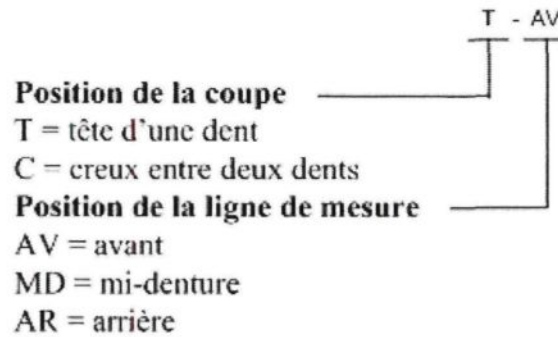


Figure 3-7 : Section de tête ou de creux et lignes de mesure en pointillé



Les positions des lignes de mesure sont décrites à l'aide de trois lettres. Les coupes sont réalisées de façon à avoir la face avant du côté gauche. Les points de mesure ne doivent pas être trop près des bords de la pièce afin d'obtenir des lectures non erronées. Il est suggéré de positionner le premier point de mesure voisin de la surface à 0,15 mm de celle-ci (Iso 3754-1976, 1976). Il est acceptable de positionner le premier point de mesure à un peu plus de 0,15 mm. Il est recommandé de positionner les points de mesure à 0,1 mm les uns des autres dans la zone où la dureté change rapidement et les points peuvent être plus espacés ailleurs (Iso 3754-1976, 1976). La section 4.4 présente les figures de profils de dureté en pied de dent de toutes les recettes. L'annexe IV fournit toutes les duretés mesurées en tête et en pied de dent sous forme de tableaux ainsi que des informations complémentaires relatives à la prise de mesures.

3.5.3 Méthodologie de mesure à l'emplacement théorique du point le plus contraint en flexion

Les normes ISO 6336 et AGMA 2001-B88 supposent que le point le plus contraint en tension d'une roue dentée se situe en pied de dent à l'intersection d'une ligne de référence tangente au profil et orientée à un angle ζ_F par rapport à une ligne passant par le centre de la tête d'une dent et de l'axe d'une roue (figure 3-8).

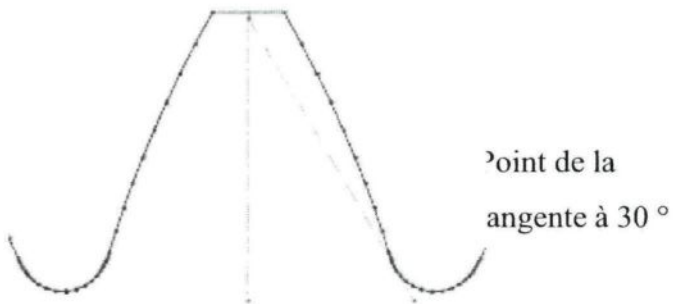


Figure 3-8 : Point de la tangente à 30 °

Kawalec compare l'angle ζ_F obtenu selon la norme ISO, selon la norme AGMA et selon les éléments finis (Kawalec, Wiktor et Ceglarek, 2006). La conclusion de Kawalec est que l'angle ζ_F d'une roue dentée chargée au point le plus haut de contact unique est de 30 ° selon la norme ISO, d'un peu moins que 30 ° selon la norme AGMA et d'un peu plus que 30 ° selon les éléments finis (tableau 3-5).

Tableau 3-5 : Angle ζ_F selon la norme ISO, la norme AGMA et les éléments finis pour une charge appliquée au point le plus haut de contact unique sur des roues dentées de 15 à 105 dents.

Source	ζ_F
ISO	30 °
AGMA	24-30 °
Éléments finis	36-47 °

Pour le reste du mémoire, c'est la définition de la norme ISO d'un angle ζ_F de 30 ° qui est retenue. Ainsi, le point le plus contraint en tension est nommé le point de la tangente à 30 ° (figure 3-8).

Lors de l'application d'une charge au point le plus haut de simple contact, les contraintes appliquées en tension sont maximales en surface au point de la tangente à 30 °. Au même moment, il est supposé que les contraintes appliquées en tension sous la surface à une profondeur donnée sont maximales à l'intersection d'une normale au profil passant par le point de la tangente à 30 ° et de la profondeur donnée (figure 3-9).

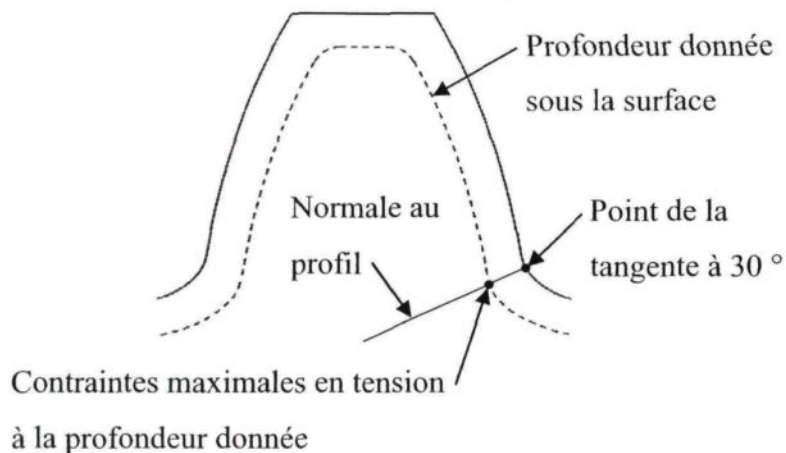


Figure 3-9 : Localisation des contraintes maximales en tension

La profondeur durcie est plus faible à mi-denture qu'aux faces avant et arrière (section 2.2.7). Pour chacune des recettes testées, des coupes ont été effectuées à mi-denture tel que présenté à la figure 3-10.



Figure 3-10 : Plan de coupe situé à mi-denture

La profondeur durcie est mesurée le long de la normale au profil passant par le point de la tangente à 30° (figure 3-9) sur les sections obtenues suite à la coupe à mi-denture (figure 3-10). Cette profondeur durcie est mesurée par analyse d'image. Pour le reste du mémoire, la profondeur durcie de la tangente à 30° fait référence à cette profondeur durcie mesurée par analyse d'images. Les mesures sont effectuées sur des sections attaquées au Nital. La zone durcie et la zone non durcie sont de couleurs différentes à cause de l'attaque au Nital. La profondeur durcie de la tangente à 30° est mesurée de la surface jusqu'au milieu de la zone de transition de couleur où la dureté est entre 300 et 600 HV. La dureté précise à la profondeur durcie de la tangente à 30° n'est pas connue.

La mesure de la profondeur durcie par analyse d'images a l'avantage de faciliter le positionnement de la ligne de mesure comparativement à la méthode de mesure utilisant la mesure de microdureté. Puisque la dureté à la profondeur durcie de la tangente à 30° n'est pas connue et que la dureté à la profondeur durcie selon la mesure de microdureté est de 400 HV, les valeurs des mesures de profondeurs durcies obtenues selon les deux méthodes de mesure ne peuvent être comparées entre elles. Cependant, les différentes mesures de profondeurs durcies de la tangente à 30° peuvent être comparées entre elles car elles sont toutes obtenues selon la même méthodologie.

3.6 Banc d'essai en flexion simple

Le banc d'essai utilisé pour réaliser les essais en flexion simple a été conçu et fabriqué dans le cadre d'un autre projet. La section 3.6.1 couvre la description des diverses composantes mécaniques du banc. La section 3.6.2 présente les divers capteurs branchés au banc. La section 3.6.3 explique la méthode employée pour s'assurer que la position d'application est la même pour tous les essais. Finalement, la section 3.6.4 donne les conditions causant l'arrêt automatique du banc.

3.6.1 Description mécanique

Une roue dentée installée sur le banc est soumise à un couple par le biais des cannelures en son centre. La dent soumise à l'essai est appuyée contre un bloc d'acier. Le contact entre la dent et le bloc est fait au point le plus haut de contact unique. La méthode employée pour positionner la charge en ce point est présentée à la section 3.6.3. Les raisons pour lesquelles il est choisi de positionner la charge en ce point sont discutées à la section 3.8.3. Le calcul de ce point est fourni à l'annexe I. Le bloc d'acier est fixé à un piédestal qui est lui-même fixé sur une cellule de charge. Le bloc d'acier est un consommable qui est changé à chaque essai. La figure 3-11 présente une vue schématisée de la roue dentée, du bloc d'acier et du piédestal.

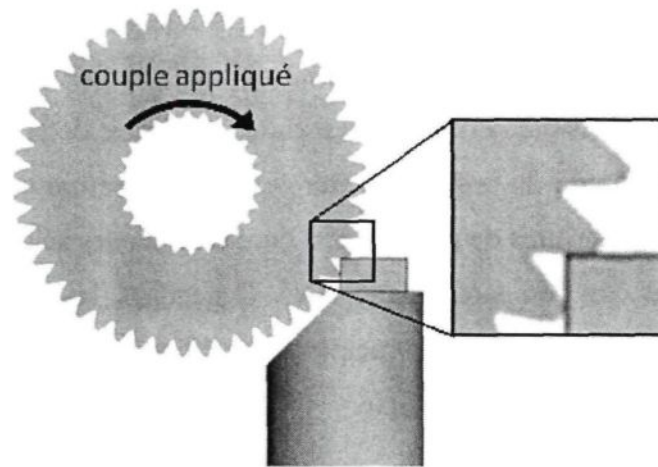


Figure 3-11 : Roue dentée, bloc d'acier et piédestal

Le banc est installé sur une presse servohydraulique modèle 810 utilisant un actionneur hydraulique 318.10 de la compagnie MTS. La presse servohydraulique comporte un cylindre hydraulique se déplaçant verticalement pouvant être contrôlé en force ou en déplacement. La presse est utilisée en contrôle de force pour les essais de fatigue et elle applique une charge vers le bas. La distance approximative de déplacement du vérin lorsque la charge appliquée passe de la valeur minimale à la valeur maximale est connue. Selon cette distance, la fréquence maximale de fonctionnement de la presse se situe aux alentours de 35 à 40 Hz. Il a été choisi de réaliser les essais à une fréquence de 30 Hz. Les figures de 3-12 à 3-14 montrent le banc monté sur la presse.

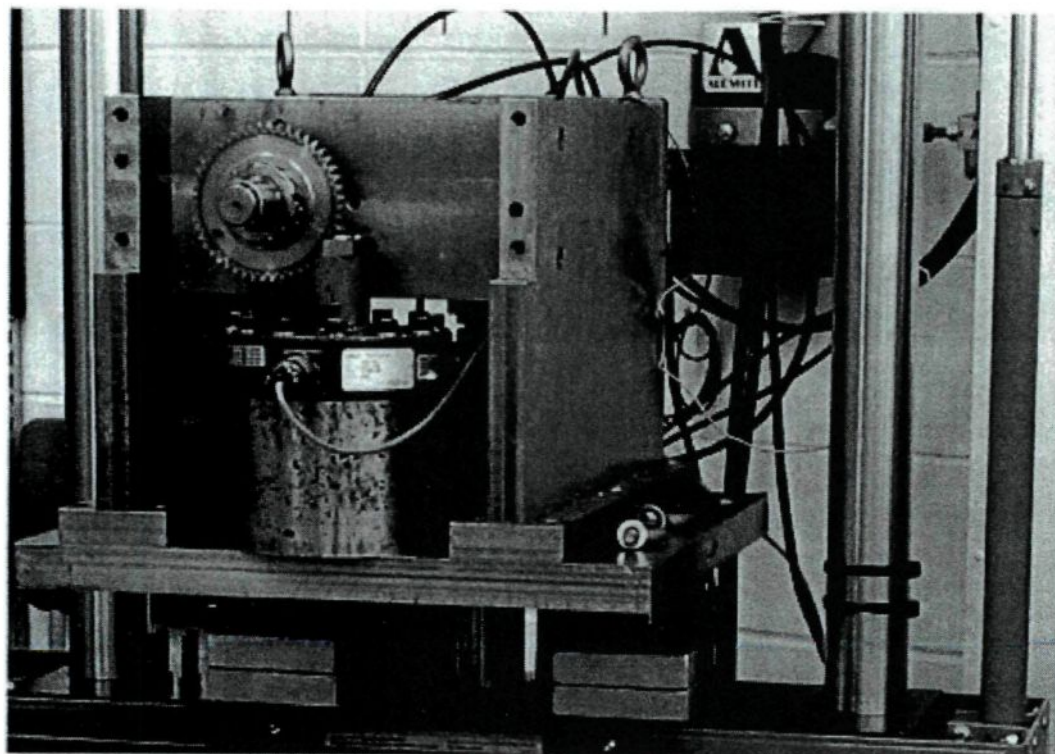


Figure 3-12 : Photo de face du banc d'essai sans la plaque en place

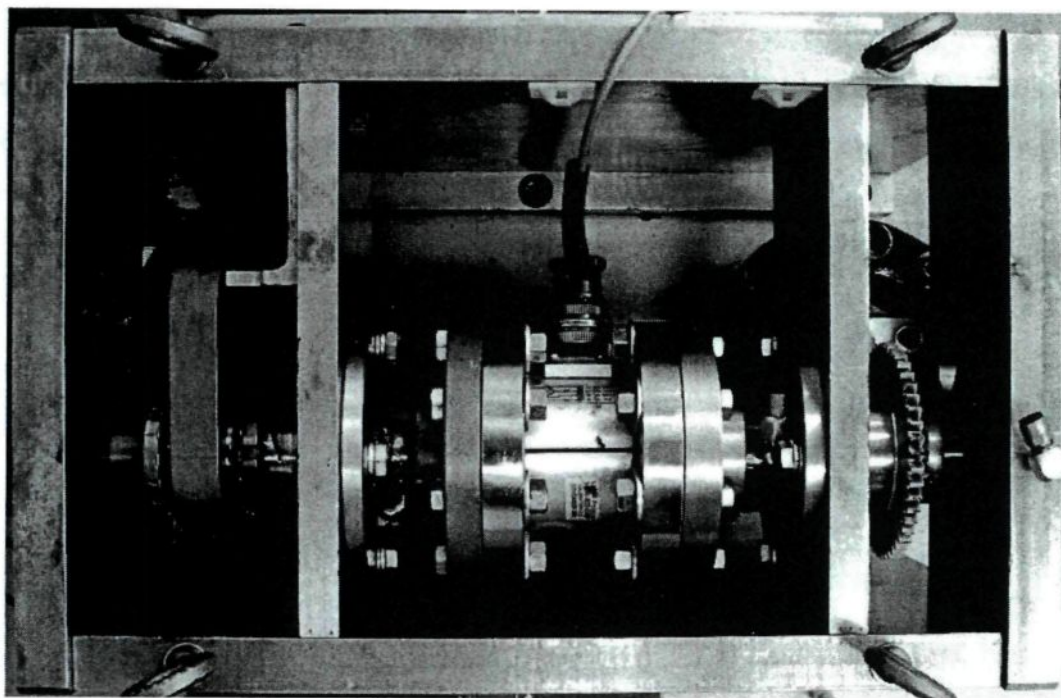


Figure 3-13 : Photo de dessus du banc d'essai

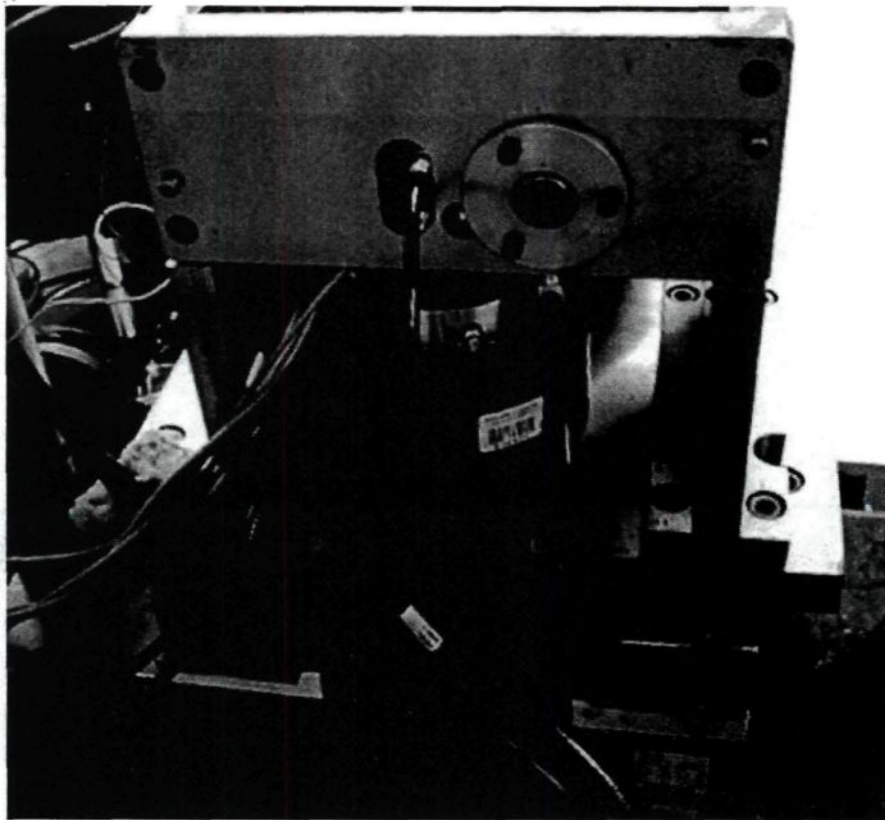


Figure 3-14 : Photo de l'arrière du banc d'essai avec la plaque arrière en place

Le vérin de la presse est visible sur la figure 3-14. Une cellule de charge est fixée au bout du vérin. Une tige filetée est vissée au côté supérieur de la cellule de charge. La pièce montrée à la figure 3-15, que l'on nomme fourche, est vissée à la tige filetée et bloquée en place par des écrous. Les deux trous montrés servent à y passer une goupille.

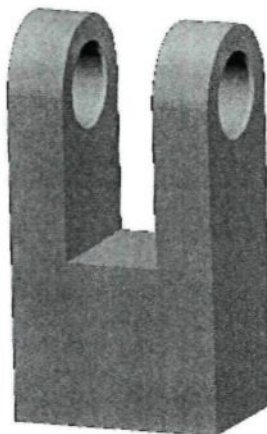


Figure 3-15 : Fourche positionnée entre la cellule de charge et la goupille

Le banc comporte deux arbres sur le même axe, que l'on nomme arbre arrière (à gauche sur la figure 3-13) et arbre avant (à droite sur la figure 3-13). La pièce montrée à la figure 3-16, que l'on nomme bras de levier, est insérée sur l'arbre arrière par le trou cannelé. Ce sont ces cannelures qui transmettent la rotation du bras de levier à l'arbre. Le trou à gauche sert à unir le bras de levier et la fourche à l'aide d'une goupille.

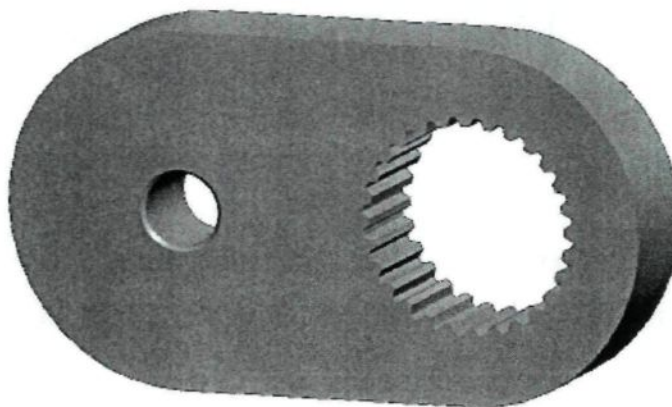


Figure 3-16 : Bras de levier positionné entre la goupille et l'arbre arrière

Lors d'un essai, une goupille est insérée à travers la fourche et le bras de levier et une charge est appliquée vers le bas. Le vérin se déplace de haut en bas et il ne peut se déplacer horizontalement. Au cours d'un essai complet, le vérin se déplace tout au plus de quelques

millimètres. Le déplacement de l'axe du trou de la goupille est approximativement vertical pour un déplacement du vérin de quelques millimètres. Afin de minimiser les déplacements horizontaux, l'axe du trou de la goupille est positionné plus haut que l'axe des cannelures, à un angle entre un et deux degrés, au début de chaque essai (figure 3-17). La distance entre l'axe de la goupille et l'axe des cannelures du bras de levier est de 63,5 mm. Par exemple, si l'angle du bras de levier est de $1,5^\circ$ au-dessus de l'horizontale au début de l'essai et de $1,5^\circ$ sous l'horizontale à la fin de l'essai, le déplacement vertical maximal est de 3,32 mm et le déplacement maximal horizontal est de 0,02 mm.

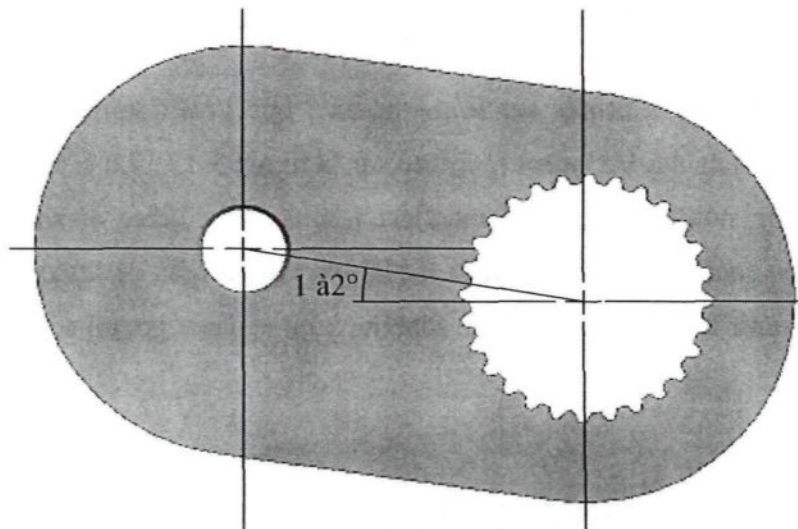


Figure 3-17 : Angle d'installation du bras de levier au début de chaque essai

L'arbre arrière est fixé au bras de levier à un bout et à une cellule de couple à l'autre bout. L'arbre avant est fixé à une roue dentée à un bout et à la cellule de couple à l'autre bout.

Le banc comporte un système de lubrification automatique qui injecte périodiquement de la graisse dans les roulements et la goupille pendant son fonctionnement. Cela permet de s'assurer d'une faible friction dans ces composants tout au long de chacun des essais.

3.6.2 Capteurs

Le banc d'essai mesure plusieurs données à l'aide de capteurs. Cette section présente chacun des capteurs employés.

Présentation générale

Le banc contient divers capteurs :

- 2 capteurs de force
- 1 capteur de couple
- 1 capteur de déformation entre le bras de levier et le bâti du banc
- 1 capteur de déplacement sur le vérin hydraulique
- 2 jauges de déformation ou 2 jauges de propagation de fissures

Capteurs de force

Une cellule de force modèle 661.20E-02 de la compagnie MTS est fixée au bout du vérin. Sa lecture donne la force appliquée par le vérin et c'est selon cette force que le banc est contrôlé. Une cellule de charge modèle 3174-10K de la compagnie Lebow est fixée au piédestal. Sa lecture donne la force à laquelle la dent sous charge est soumise.

Capteur de couple entre les deux arbres

Une cellule de couple modèle 2111-10K de la compagnie Lebow est insérée entre les deux arbres du banc. Sa lecture donne le couple auquel sont soumis les arbres. S'il est supposé que la friction des deux roulements et des deux paliers lisse est négligeable et qu'il est supposé que les effets dynamiques sont négligeables, la lecture de couple est égale au couple auquel la roue dentée est soumise.

Capteur de déformation

Un capteur de déformation modèle 632.03E-20 de la compagnie MTS est utilisé entre la fourche et le bâti du banc (figure 3-18).

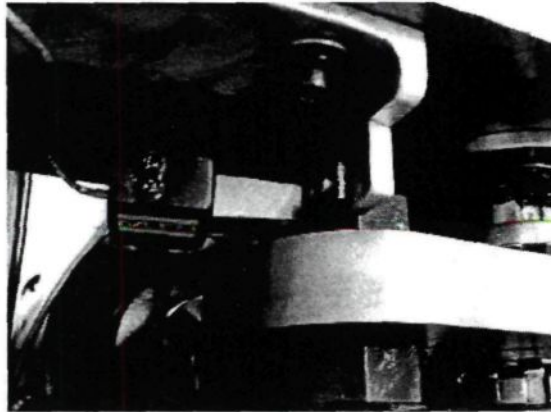


Figure 3-18 : Capteur de déformation

La lecture du capteur de déformation est proportionnelle au déplacement du vérin. Lorsque le vérin applique une charge en tirant vers le bas, les composants du banc (arbres, cellule de couple, roue dentée, etc.) se déforment élastiquement et le vérin se déplace quelque peu vers le bas. Le déplacement vers le bas du vérin varie approximativement proportionnellement en fonction de la charge appliquée. Lorsque la charge oscille selon une forme sinusoïdale et que la charge est à ses valeurs minimales et maximales, les lectures du capteur de déformation sont respectivement minimales et maximales. Les valeurs minimales et maximales se maintiennent relativement constantes tant que la dent sous charge de la roue dentée n'est pas fissurée. Une fois la dent fissurée, la fissure s'ouvre pendant que la charge est appliquée. Plus la fissure est longue et plus l'écartement des deux surfaces de la fissure augmente lors de l'application d'une charge. L'ouverture de la fissure cause une augmentation de l'angle de rotation de la roue dentée lors de l'application de la charge maximale d'un essai. Cela se traduit par une augmentation du déplacement maximal du vérin et à un changement de la lecture maximale du capteur de déformation.

Capteur de déplacement

Il y a un capteur de déplacement sur le vérin. Il détecte les mêmes mouvements que le capteur de déformation.

Jauges de déformation ou de propagation de fissures

Le banc a la capacité d'enregistrer les signaux de deux jauges de déformation ou deux jauges de propagation de fissures. Une jauge de déformation mesure des déformations. Il est possible de calculer les contraintes de surface en fonction des déformations mesurées. Une utilisation typique appliquée aux engrenages consiste à coller une ou deux jauges en pied de dent. Il est alors possible de mesurer quelle est la contrainte en fonction de la charge appliquée par le banc d'essai. La contrainte en pied de dent est proportionnelle à la charge appliquée. Aucune jauge de déformation n'a été utilisée au cours des essais. Cela n'était pas nécessaire pour répondre à l'objectif de comparaison des recettes, car les recettes peuvent être comparées les unes aux autres en fonction de la charge appliquée.

Une jauge de propagation de fissure est un capteur contenant plusieurs fils parallèles les uns aux autres. On colle une telle jauge dans une zone sans fissure en positionnant les fils perpendiculaires au chemin de propagation de fissure prévu. Au fur et à mesure que la fissure se propage, les fils sont coupés un à un. Cela change la résistance de la jauge. Ce changement de résistance peut être mesuré. Le circuit de la figure 3-19 montre le circuit de lecture de jauges.

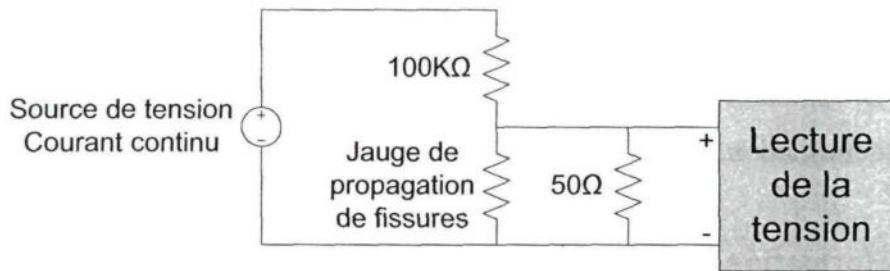


Figure 3-19 : Circuit de lecture de jauge de propagation de fissure typique

En tout, neuf jauges TK-09-CPB02-005/DP de la compagnie ont été utilisées. Le but n'était pas d'en utiliser sur toutes les dents ou toutes les recettes, mais d'évaluer l'utilité de les utiliser dans des essais futurs. Les mesures de propagation de fissures ont été comparées à celles du capteur de déformation d'évaluer quelle était la méthode permettant la détection de fissure le plus tôt. La figure 3-20 montre une vue rapprochée d'une jauge collée sur une dent et d'une fissure se propageant.

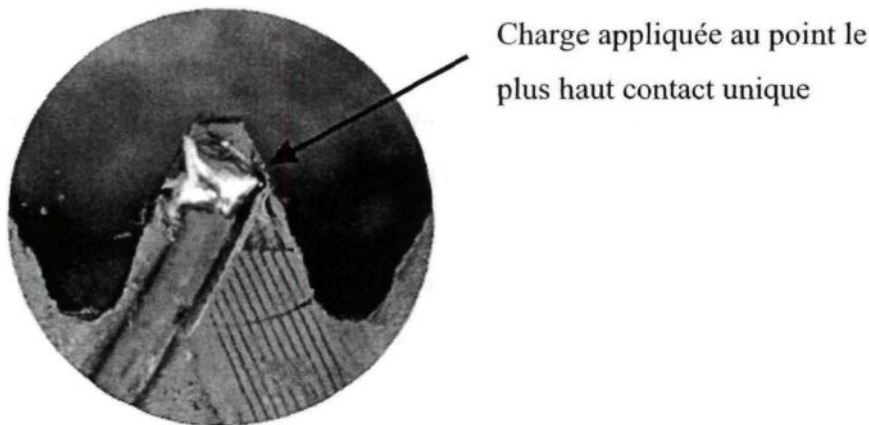


Figure 3-20 : Jauge de propagation de fissure collée sur une dent

3.6.3 Position d'application de la charge sur la dent

La position d'application de la charge sur une dent est fonction de la distance verticale entre l'axe de la roue dentée et la surface supérieure du bloc d'acier (figure 3-21).

En gardant constante cette distance, la position d'application de la charge est la même pour tous les essais.

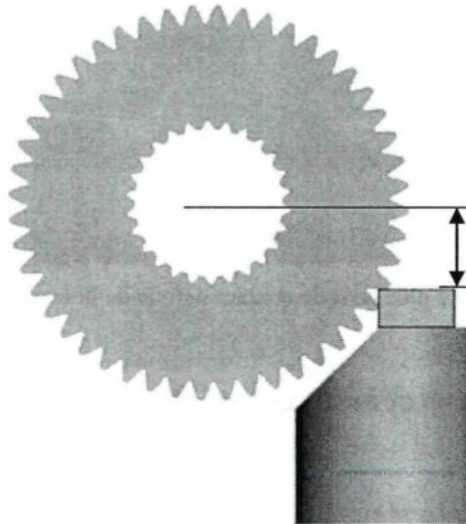


Figure 3-21 : Distance verticale entre l'axe de la roue dentée et la surface supérieure du bloc d'acier

Comme mentionné au début de la section 3.6.1, le contact entre la dent et le bloc se fait au niveau du point le plus haut de contact unique (figure 3-22). La distance verticale entre l'axe de la roue dentée et la surface supérieure du bloc d'acier requise pour situer le point d'application de la charge au point le plus haut de contact unique a été calculée lors de la conception du banc d'essai. Afin de conserver cette distance constante, les blocs d'acier utilisés subissent une étape de rectification lors de leur fabrication. L'incertitude sur l'épaisseur des blocs est de $\pm 0,01$ mm.

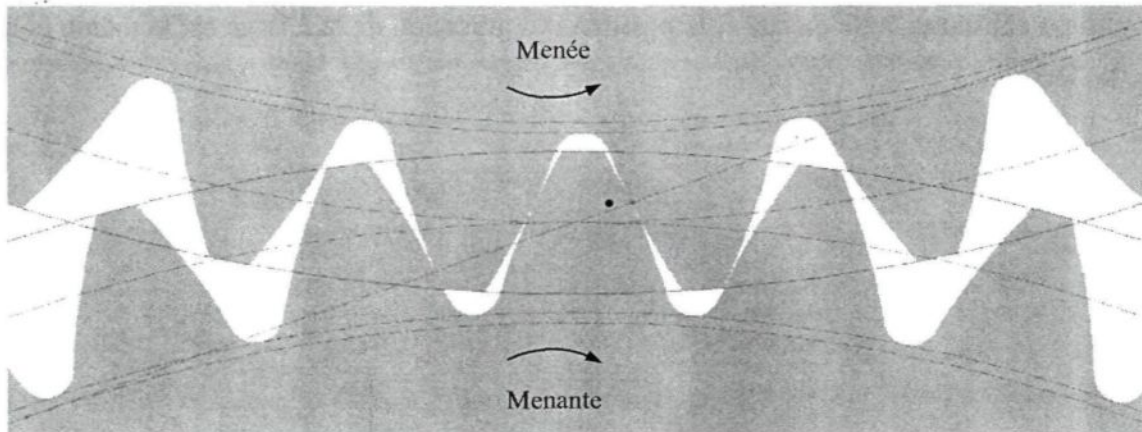


Figure 3-22 : Point le plus haut de contact unique de la roue dentée inférieure

3.6.4 Détection des fissures et arrêt automatique

La durée de vie en flexion simple d'une dent d'une roue dentée peut être séparée en trois phases : l'amorçage, la propagation et la rupture brutale. La durée de la phase d'amorçage est mesurée comme étant le nombre de cycles requis pour qu'une fissure apparaisse. La durée de la phase de propagation est mesurée comme étant le nombre de cycles pendant lesquels la fissure se propage, entre les phases d'amorçage et de rupture brutale. La vitesse de propagation de la fissure de la phase de propagation peut varier. La rupture brutale est définie comme étant le dernier cycle qui cause l'arrachement de la dent du corps de l'engrenage. Cette dernière phase survient lorsque la section non fissurée restante n'est plus en mesure de supporter la charge maximale appliquée.

Dans le domaine aérospatial, une roue dentée est jugée défectueuse dès qu'une fissure existe sur celle-ci. Selon cet énoncé, la durée de vie est le nombre de cycles de chargement atteint lorsqu'une première fissure s'amorce. Il serait intéressant de réaliser des essais de résistance à la flexion en pied de dent en utilisant cette définition de la durée de vie. Cependant, il est techniquement difficile de détecter une fissure si tôt. La méthode de détection de fissure employée sur le banc d'essai permet de détecter une fissure lorsqu'elle est dans la phase de propagation et que sa longueur est d'environ la moitié de la largeur de

la dent. Dans ce cas, la durée de vie est définie comme étant l'addition du nombre de cycles d'initiation et du nombre de cycles de propagation jusqu'à une certaine longueur de fissure. C'est cette définition de la durée de vie qui est employée dans ce mémoire lors de la présentation des résultats.

Le fonctionnement du capteur de déformation est présenté à la section 3.6.2. La lecture maximale du capteur de déformation est à un certain niveau en début d'essai lorsqu'il n'y a pas de fissure. La lecture maximale augmente lorsqu'une fissure en pied de dent se propage. L'essai est arrêté lorsque la lecture maximale augmente d'une quantité choisie δ (équation 3-2).

Équation 3-2 : Limite de déformation maximale

$$\text{Limite de déformation maximale} = \text{déformation maximale en début d'essai} + \delta$$

La valeur de δ est la même pour tous les essais, soit 0,005. Pour le même δ , les longueurs des fissures sont d'un même ordre de grandeur. La valeur de δ est choisie de façon à être suffisamment faible pour arrêter les essais avec des fissures plutôt courtes, mais suffisamment élevée afin de ne pas causer de fausses détections de fissures.

En tout, cinq conditions servent de critère d'arrêt pour décider de mettre fin à un essai en flexion simple :

- A. Limite supérieure du capteur de déformation
- B. Limite supérieure de la force sur la dent
- C. Limite inférieure de la force du vérin
- D. Limite supérieure du déplacement du vérin
- E. Atteinte de 10 millions de cycles

Dans la majorité des cas, c'est la condition A qui arrête un essai. La condition E survient seulement si aucune fissure ne se propage. Les limites B, C et D servent de protection pour arrêter le banc dans le cas où la condition A ne survenait pas.

3.7 Inspection par particules magnétiques

Après l'arrêt de chaque essai par un des critères d'arrêt, la dent soumise à l'essai en flexion simple est soumise à une inspection par particules magnétiques sur la face avant de la roue dentée. Cela rend la fissure plus facilement perceptible à l'œil nu. Les fissures ainsi rendues observables sont photographiées. Les longueurs des fissures sont mesurées sur les photos en approximant la forme de la fissure par un arc de cercle dans le logiciel Image-Pro Plus.

Une inspection par particules magnétiques est une méthode non destructive de détection de discontinuités, telles que des fissures, dans des matériaux ferromagnétiques. Un des produits retrouvé sur le marché est vendu sous forme d'aérosol et contient des particules ferromagnétiques en suspension dans un médium liquide huileux. Les particules ferromagnétiques peuvent être de différentes tailles, selon la dimension des fissures à détecter, et elles peuvent être colorées ou phosphorescentes sous illumination ultra-violette. Le mode d'emploi consiste à induire un champ magnétique dans la pièce perpendiculairement à la discontinuité à détecter et à vaporiser le produit en aérosol pendant l'application du champ magnétique. Il s'ensuit que les particules en suspension sont attirées vers les zones où un flux de dispersion est présent. Une discontinuité dans le matériau ferromagnétique, telle qu'une fissure, génère un flux de dispersion et les particules ferromagnétiques se regroupent le long des fissures. Des fissures qui sont ordinairement difficiles à percevoir à l'œil nu deviennent facilement visibles.

Après la fin de chaque essai en flexion simple, des particules magnétiques Magnaglo 14AM et une lampe ultra-violette ZB-100F de la compagnie Magnaflux ont été employées

afin de rendre les fissures visibles à l'œil nu. Un générateur de champ magnétique DA-400 de la compagnie Parker research a été employé pour induire un champ magnétique dans la pièce pendant l'application des particules magnétiques. Des images de l'inspection par particules magnétiques sont présentées à la section 4.5. Les longueurs de fissures fournies à la section 4.3.3 ont été mesurées sur les images de l'inspection par particules magnétiques.

3.8 Essais en flexion simple

Les sous-sections qui suivent fournissent des informations sur divers aspects des essais en flexion simple. La section 3.8.1 explique pourquoi ce ne sont pas toutes les dents des roues qui sont soumises aux essais. La section 3.8.2 porte sur le nombre de cycles des essais et explique pourquoi il est souhaitable qu'ils ne soient ni trop faibles ou ni trop élevés. La section 3.8.3 présente quel est le diamètre auquel les charges sont appliquées sur les dents et les raisons du choix de ce diamètre. La section 3.8.4 explique ce qu'est un ratio de chargement, donne celui utilisé pour les essais et explique ce choix. Pour terminer, la section 3.8.5 discute des effets dynamiques.

3.8.1 Espacement des dents soumises aux essais

Les dents soumises aux essais sont séparées les unes des autres par au moins quatre autres dents afin de s'assurer qu'un essai n'influe pas sur le résultat d'un autre essai. Chaque roue dentée utilisée lors de la campagne d'essais a 48 dents, ce qui permet de soumettre aux essais au plus neuf dents par roue dentée. Il est préférable de ne pas réaliser des essais en flexion simple sur des dents voisines à celle testée, car il est possible que l'essai sur la première dent testée ait causé un endommagement à la deuxième dent et influence le résultat de l'essai en flexion simple.

3.8.2 Plage visée de nombre de cycles

La courbe de durée de vie typique d'un acier soumis à de nombreux essais en flexion simple comporte trois zones (Castillo et Fernández-Canteli, 2009) :

- faible nombre de cycles (1 à 10 000 cycles);
- haut nombre de cycles (10 000 à 10 millions de cycles);
- asymptotique (10 millions et plus)

La recherche est axée vers le domaine aérospatial. Pour cette raison, ce sont principalement les zones de haut nombre de cycles et la zone asymptotique qui sont les plus intéressantes à viser.

Des essais en flexion simple ne peuvent être utilisés pour dimensionner des engrenages utilisés en flexion rotative, car les résultats des deux types d'essais ne concordent pas (Mcpherson et Rao, 2008). Le dimensionnement d'engrenages rotatifs requiert de trouver la limite d'endurance sur des engrenages testés en rotation. Ça ne vaut donc pas la peine d'entreprendre des essais en flexion simple de très longue durée très coûteux en temps puisque les résultats ne pourront pas être utilisés pour du dimensionnement de pièces. C'est pour cela que le domaine de recherche asymptotique est généralement réservé à la flexion rotative. La recherche en flexion simple est généralement réalisée dans la zone de haut nombre de cycles en limitant entre un et dix millions le nombre maximal de cycles (voir annexe II). C'est pourquoi les charges des essais ont été choisies de façon à obtenir un nombre de cycles entre dix mille et dix millions pour chaque essai. Les essais sont arrêtés lorsque le critère d'arrêt du capteur de déformation est atteint.

3.8.3 Position d'application de la charge sur la dent

Lors de la réalisation des essais de ce projet, la charge était positionnée au point le plus haut de contact unique (figure 3-22). C'est également le choix que font de nombreux

chercheurs qui réalisent des essais en flexion simple (voir annexe II). Ce choix est expliqué ci-dessous.

Lorsqu'un engrenage est soumis à un essai en flexion rotative, les roues dentées tournent et le point de contact entre les flancs des deux roues se déplace le long des flancs actifs. Lorsqu'une dent est soumise à un essai en flexion simple, le flanc de la dent est en contact avec le bloc d'acier du banc. La zone de contact ne se déplace pas et son positionnement doit être choisi.

Lors d'un essai en flexion rotative, la contrainte de flexion en pied de dent est maximale lorsque le contact se situe au point le plus haut de contact unique. Lorsque deux roues dentées de bonne qualité s'engrènent et tournent, le nombre de paires de dents en contact varie dans le temps. Pour un engrenage dont le rapport de conduite est situé entre 1 et 2, il y a une ou deux paires de dents en contact en tout temps. Le point le plus haut contact unique est la position la plus près de la tête où une seule paire de dents porte la charge. C'est lorsque la charge est appliquée à ce point que les contraintes sont maximales en pied de dent.

Lors d'essais en flexion simple, la charge est souvent positionnée au point le plus haut de contact unique, afin de reproduire le cas de chargement maximal d'un essai de flexion rotative.

Les équations requises pour calculer le diamètre du cercle au point le plus haut de contact unique sont données dans la norme ISO 6336 (Iso 6336-2:2006, 2008; Iso 6336-3:2006, 2008). Le point le plus haut contact unique des roues dentées utilisées pour l'expérimentation présentée dans ce mémoire se situe à un rayon de 51,41 mm (voir annexe I).

3.8.4 Ratio de chargement

Typiquement, lors d'essais mécaniques en fatigue, l'intensité de la charge appliquée est variée selon une forme sinusoïdale entre une intensité maximale et un faible pourcentage de cette intensité maximale. Le ratio de chargement (R) est la charge minimale divisée par la charge maximale (équation 3-3).

Équation 3-3 : Ratio de chargement (R)

$$R = \frac{\text{charge minimale}}{\text{charge maximale}}$$

Lorsqu'un engrenage est soumis à des essais de flexion rotative, la charge appliquée sur une dent est complètement retirée à chaque cycle de rotation de la roue dentée. Cette condition correspond à un ratio de chargement de zéro.

Lors d'essais en flexion simple, l'objectif est de se rapprocher des conditions d'utilisation d'engrenages soumis à des essais de flexion rotative. Cela correspond à un ratio de chargement de zéro. Lors d'essais en flexion simple, un ratio de chargement supérieur à zéro est typiquement utilisé afin de s'assurer que la dent mise à l'essai reste constamment en contact avec la surface qui applique la charge. Dans le cas où la dent ne reste pas en contact, cela peut occasionner des impacts. Ces impacts peuvent influencer la résistance à la flexion en pied de dent. Il est généralement souhaité d'effectuer des essais sans impacts, afin de pouvoir retirer les impacts des facteurs d'influence sur la résistance à la flexion en pied de dent.

Lors d'essais en flexion simple, un ratio de chargement de 0,1 est souvent utilisé tandis qu'un ratio de chargement de 0,05 est parfois utilisé (voir annexe II). La norme SAE J1619 recommande d'utiliser un ratio de 0,1 avec le banc d'essai en flexion simple qu'elle présente. Un ratio de chargement de 0,05 est utilisé au cours des essais du présent projet.

3.8.5 Effets dynamiques

Le banc d'essai utilisé est un système dynamique. Un système comprend des composantes interagissant entre elles. Des variables telles que la position, la vitesse et l'accélération sont utilisées pour décrire le comportement mécanique des composantes d'un système. Un système est dit dynamique lorsque les variables qui décrivent son comportement varient en fonction du temps.

L'application d'une charge sur une dent d'une roue dentée montée sur le banc d'essais se fait à l'aide du vérin hydraulique de la presse. La charge appliquée varie en fonction du temps. Un déplacement du vérin est observé lors de la variation de la charge appliquée. Le déplacement du vérin survient parce que diverses composantes du banc se déforment sous charge. Des éléments ayant une masse ont une inertie qui cause une résistance au changement de vitesse de déplacement. Cette résistance croît avec l'augmentation de la fréquence d'application de la charge. Puisque les composantes se déplaçant et se déformant ont une inertie, la fréquence d'application de la charge par le vérin influence le décalage temporel entre la charge appliquée par le vérin et la charge mesurée sur la dent. La fréquence d'application de la charge peut également avoir une influence sur la charge maximale observée sur la dent. Cela signifie qu'une variation de la fréquence d'application de la charge, en conservant la charge maximale appliquée par le vérin constante, peut être accompagnée d'une variation de la charge maximale observée sur la dent. La section 4.3.2 montre qu'une telle variation de la charge a été observée.

La fréquence d'application de la charge est la même pour tous les essais afin d'avoir les mêmes effets dynamiques pour toutes les recettes soumises aux essais. Il est ainsi non nécessaire d'inclure la fréquence dans les modèles utilisés pour analyser les données des essais.

3.9 Intervalle de confiance et répétition des essais

La première étape de l'analyse des résultats consiste à développer un modèle de la durée des essais en fonction de variables explicatives, telles que la recette et la charge. Les dents soumises aux essais sont des échantillons tirés d'une population. Plus le nombre d'échantillons est élevé et plus les valeurs estimées des variables explicatives se rapprochent des valeurs de la population. Un intervalle de confiance est un intervalle contenant la valeur d'une variable explicative avec un niveau de confiance $1-\alpha_s$. La variable α_s est appelée le seuil de signification statistique. Un intervalle de confiance peut également être calculé pour une variable fonction d'une ou plusieurs variables explicatives. Par exemple, un intervalle de confiance peut être calculé sur un percentile choisi de la distribution de Weibull. Un niveau de confiance $1-\alpha_s$ signifie que la probabilité que l'intervalle contienne la valeur de la population est de $1-\alpha_s$. Plus la valeur de α_s se rapproche de zéro et plus la probabilité que l'intervalle de confiance contienne la valeur de la population augmente et plus l'intervalle de confiance est large. Les valeurs de α_s le plus souvent utilisées sont 0,10, 0,05 et 0,01, ce qui correspond respectivement à des niveaux de confiance 90 %, 95 % et 99 % (Nelson, 2004). Une valeur de α_s de 0,05 est utilisée lors de l'analyse des résultats.

Pour une valeur de α_s choisie, la répétition des essais diminue la largeur des intervalles de confiance. Un essai est répété lorsque plus d'un essai est effectué sous les mêmes conditions expérimentales. Ainsi, effectuer plus d'un essai avec la même recette et la même charge constitue une répétition. Les ressources économiques et temporelles attribuées à la campagne d'essais sont limitées. Cela affecte le nombre de roues dentées traitées thermiquement par induction et le nombre d'essais en flexion simple réalisés. Puisque le nombre d'essais total est fixé, le choix du nombre de recettes affecte le nombre de répétitions. Puisqu'il s'agit d'une recherche exploratoire, il est intéressant d'étudier un grand nombre de recettes même si cela implique que les intervalles de confiance des

estimés seront larges. Il a été choisi de réaliser au moins quatre essais à chacune des charges pour chacune des recettes du présent projet de recherche.

Certains tests statistiques se servent des intervalles de confiance pour comparer des estimés entre eux. Ces tests statistiques permettent de détecter si une différence entre deux estimés est statistiquement significative ou non. Une différence entre deux estimés est dite statistiquement significative lorsque la chance n'est pas le seul facteur expliquant la différence. À l'opposé, une différence entre deux estimés est dite non statistiquement significative lorsqu'il est impossible de dire si la différence n'est pas tout simplement due au hasard. Le test du rapport des vraisemblances (voir annexe III.3) et les comparaisons multiples de Tukey (voir annexe III.4) sont deux tests employés, lors l'analyse des données au chapitre 5, qui comparent les intervalles confiance aux différences entre le nombre de cycles de chaque paire de recettes.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats de l'étude expérimentale de la résistance à la flexion en pied de dent d'engrenages cylindriques à denture droite traitée thermiquement par induction. La section 4.1 fournit des informations sur les paramètres des recettes développées. La description des essais en flexion simple réalisés est donnée à la section 4.2. Par la suite, la section 4.3 montre les résultats bruts des essais en flexion simple. La section 4.4 présente des mesures de microdureté pour chacune des recettes. Quant à la section 4.5, on y observe les résultats de l'inspection par particule magnétiques. Pour terminer, la section 4.6 porte sur la détection des fissures et l'arrêt automatique du banc.

4.1 Recettes développées

En tout, dix recettes ont été développées et des essais ont été réalisés sur chacune d'elles. Les recettes ont été développées de façon à obtenir au moins une recette pour chacune des quatre classes (A, B, C et D) présentées à la figure 3-2. Les recettes sélectionnées lors du développement pour la fabrication des roues à tester ont des profondeurs durcies au milieu du creux à mi-largeur de denture qui varient peu d'une recette à l'autre. Les mesures de ces profondeurs durcies sont présentées à la section 4.4.

Les quatre tableaux qui suivent présentent les paramètres de chauffe des recettes de classes A, B, C et D. La puissance donnée est mesurée à la sortie des générateurs. Il est à noter qu'il y a une certaine incertitude au niveau de la puissance fournie ou de la mesure de la puissance. Par exemple, les puissances en HF des recettes A2, A3, A4 et B1 étaient toutes ajustées à la même valeur, mais la valeur mesurée est quelque peu différente d'une recette à l'autre.

Tableau 4-1 : Paramètres des recettes de classe A

Engrenages	Étape du traitement	Moyenne fréquence		Haute fréquence		Temps
		Puissance	Fréquence	Puissance	Fréquence	
		kW	kHz	kW	kHz	
A1-1 A1-2	Préchauffe	16	10	-	-	4,5
	Pause	-	-	-	-	0,2
	Chauffe simultanée MF/HF	105	10	53	189	0,3
A2-1 A2-2	Préchauffe	16	10	-	-	4,5
	Pause	-	-	-	-	0,2
	Chauffe simultanée MF/HF	81	10	93	190	0,2
A3-1	Préchauffe	16	10	-	-	4,5
	Pause	-	-	-	-	0,2
	Chauffe simultanée MF/HF	110	10	92	190	0,2
A4-1	Préchauffe	16	10	-	-	4,5
	Pause	-	-	-	-	0,2
	Chauffe simultanée MF/HF	95	10	91	190	0,2

Tableau 4-2 : Paramètres des recettes de classe B

Roue dentée	Étape du traitement	Moyenne fréquence		Haute fréquence		Temps
		Puissance	Fréquence	Puissance	Fréquence	
		kW	kHz	kW	kHz	
B1-1	Préchauffe	16	10	-	-	4,5
	Pause	-	-	-	-	0,2
	Chauffe simultanée MF/HF	100	10	93	190	0,2
B2-1	Préchauffe	16	10	-	-	4,5
	Pause	-	-	-	-	0,2
	Chauffe MF	104	10	-	-	0,5
	Pause ¹	-	-	-	-	0,2
	Chauffe HF	-	-	36	192	0,5

Tableau 4-3 : Paramètres des recettes de classe C

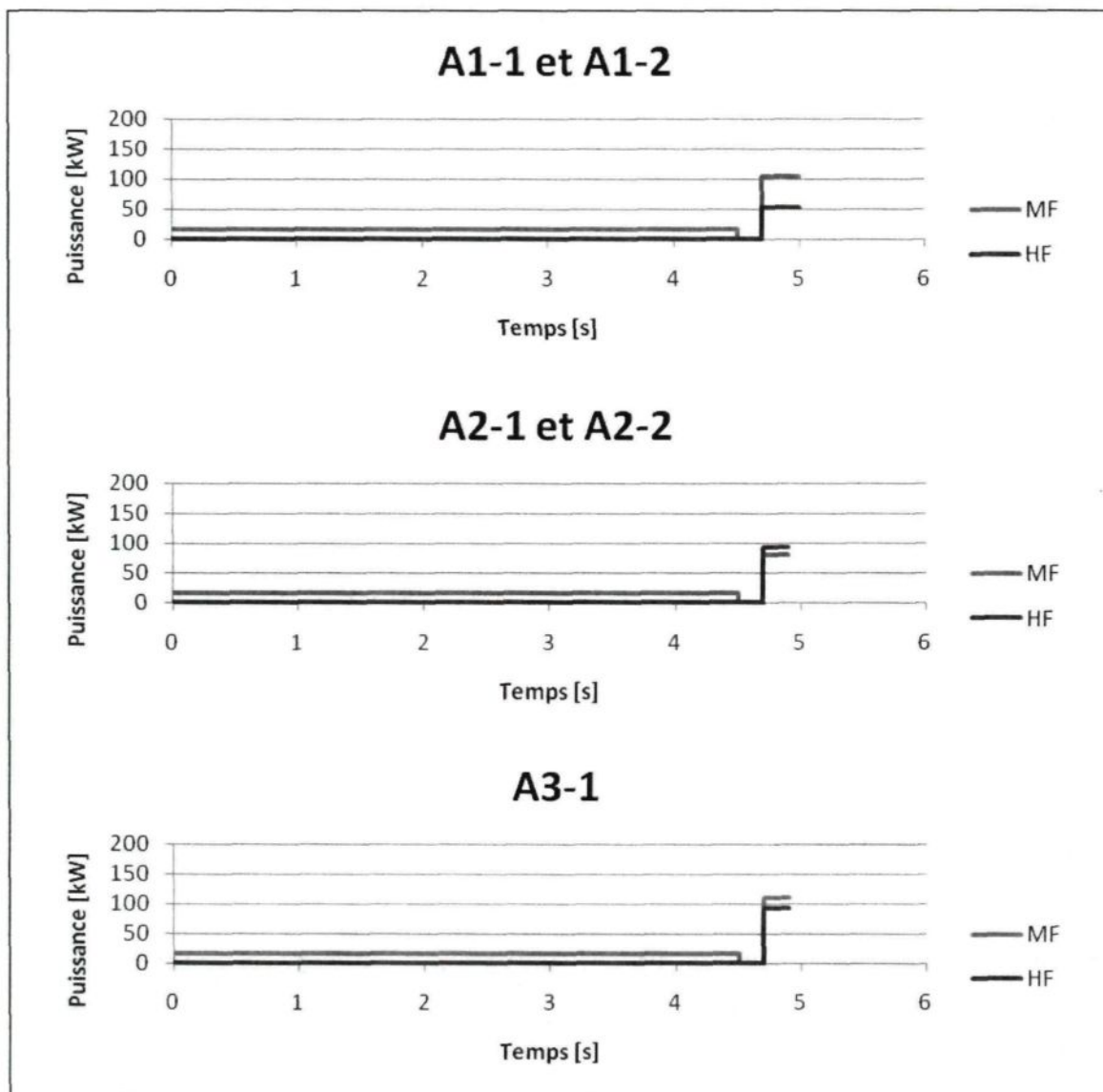
Roue dentée	Étape du traitement	Moyenne fréquence		Haute fréquence		Temps
		Puissance	Fréquence	Puissance	Fréquence	
		kW	kHz	kW	kHz	
C1-1	Préchauffe	26	10	-	-	1,3
	Pause	-	-	-	-	0,2
	Chauffe MF	192	10	-	-	0,3
	Pause ¹	-	-	-	-	0,2
	Chauffe HF	-	-	66	193	0,3

Tableau 4-4 : Paramètres des recettes de classe D

Roue dentée	Étape du traitement	Moyenne fréquence		Haute fréquence		Temps
		Puissance	Fréquence	Puissance	Fréquence	
		kW	kHz	kW	kHz	
D1-1	Chauffe HF	-	-	45	191	2,0
	Commentaire : HF seulement					
D2-1	Préchauffe	16	10	-	-	4,5
	Pause	-	-	-	-	0,2
	Chauffe HF	-	-	98	192	0,5

¹ Il a été choisi d'utiliser une pause entre les chauffés MF et HF lors de la conception des recettes.

Les quatre figures qui suivent présentent les puissances et les temps de chauffe des quatre tableaux ci-dessus sous forme graphique.



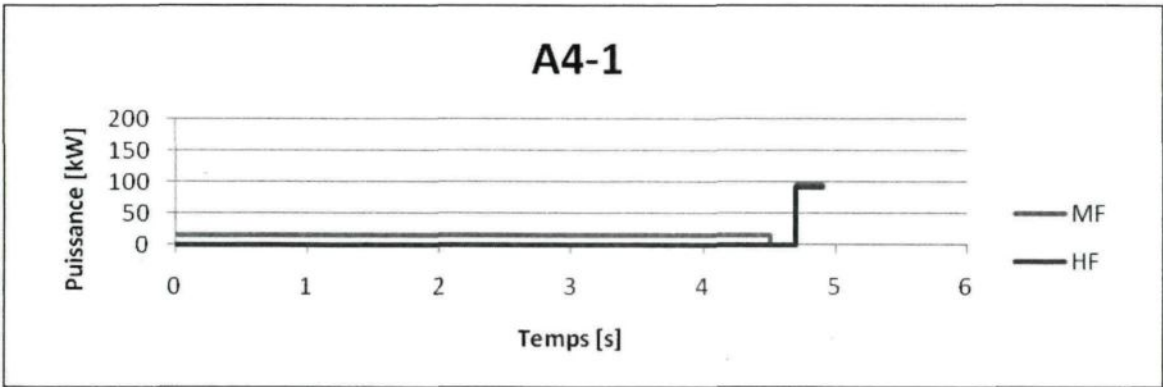


Figure 4-1 : Puissances de chauffe des recettes de classe A

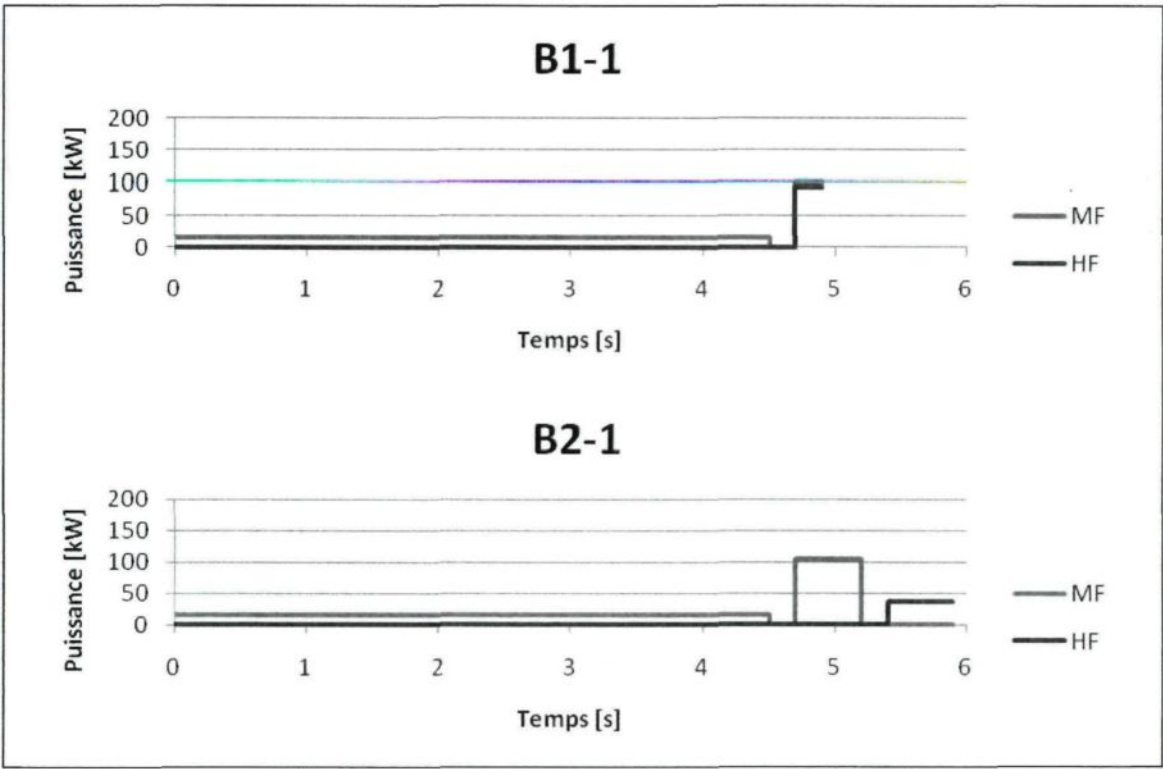


Figure 4-2 : Puissances de chauffe des recettes de classe B

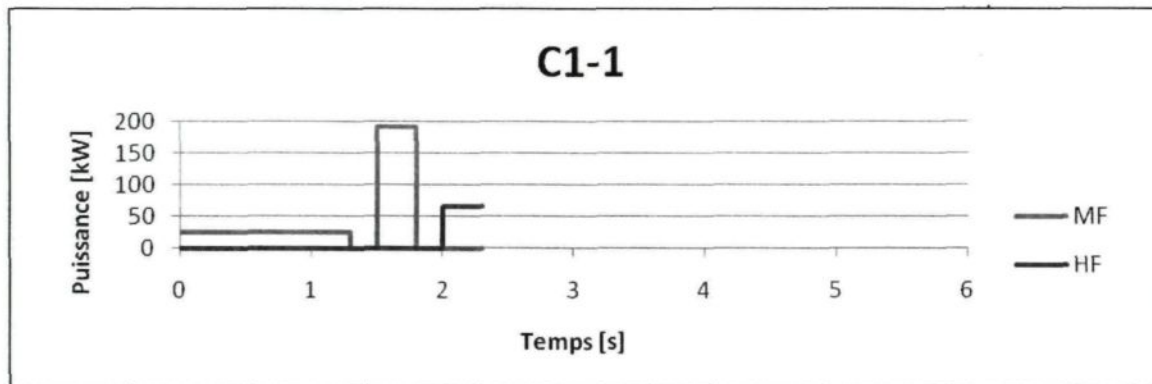


Figure 4-3 : Puissances de chauffe des recettes de classe C

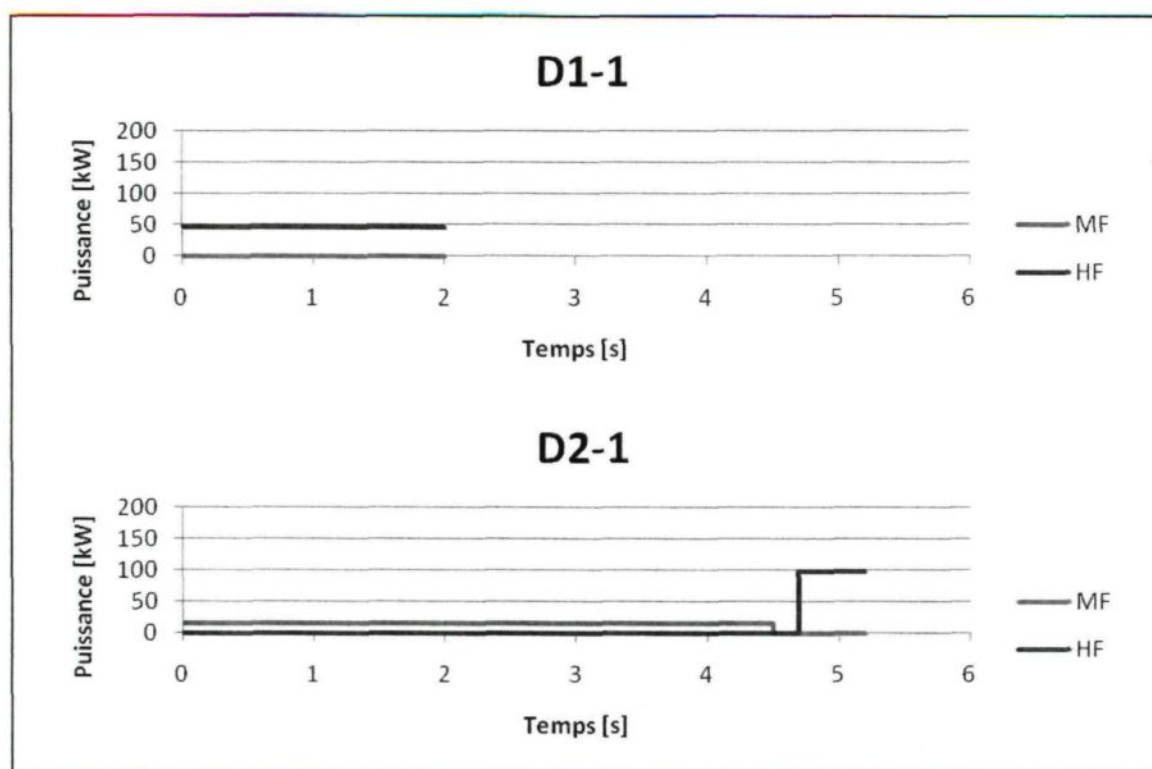
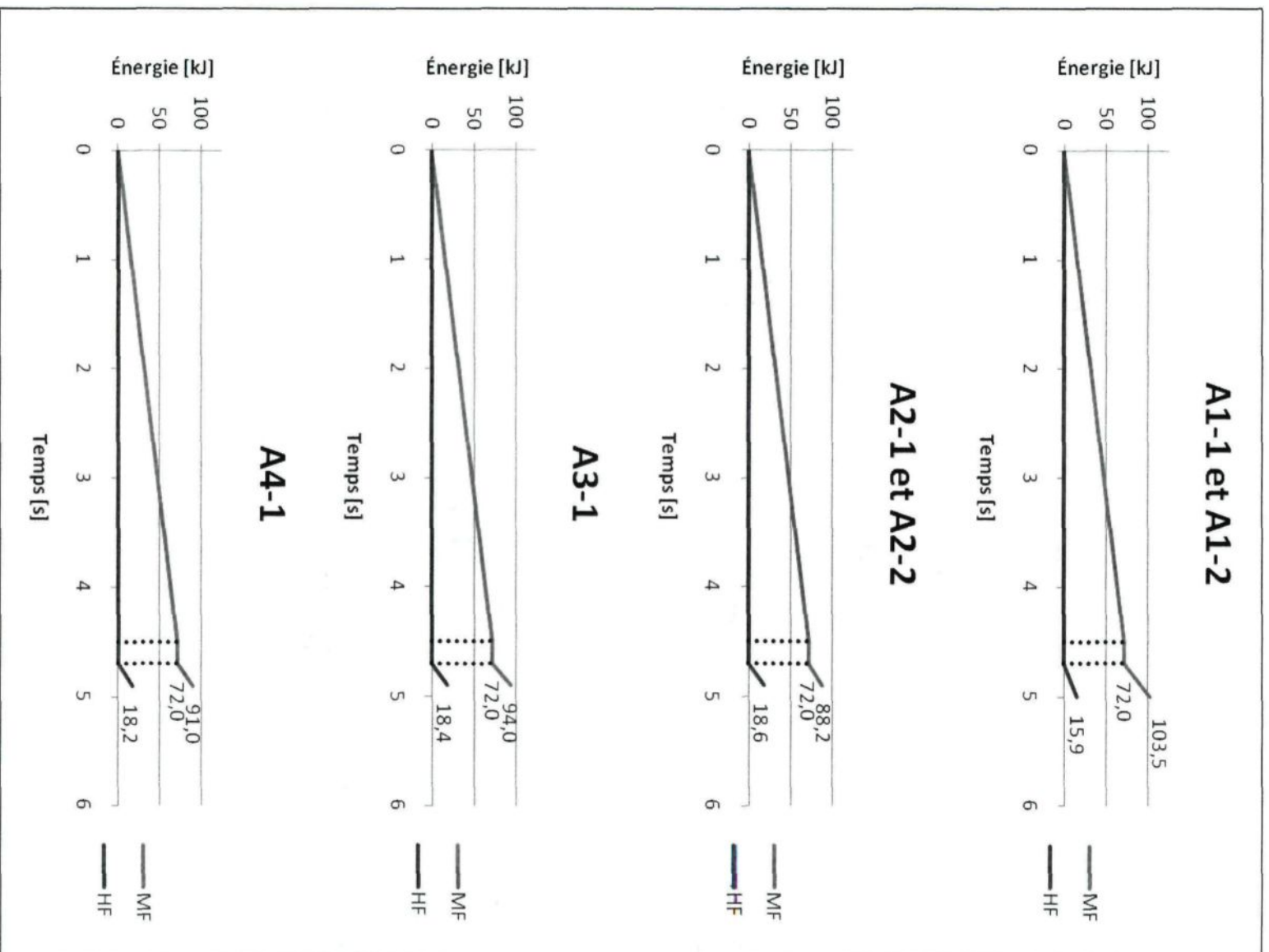


Figure 4-4 : Puissances de chauffe des recettes de classe D

La quantité d'énergie fournie, calculée à partir des puissances et temps de chauffe, est présentée sur les quatre figures qui suivent.



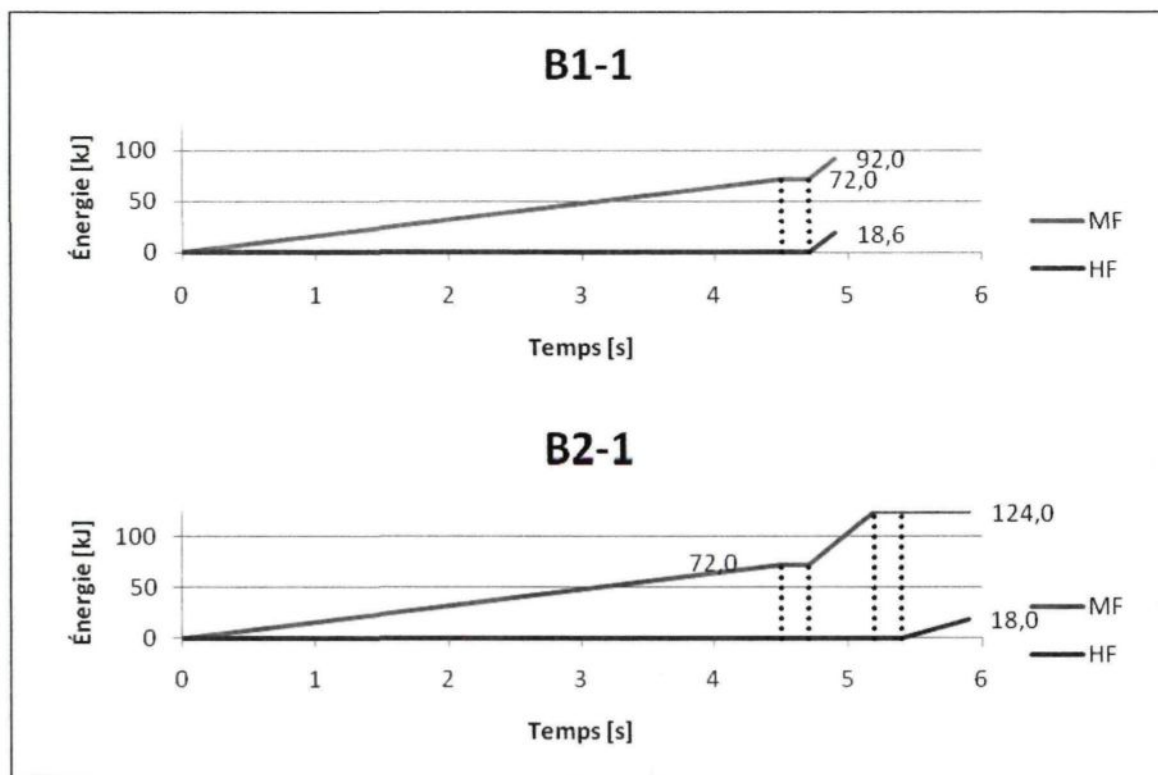


Figure 4-6 : Énergie fournie aux recettes de classe B

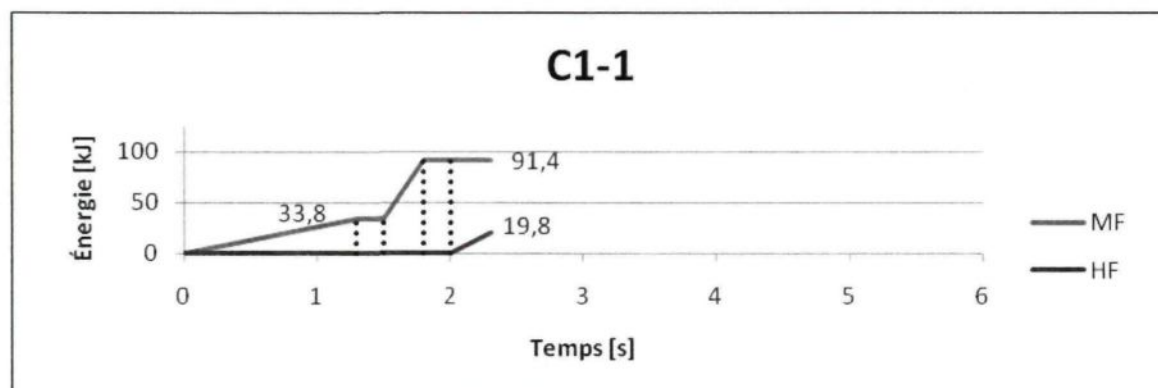


Figure 4-7 : Énergie fournie aux recettes de classe C

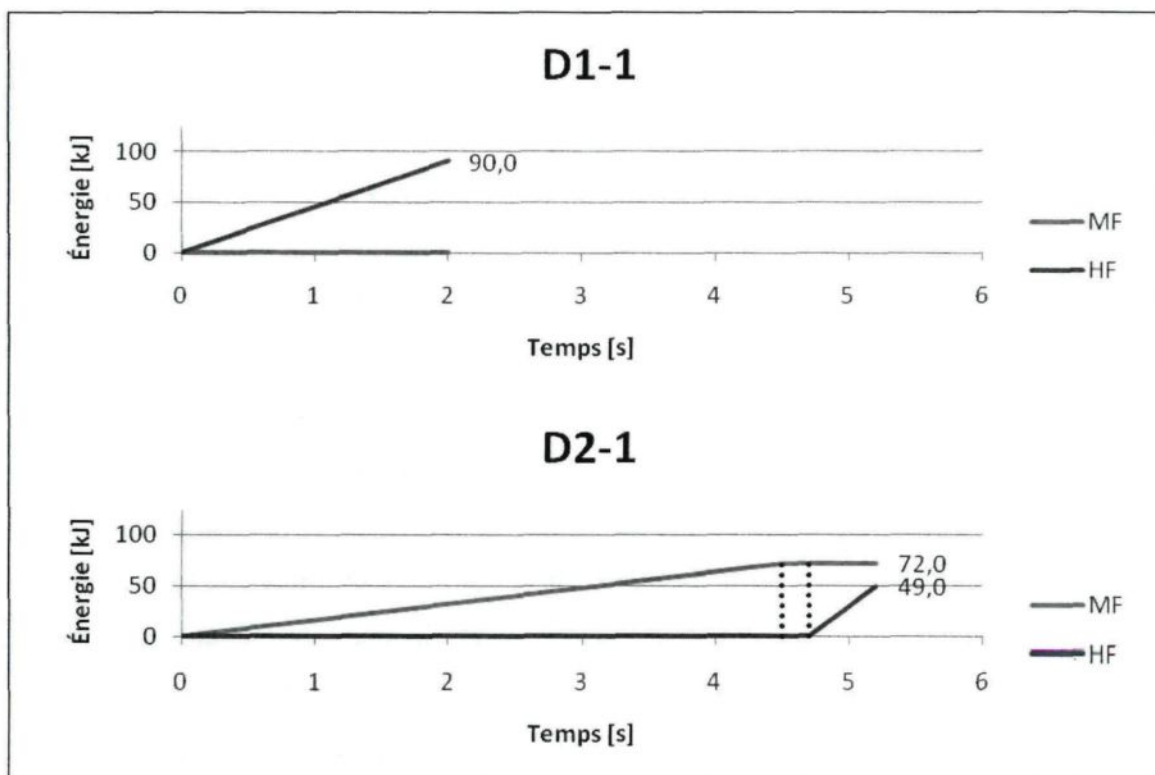


Figure 4-8 : Énergie fournie aux recettes de classe D

L'énergie totale fournie en MF et en HF est donnée au tableau 4-5.

Tableau 4-5 : Énergie totale fournie en moyenne fréquence et en haute fréquence

Roue dentée	Énergie totale fournie, kJ	
	Moyenne fréquence	Haute fréquence
A1-1 et A1-2	103,5	15,9
A2-1 et A2-2	88,2	18,6
A3-1	94,0	18,4
A4-1	91,0	18,2
B1-1	92,0	18,6
B2-1	124,0	18,0
C1-1	91,4	19,8
D1-1	90,0	0,0
D2-1	72,0	49,0

Classe A

Les recettes de classe A utilisent les mêmes paramètres de préchauffe. Leurs chauffes finales utilisent une puissance en MF et une puissance en HF en simultané. Les recettes A2, A3 et A4 utilisent le même réglage de puissance en HF pendant la chauffe finale. Ce qui les distingue, c'est un réglage différent de la puissance en MF pendant la chauffe finale. La recette A1 utilise à la fois une puissance en MF et une puissance en HF différentes des trois autres recettes A et un temps de chauffe plus long pendant la chauffe finale. Il ressort de l'observation des figures et des tableaux des recettes de classe A, qu'une chauffe finale, avec des puissances en MF et en HF en simultané, de courte durée suivie d'une douche de refroidissement mène à l'obtention d'une faible profondeur à la tête. Selon les figures d'énergie fournie, la recette pour laquelle l'énergie totale fournie en HF pendant la chauffe finale est la plus faible est la recette A1. Cela contribue à faire de cette recette celle ayant la plus faible profondeur durcie à la tête. Les mesures de profondeur durcie confirment que c'est effectivement le cas (tableau 4-18).

Classe B

Les recettes de classe B mènent à l'obtention d'un profil de dureté plus profond en tête de dent que les recettes de classe A. Les paramètres de préchauffe sont les mêmes que ceux des recettes de classe A. La chauffe finale de la recette B1 utilise des puissances en MF et en HF générées en simultané tandis que celle de la recette B2 utilise des puissances en MF et en HF générées séquentiellement en commençant par la puissance en MF et en terminant par la puissance en HF. Lors de la chauffe en séquentiel, la puissance en HF est générée en dernier afin de minimiser la durée de temps entre la chauffe en HF et la mise sous douche de refroidissement. Cela a théoriquement pour effet de minimiser la quantité de diffusion de chaleur vers le cœur et ainsi diminuer la profondeur durcie à la tête.

Classe C

La recette C1 utilise une préchauffe à plus haute puissance, mais de moins longue durée que les recettes de classe A et B. La chauffe finale de la recette C1 se fait en séquentiel en commençant par la chauffe en MF et en terminant par la chauffe en HF. La puissance en MF de la chauffe finale de la recette C1 est la plus élevée de toutes les recettes et le temps de chauffe est le même que celui de la recette B1. La chauffe finale en HF ressemble quelque peu à celle de la recette A1 avec temps de chauffe identique et une puissance de chauffe légèrement supérieure pour la recette C1. Au niveau de l'énergie totale fournie pendant la chauffe en HF, celle fournie à la recette C1 est d'un même ordre de grandeur que celle des recettes de classe A et B. Lors de la chauffe finale, la recette C1 utilise une chauffe en MF pendant une durée aussi longue que la chauffe en MF de la recette A1. La chauffe finale en HF est réalisée par la suite à une puissance un peu plus haute que pour la recette A1 et un temps de chauffe égal à celui de la recette A1.

Classe D

Les paramètres de chauffe de la recette D1 sont différents de ceux de toutes les autres recettes. Cette recette n'emploie pas de préchauffe et pas de MF. La chauffe est réalisée en HF à basse puissance sur un temps relativement long. La grande quantité d'énergie fournie et le long temps de chauffe contribuent à dissiper une grande quantité d'énergie vers le cœur. Le résultat est une profondeur durcie élevée à la fois en tête et en pied de dent.

La recette D2 utilise la même préchauffe que les recettes A1, A2, A3, A4, B1 et B2. Contrairement à ces dernières recettes mentionnées, la recette D2 utilise uniquement une puissance en HF lors de la chauffe finale. Les figures d'énergie fournie montrent que la quantité d'énergie totale fournie en HF pour la recette D2 est plus élevée que pour les recettes de classe A et B. Il est donc logique que la profondeur durcie de la recette D2 soit plus élevée que les recettes de classe A et B. Dans ce cas-ci, une chauffe finale en HF a mené à une profondeur durcie élevée. Il est en théorie possible de développer une recette de

classe A, B ou C en ayant recours à une chauffe finale utilisant uniquement une puissance en HF. Cette hypothèse n'a pas été vérifiée. Il serait intéressant de développer une recette similaire à D2 en diminuant la puissance en HF.

4.2 Description des essais en flexion simple réalisés

Comme le banc était contrôlé en force selon la force appliquée par le vérin de la presse servohydraulique, c'est cette force qui est utilisée pour présenter les résultats des essais. Pour chaque essai, une charge maximale est choisie. Comme mentionné précédemment, pendant un essai, la charge appliquée par le vérin varie entre cinq pour cent de la charge maximale et la charge maximale. Pour le reste du chapitre, seule la charge maximale appliquée par le vérin sera mentionnée.

La majorité des essais ont été réalisés à 5,4 kN et 6,4 kN. Le premier essai de la recette A1 a duré dix millions de cycles et a été arrêté à ce moment sans défaillance. Comme expliqué à la section 3.8.2, les charges des essais ont été choisies de façon à obtenir un nombre de cycles entre dix mille et dix millions. Pour cette raison, les essais subséquents de la recette A1 prévus pour être réalisés à 6,4 kN ont été réalisés à 5,8 kN, une charge intermédiaire entre 5,4 et 6,4 kN. L'essai ayant duré dix millions de cycles est retiré de l'analyse des données parce qu'il ne se trouve pas à l'intérieur de la zone de haut nombre de cycles.

Les tableaux 4-6 à 4-8 présentent le nombre d'essais de flexion simple complétés pour chaque roue dentée et chaque recette, ainsi que le nombre de jauges de propagation de fissure utilisées.

Tableau 4-6 : Récapitulatif des essais complétés à 5,4 kN

Roue dentée	Nombre de dents testées par roue dentée	Nombre de dents par recette	Nombre de jauges de propagation de fissure par roue dentée
A1-2	1	1	0
A2-1	4	8	0
A2-2	4		0
A3-1	4	4	0
A4-1	4	4	0
B1-1	5	5	0
B2-1	4	4	0
C1-1	5	5	1
D1-1	5	5	1
D2-1	5	5	1

Tableau 4-7 : Récapitulatif des essais complétés à 5,8 kN

Roue dentée	Nombre de dents testées par roue dentée	Nombre de dents par recette	Nombre de jauges de propagation de fissure par roue dentée
A1-2	4	4	0

Tableau 4-8 : Récapitulatif des essais complétés à 6,4 kN

Roue dentée	Nombre de dents testées par roue dentée	Nombre de dents par recette	Nombre de jauges de propagation de fissure par roue dentée
A1-1	5	9	1
A1-2	4		0
A2-1	4	9	0
A2-2	5		2
A3-1	4	4	0
A4-1	4	4	0
B1-1	4	4	0
B2-1	4	4	0
C1-1	4	4	1
D1-1	4	4	1
D2-1	4	4	1

4.3 Données des essais en flexion simple

Les capteurs du banc ont été présentés à la section 3.6.2. La section 4.3.1 montre l'évolution des données acquises par les capteurs du banc au cours d'un des essais. La section 4.3.2 donne un résumé sous forme de tableaux des moyennes des données acquises minimales et maximales de la force du vérin, du couple et de la force sur la dent pour chaque essai. La section 4.3.3 présente, à l'aide de tableaux, le nombre de cycles et la longueur de la fissure à la fin de chaque essai, ainsi que le critère d'arrêt employé pour arrêter l'essai.

4.3.1 Signaux des capteurs d'un essai en flexion simple

Le système d'acquisition du banc d'essai a enregistré des valeurs minimales et maximales des signaux des capteurs d'un cycle de chargement à tous les 25 cycles de chargement. Les trois premières figures ci-dessous (4-9 à 4-11) présentent un exemple de données de force sur le vérin, couple sur l'arbre et force sur la dent pour un essai à 6,4 kN effectué sur la dent 11 de la roue dentée A1-1. Les deux figures suivantes (4-12 et 4-13) présentent les données provenant du capteur de déplacement et du capteur de déformation. Les figures 4-14 et 4-15 présentent les données de la jauge de propagation de fissure dès la rupture du premier fil, superposé aux données de déformation maximale et force maximale sur la dent.

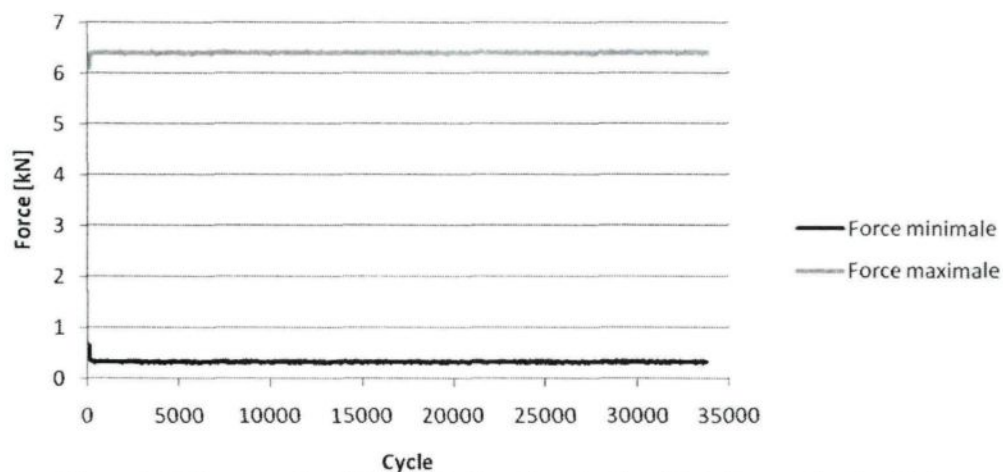


Figure 4-9 : Force sur le vérin lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1

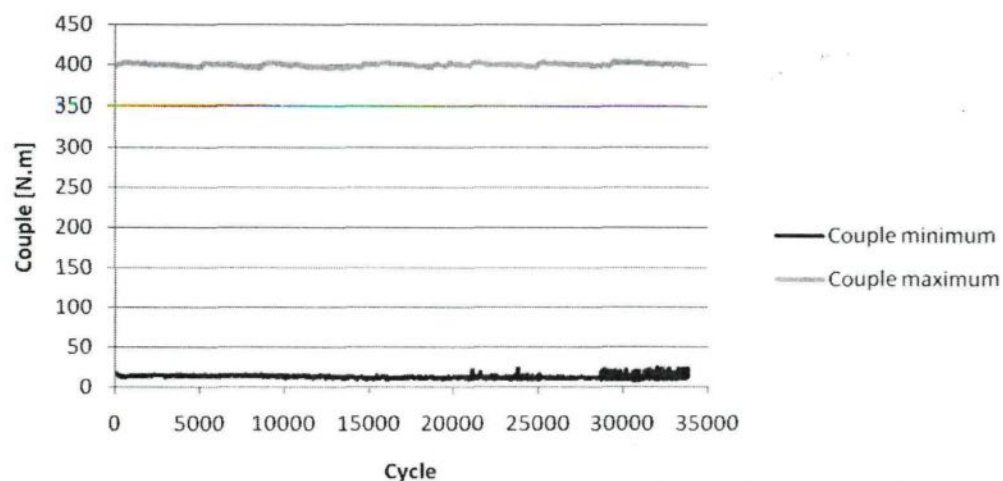


Figure 4-10 : Couple entre les arbres lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1

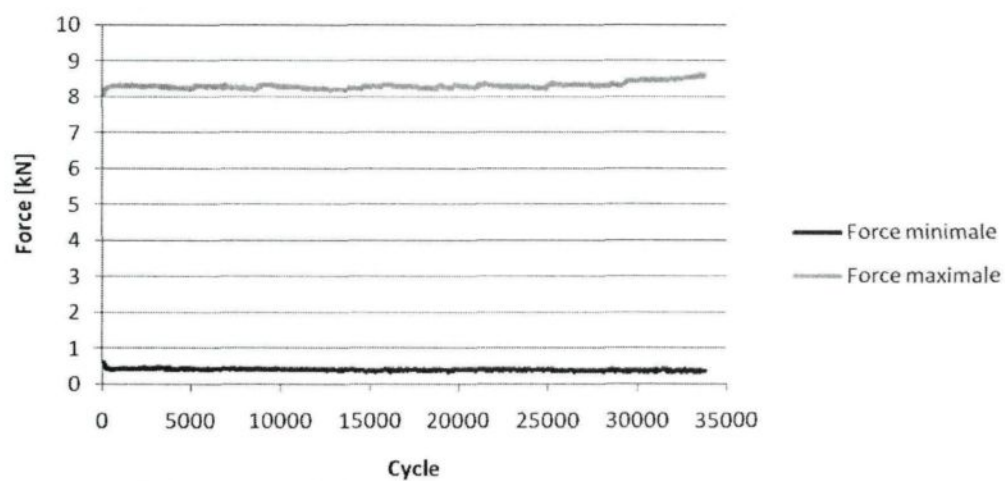


Figure 4-11 : Force sur la dent lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1

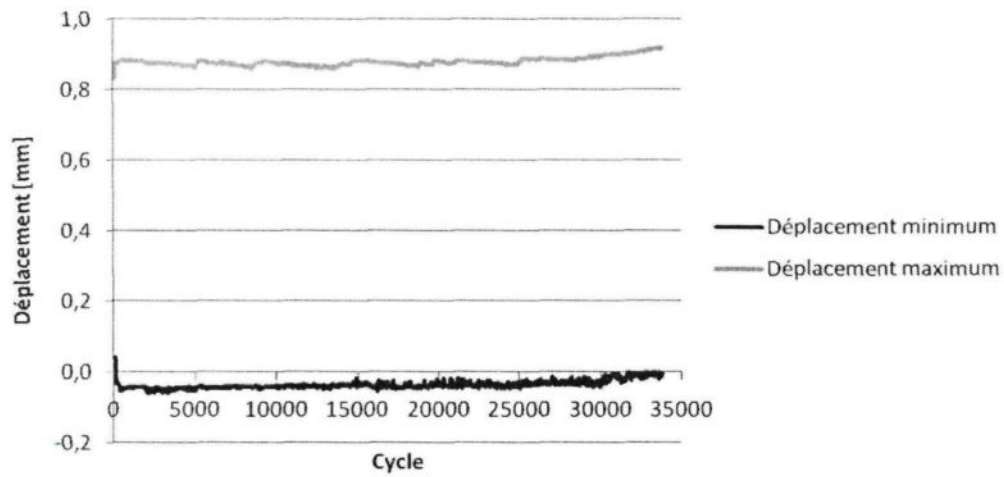


Figure 4-12 : Déplacement du vérin lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1

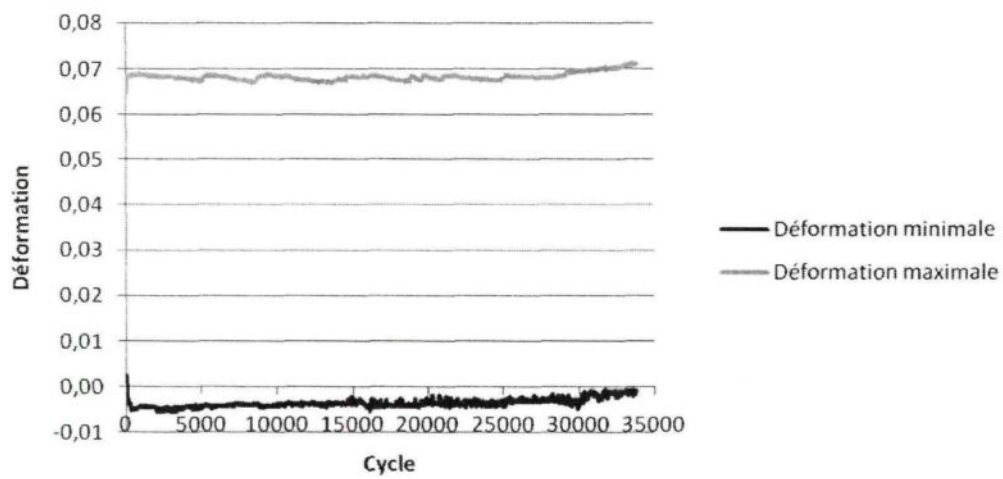


Figure 4-13 : Déformation lors de l'essai sur la dent 11 de la roue dentée A1-1

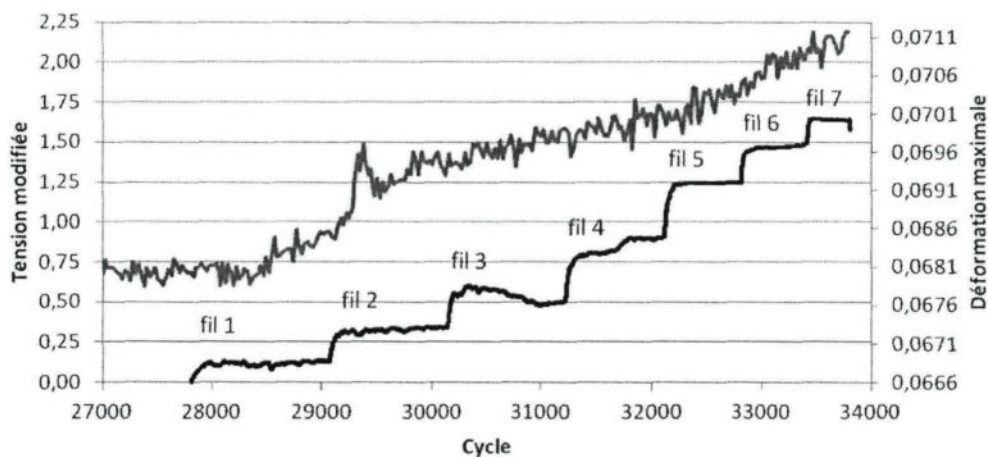


Figure 4-14 : Propagation de fissure (courbe inférieure) et déformation maximale (courbe supérieure)

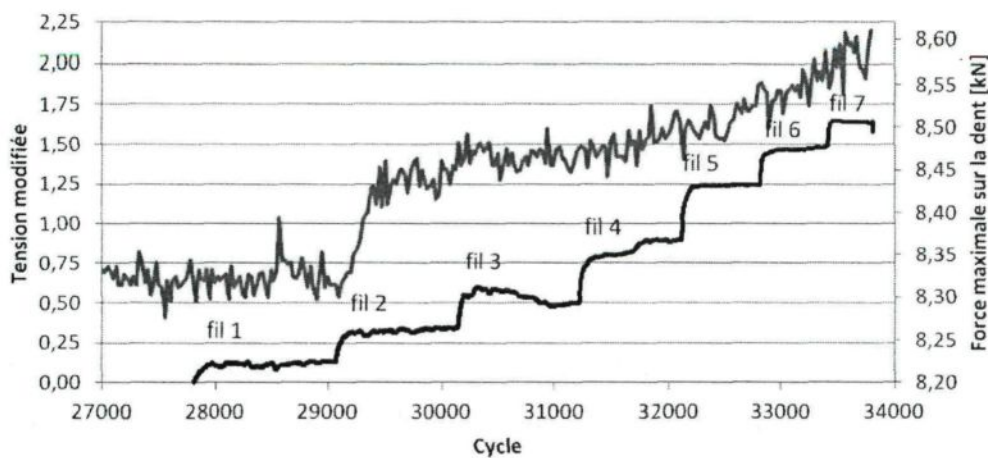


Figure 4-15 : Propagation de fissure (courbe inférieure) et force maximale sur la dent (courbe supérieure)

Le contrôle des forces minimales et maximales du vérin (figure 4-9) fonctionne adéquatement et les valeurs sont très près des valeurs cibles. Les couples minimaux et maximaux (figure 4-10) ainsi que les forces minimales et maximales sur la dent (figure 4-11) varient quelque peu. Il est supposé que ces variations sont causées par des effets dynamiques.

Une comparaison entre les mesures de jauge de propagation de fissure et de capteur de déformation (figure 4-14) détaillée est présentée à l'annexe V. Il en est conclu qu'une

jauge de propagation de fissure détecte une fissure plus tôt que le capteur de déformation et que la longueur de fissure minimale détectée avec une jauge de propagation de fissure dépend du positionnement de collage de la jauge.

Les figures 4-11 et 4-15 montrent que la force sur la dent augmente à la fin de l'essai. Cela survient lorsque la roue dentée se fissure en pied de dent. En effet, comme l'essai se déroule en contrôle de force sur le vérin de la presse servohydraulique et que la distance du bras de levier entre le point d'application de la charge et l'axe de l'arbre ne change pas, l'essai est exécuté à couple maximum constant (section 3.6.1). Lorsque la roue dentée se fissure en pied de dent et qu'une charge est appliquée, la fissure s'ouvre et le point de contact entre la dent et le bloc d'acier se déplace vers le pied de la dent. La force sur la dent augmente puisque le couple maximum reste le même et que la longueur du bras de levier entre la force sur la dent et l'axe de la roue dentée diminue. Donc, la force sur la dent augmente lorsqu'une fissure se propage en pied de dent.

Le capteur de déformation mesure les mêmes déplacements que le capteur de déplacement du vérin (section 3.6.1). La différence est au niveau de l'échelle de mesure. Le déplacement du vérin est mesuré en mm et le capteur de déformation donne une mesure de déformation. Ceci explique pourquoi les figures de déplacement et de déformation ont la même allure, mais pas la même échelle en ordonnée (figures 4-12 et 4-13). Les zéros des capteurs de mesures de déplacement et de déformation sont faits en début d'essai avec une charge de 0,5 kN appliquée par le vérin. Les lectures des capteurs de déplacement et de déformation augmentent à la fin de l'essai. Cela survient lorsque la fissure s'ouvre pendant l'application de la charge. Plus la fissure est longue et plus le déplacement du vérin vers le bas est élevé.

L'augmentation de la force maximale sur la dent, l'augmentation du déplacement maximal du vérin ou l'augmentation du déplacement maximal ne peuvent être utilisées

pour déterminer l'initiation d'une fissure, car l'augmentation de ces signaux ne devient apparente qu'à partir d'une certaine longueur de fissure.

La jauge de propagation de fissure utilisée comporte dix fils. La rupture de chaque fil cause une augmentation de tension. Les figures 4-14 et 4-15 présentent la mesure de tension multipliée par un facteur qui rend les augmentations de tension plus égales d'un fil à l'autre. La figure 4-16 montre la jauge collée sur la dent 11 de la roue dentée A1-2.

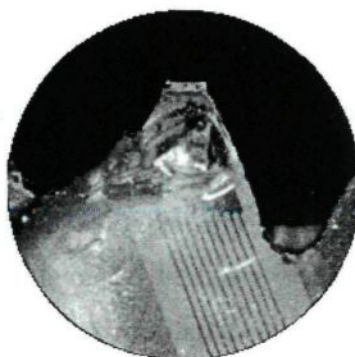


Figure 4-16 : Photo de la jauge collée sur la dent 11 de la roue dentée A1-2

Le tableau 4-9 présente les longueurs de fissures correspondant à chaque rupture de fil, ainsi que le nombre de cycles associé. La figure 4-17 présente les valeurs du tableau 4-9 sous forme graphique.

Tableau 4-9 : Longueur de la fissure à chaque rupture de fil

Nombre de fils sectionnés	1	2	3	4	5	6	7
Longueur de fissure, mm	0,544	0,805	1,065	1,324	1,577	1,827	2,083
Cycles	27 804	29 018	30 099	31 176	32 053	32 758	33 365

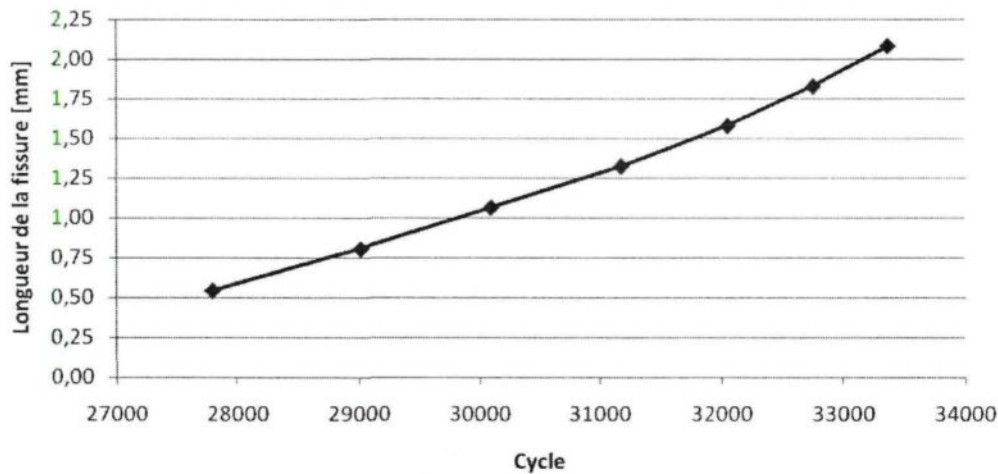


Figure 4-17 : Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles

Les résultats ci-dessus montrent que la jauge fonctionne adéquatement pour mesurer la propagation de la fissure. Les résultats détaillés des autres jauges de propagation ne sont pas présentés, car la démonstration de fonctionnement d'une seule jauge suffit. Une comparaison entre les mesures de propagation de fissure et les mesures de déformation est présentée à l'annexe V.

4.3.2 Moyennes des mesures aux 25 cycles

Les minimums et maximums des signaux sont acquis à tous les 25 cycles. Les trois tableaux ci-dessous présentent les moyennes de ces signaux pendant chaque essai. Les tableaux montrent que les amplitudes minimales et maximales moyennes de la force du vérin respectaient les valeurs cibles. Les moyennes du couple et de force sur la dent montrent que pour différents essais à la même charge, il y a une certaine variation des charges observées. Il est supposé que ces variations sont causées par des effets dynamiques.

4.3.3 Nombre de cycles, longueur des fissures et critère d'arrêt

Le nombre de cycles, les longueurs de fissures et les critères d'arrêt de chaque essai sont présentés dans les trois tableaux qui suivent. Les résultats sont analysés au chapitre 5. Les descriptions des cinq critères d'arrêt sont données à la section 3.6.4. La section 4.6 traite de l'analyse des longueurs des fissures à la fin des essais et des critères d'arrêt ayant mis fin aux essais.

Tableau 4-13 : Données de fin des essais sur les roues dentées A1-1, A1-2, A2-1, A2-2

Roue dentée	Dent	Force du vérin		Nombre de cycles	Longueur de la fissure	Critère d'arrêt
		Minimale	Maximale			
		kN	kN	cycle	mm	
A1-1	1	0,32	6,40	104 879	3,683	A
	11	0,32	6,40	33 813	2,235	A
	16	0,32	6,40	46 891	1,143	A
	21	0,32	6,40	62 836	2,489	A
	31	0,32	6,40	113 003	2,591	A
A1-2	16	0,27	5,40	10 000 000	aucune	E
	11	0,29	5,80	65 846	2,743	A
	21	0,29	5,80	73 013	1,524	A
	36	0,29	5,80	108 833	2,286	A
	41	0,29	5,80	215 090	3,556	A
	1	0,32	6,40	33 384	2,057	A
	6	0,32	6,40	49 091	2,108	A
	26	0,32	6,40	101 792	3,327	A
	31	0,32	6,40	84 999	2,261	A
A2-1	11	0,27	5,40	150 543	2,210	A
	21	0,27	5,40	134 031	2,134	A
	31	0,27	5,40	85 019	2,235	A
	36	0,27	5,40	101 396	2,464	A
	1	0,32	6,40	38 969	2,210	A
	6	0,32	6,40	56 511	2,261	A
	16	0,32	6,40	28 062	2,159	A
	26	0,32	6,40	34 080	2,134	A
A2-2	6	0,27	5,40	70 125	2,540	A
	11	0,27	5,40	103 667	3,454	A
	21	0,27	5,40	214 773	3,073	B
	25	0,27	5,40	80 571	2,616	A
	1	0,32	6,40	45 637	2,896	B
	16	0,32	6,40	39 861	2,794	A
	31	0,32	6,40	47 533	3,023	A
	36	0,27	6,40	59 441	2,362	A
	41	0,32	6,40	60 247	3,404	A

Tableau 4-14 : Données de fin des essais sur les roues dentées A3-1, A4-1, B1-1 et B2-1

Roue dentée	Dent	Force du vérin		Nombre de cycles	Longueur de la fissure	Critère d'arrêt
		Minimale	Maximale			
		kN	kN	cycle	mm	
A3-1	6	0,27	5,40	177 095	3,531	B
	16	0,27	5,40	123 680	2,845	A
	31	0,27	5,40	112 438	2,718	B
	36	0,27	5,40	162 374	2,896	B
	1	0,32	6,40	45 660	2,540	A
	11	0,32	6,40	36 383	2,108	A
	21	0,32	6,40	45 896	2,794	A
	26	0,32	6,40	50 927	2,286	A
A4-1	6	0,27	5,40	97 401	2,413	A
	16	0,27	5,40	75 177	2,769	A
	26	0,27	5,40	106 252	2,134	A
	31	0,27	5,40	120 977	2,489	B
	1	0,32	6,40	45 272	2,591	A
	11	0,32	6,40	36 908	1,473	D
	21	0,32	6,40	41 502	2,413	B
	36	0,32	6,40	49 887	2,311	B
B1-1	6	0,27	5,40	124 737	2,261	B
	16	0,27	5,40	90 573	2,057	B
	21	0,27	5,40	83 064	2,286	A
	36	0,27	5,40	102 146	2,210	A
	41	0,27	5,40	88 288	2,997	A
	1	0,32	6,40	22 188	2,362	A
	11	0,32	6,40	31 022	1,905	B
	26	0,32	6,40	35 627	2,337	A
	31	0,32	6,40	44 803	2,362	B
B2-1	6	0,27	5,40	80 570	3,073	A
	16	0,27	5,40	43 109	2,210	A
	26	0,27	5,40	55 458	2,083	A
	36	0,27	5,40	66 796	1,676	A
	1	0,32	6,40	22 012	2,007	A
	11	0,32	6,40	23 545	1,778	A
	21	0,32	6,40	31 552	1,956	A
	31	0,32	6,40	32 152	1,270	A

Tableau 4-15: Données de fin des essais sur les roues dentées C1-1, D1-1 et D2-1

Roue dentée	Dent	Force du vérin		Nombre de cycles	Longueur de la fissure	Critère d'arrêt
		Minimale	Maximale			
		kN	kN		mm	
C1-1	6	0,27	5,40	56 138	2,184	A
	11	0,27	5,40	71 483	2,388	A
	16	0,27	5,40	72 384	2,540	A
	26	0,27	5,40	115 354	3,048	A
	31	0,27	5,40	162 314	2,540	A
	1	0,32	6,40	39 666	2,210	A
	21	0,32	6,40	32 470	2,210	A
	36	0,32	6,40	36 815	2,261	A
	41	0,32	6,40	28 959	2,210	A
D1-1	11	0,27	5,40	59 453	1,880	A
	26	0,27	5,40	47 378	1,981	A
	31	0,27	5,40	51 838	complète	C
	35	0,27	5,40	66 174	2,515	A
	41	0,27	5,40	77 974	complète	C
	1	0,32	6,40	22 135	4,674	B
	6	0,32	6,40	42 080	2,311	A
	16	0,32	6,40	18 038	1,880	A
	21	0,32	6,40	20 182	2,413	A
D2-1	6	0,27	5,40	71 884	2,464	A
	11	0,27	5,40	72 758	2,032	A
	16	0,27	5,40	59 957	2,210	B
	31	0,27	5,40	81 292	2,159	A
	41	0,27	5,40	78 136	1,626	A
	1	0,32	6,40	37 059	3,277	A
	21	0,32	6,40	34 979	2,134	A
	26	0,32	6,40	29 214	1,829	A
	36	0,32	6,40	32 079	2,007	A

4.4 Mesure de la profondeur durcie

Des attaques au Nital ont été effectuées sur la face avant, la face arrière, la section en milieu de tête, la section en milieu de creux et la section à mi-denture. Les trois sections mentionnées sont définies à la section 3.5. Les tableaux 4-16 et 4-17 présentent les photos des profils transformés des roues dentées des recettes développées et retenues pour l'étude.

La répétabilité du traitement thermique est jugée excellente lorsque les profondeurs durcies et les résultats des essais sont les mêmes sur deux roues dentées traitées selon la même recette. Les mesures de la profondeur durcie des roues dentées A2-1 et A2-2 traitées selon la recette A2 sont présentées dans la présente section. Les différences entre les courbes de dureté des deux roues sont faibles. L'annexe VI présente une comparaison des résultats des essais en flexion simple effectués sur les roues A2-1 et A2-2 traitées selon la recette A2. La conclusion de cette comparaison est que la différence entre les résultats des essais est statistiquement non significative.

Tableau 4-16 : Roues dentées A1-1, A2-1, A2-2, A3-1 et A4-1 attaquées au Nital




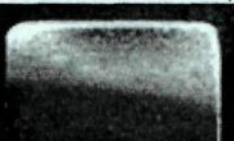

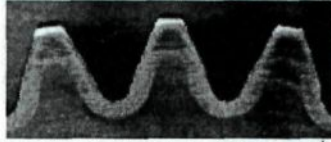

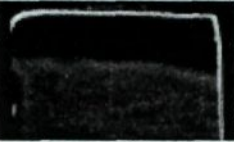


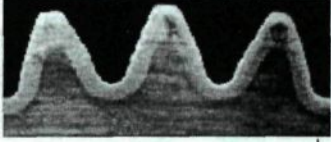



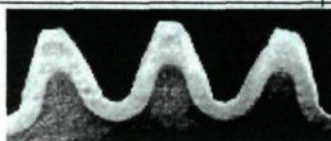
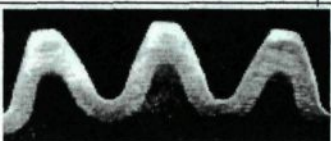
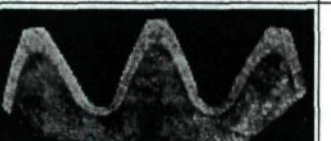

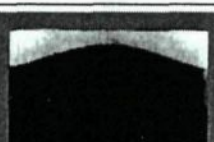

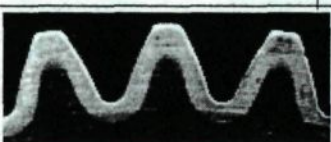
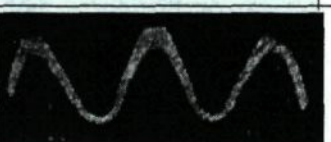

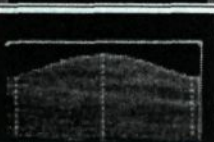
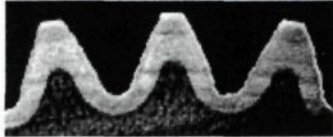


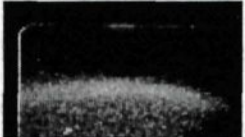




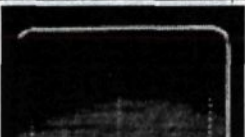


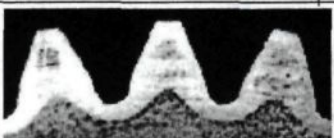
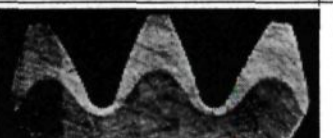



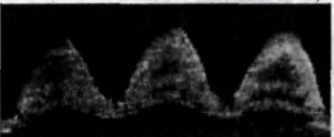
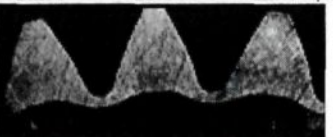







Roue dentée	Face avant	Face arrière	Mi-denture	Tête (face avant à gauche)	Creux (face avant à gauche)
A1-1					
A2-1			Non disponible		
A2-2					
A3-1					
A4-1					

Tableau 4-17 : Roues dentées B1-1, B2-1, C1-1, D1-1 et D2-1 attaquées au Nital

Roue dentée	Face avant	Face arrière	Mi-denture	Tête (face avant à gauche)	Creux (face avant à gauche)
B1-1					
B2-1					
C1-1					
D1-1					
D2-1					

Des mesures de microdureté ont été prises sur les sections en milieu de tête et de creux pour toutes les recettes sélectionnées. Les figures 4-18 à 4-35 montrent les résultats des mesures sous forme de graphiques. Les informations sur les mesures et les résultats sous forme de tableaux sont présentés à l'annexe IV. La nomenclature des positions de mesure a été présentée à la section 3.5.

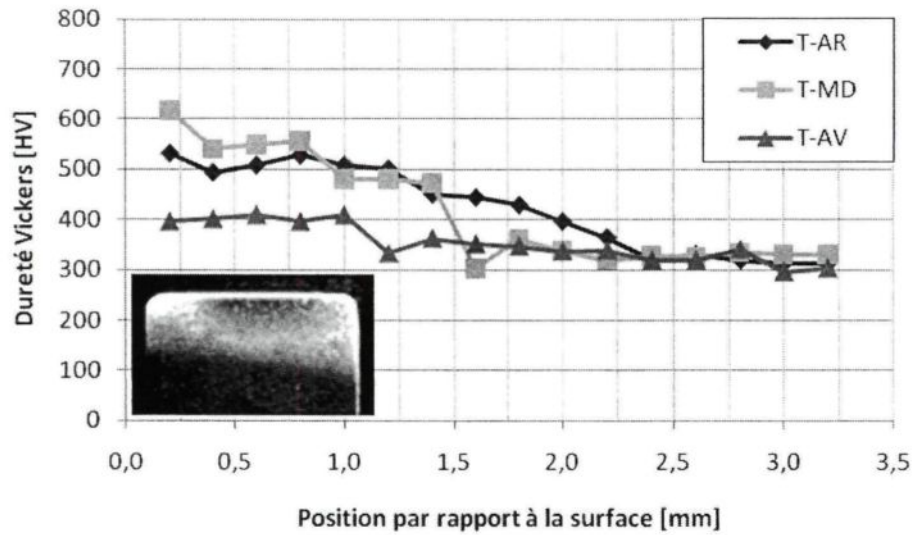


Figure 4-18 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A1-1

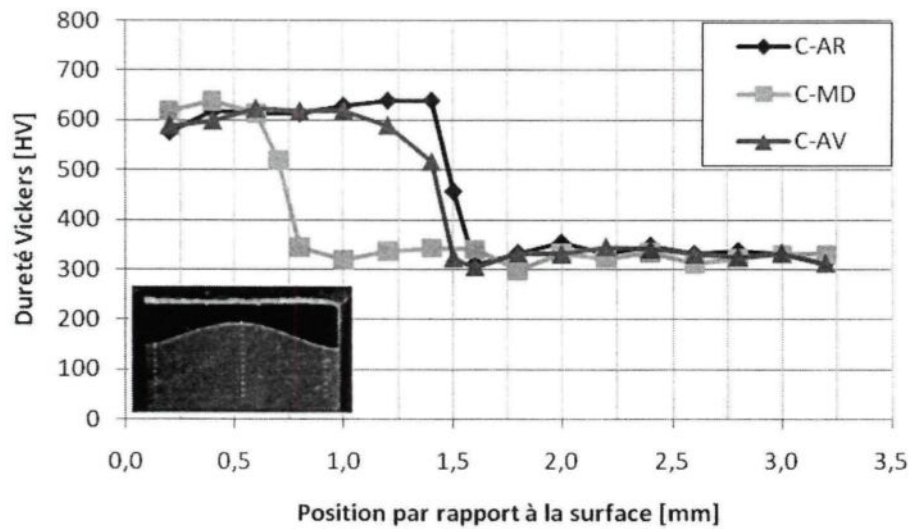


Figure 4-19 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A1-1

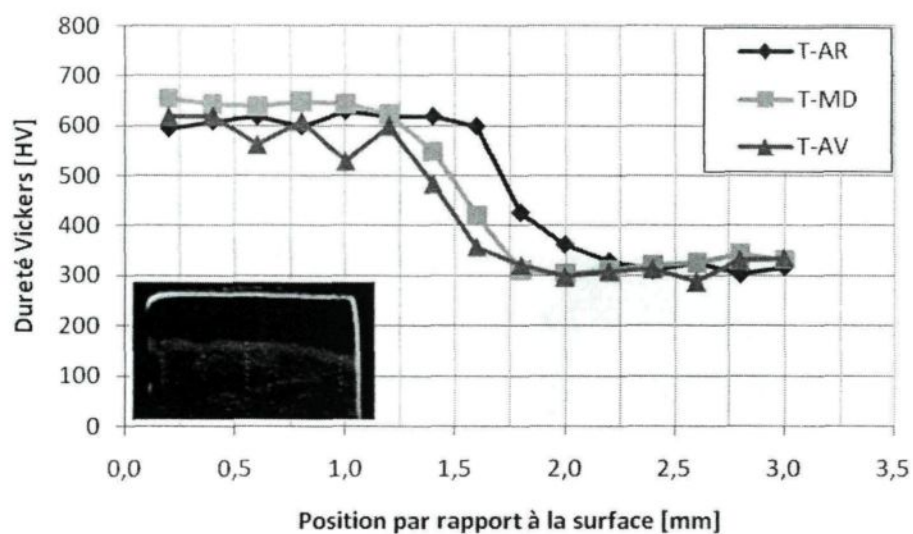


Figure 4-20 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A2-1

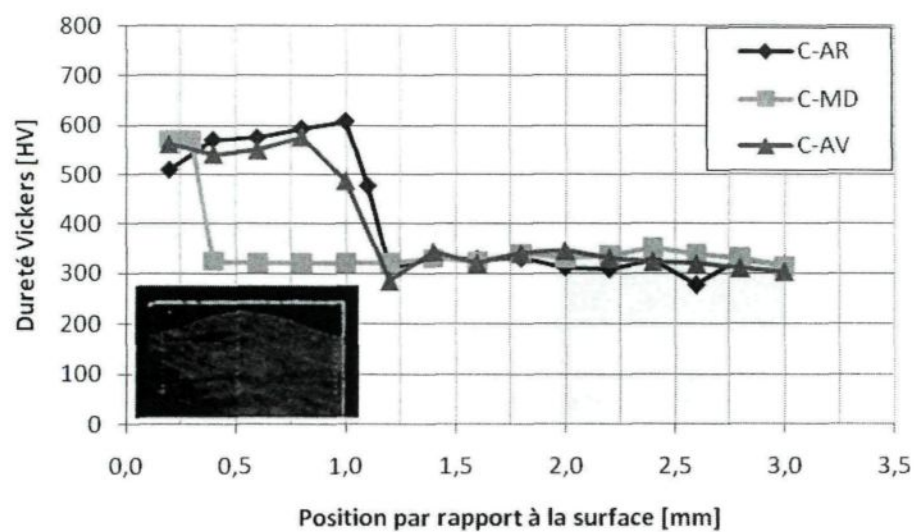


Figure 4-21 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A2-1

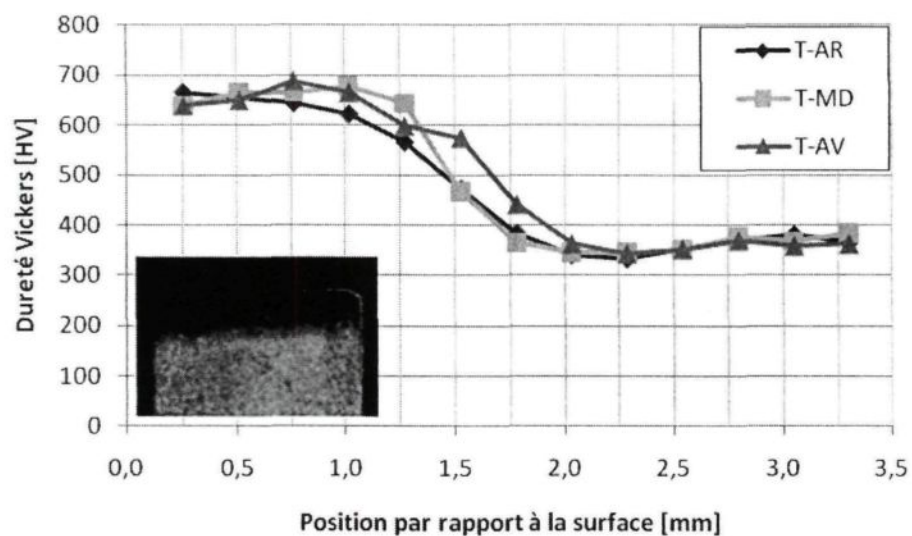


Figure 4-22 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A2-2

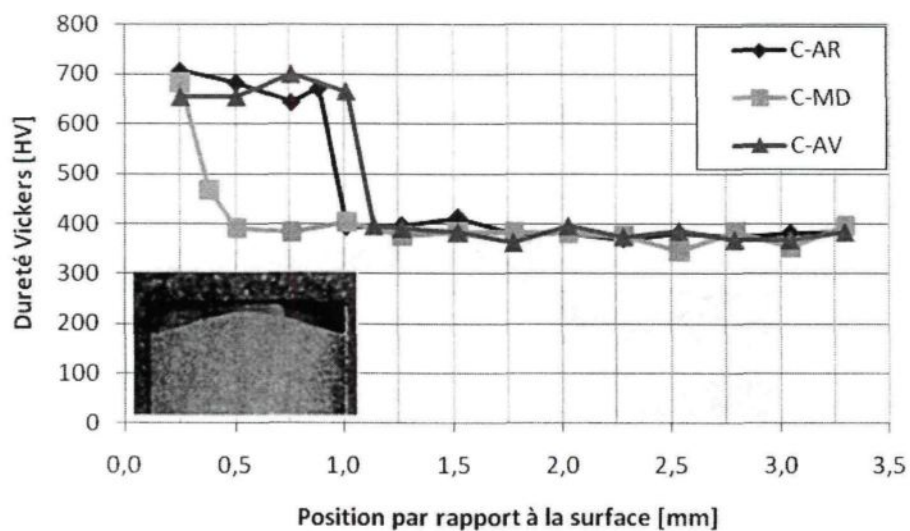


Figure 4-23 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A2-2

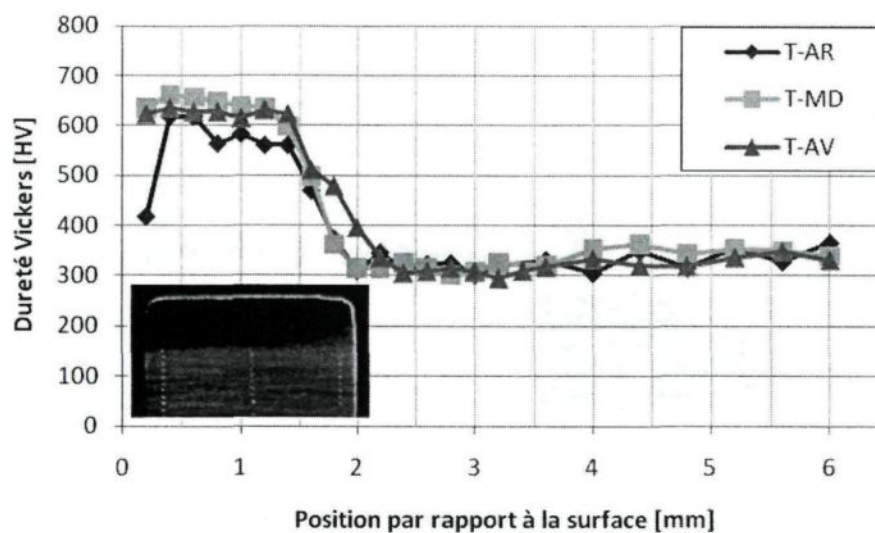


Figure 4-24 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A3-1

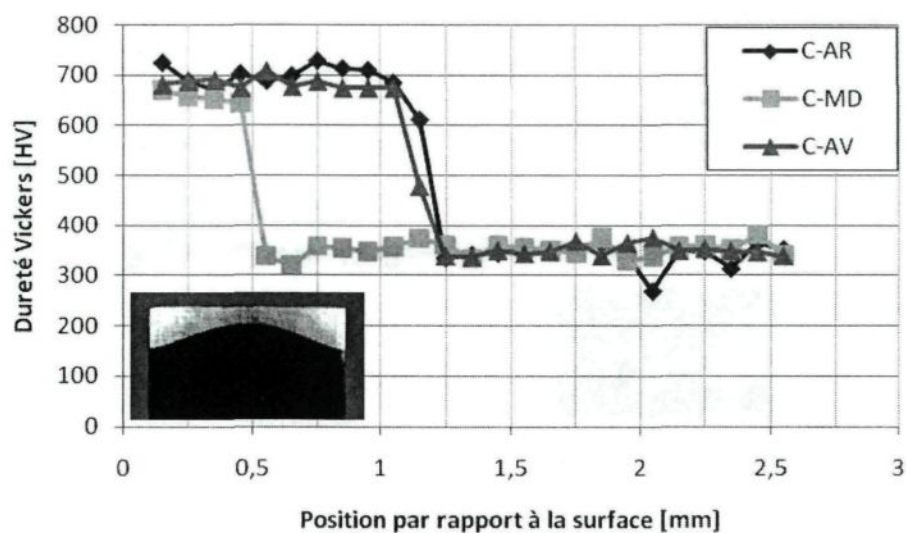


Figure 4-25 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A3-1

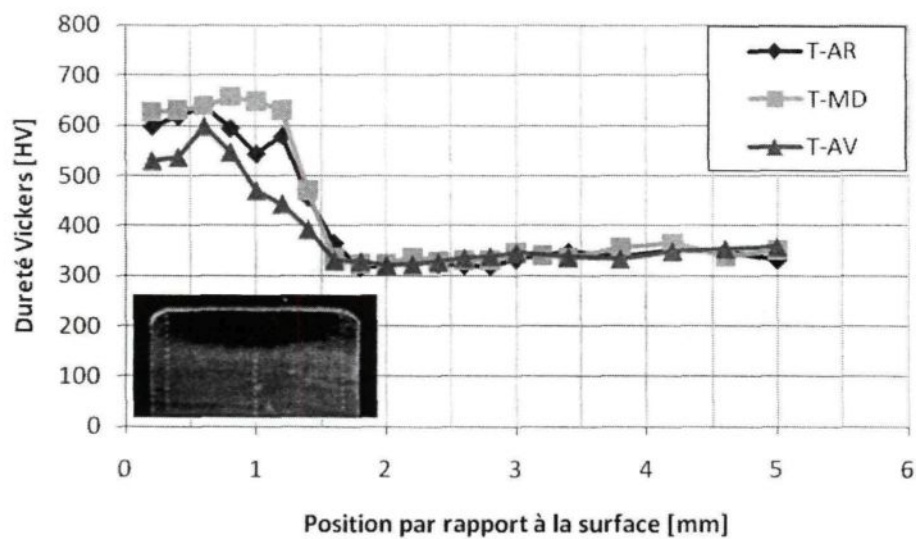


Figure 4-26 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée A4-1

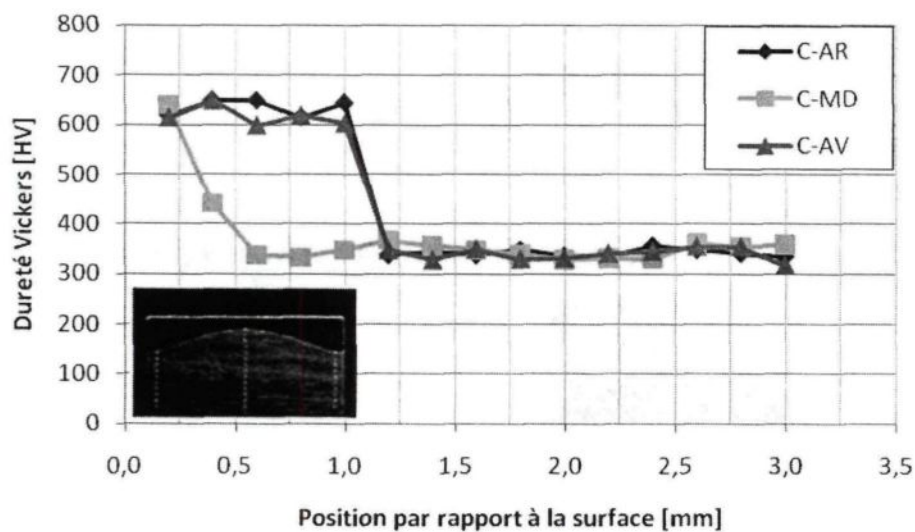


Figure 4-27 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée A4-1

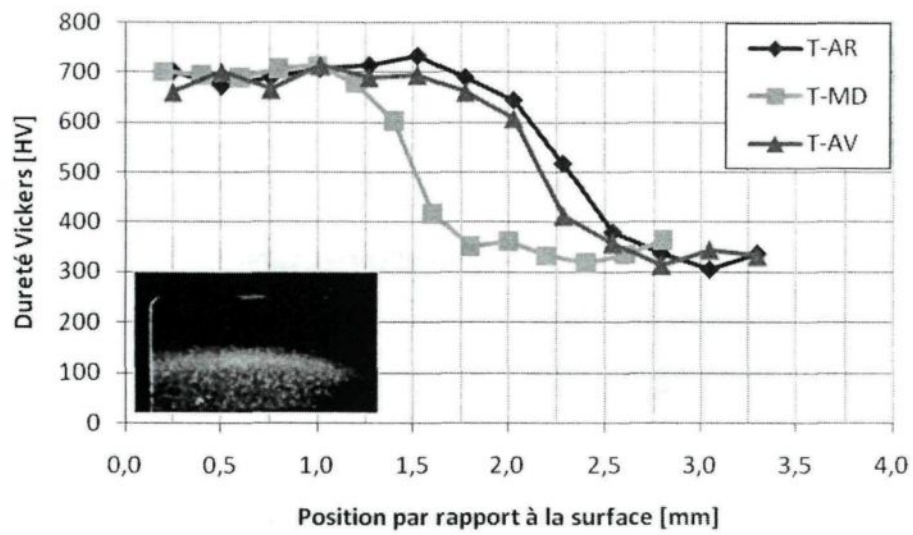


Figure 4-28 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée B1-1

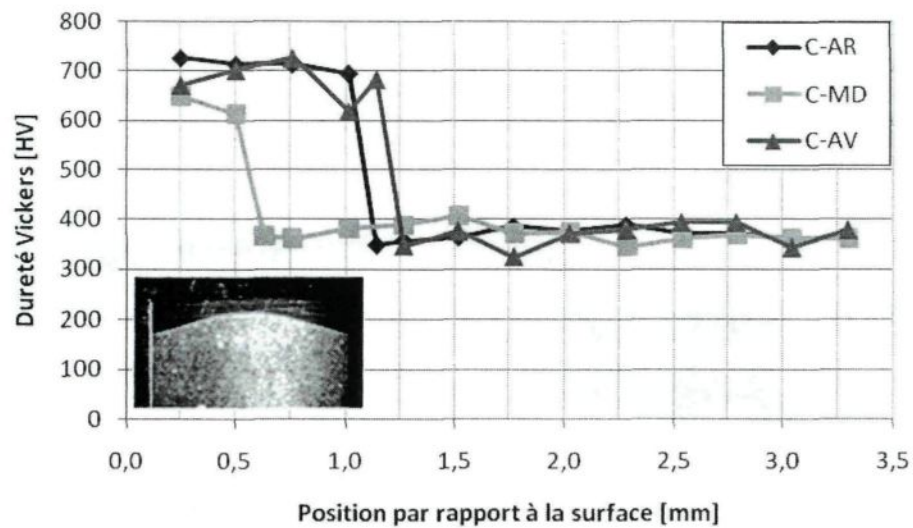


Figure 4-29 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée B1-1

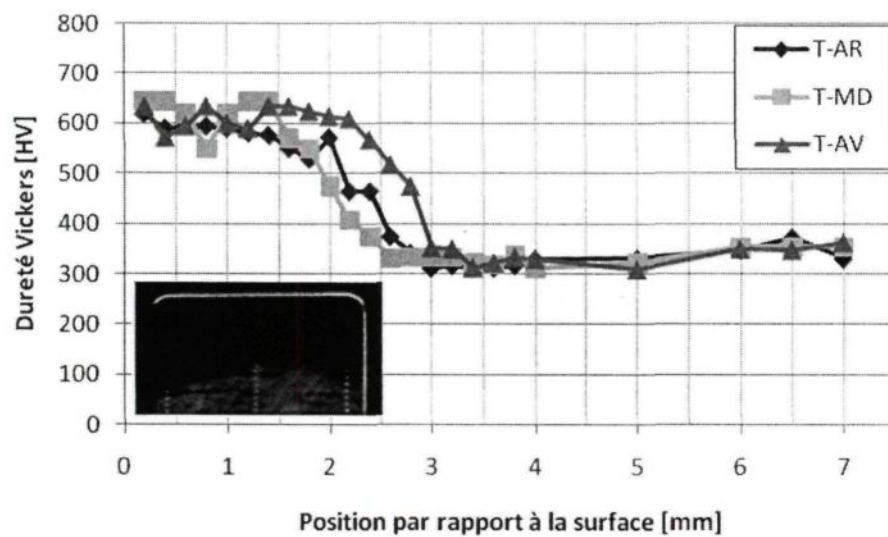


Figure 4-30 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée B2-1

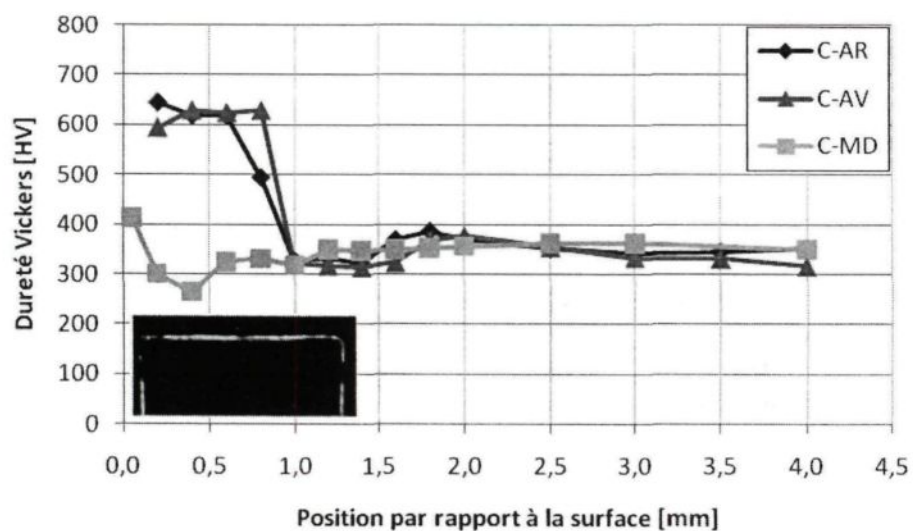


Figure 4-31 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée B2-1

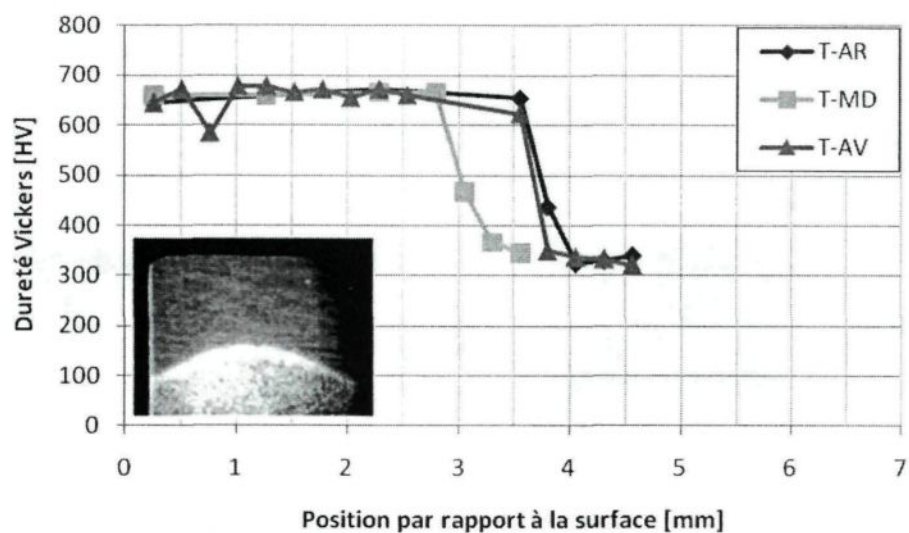


Figure 4-32 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée C1-1

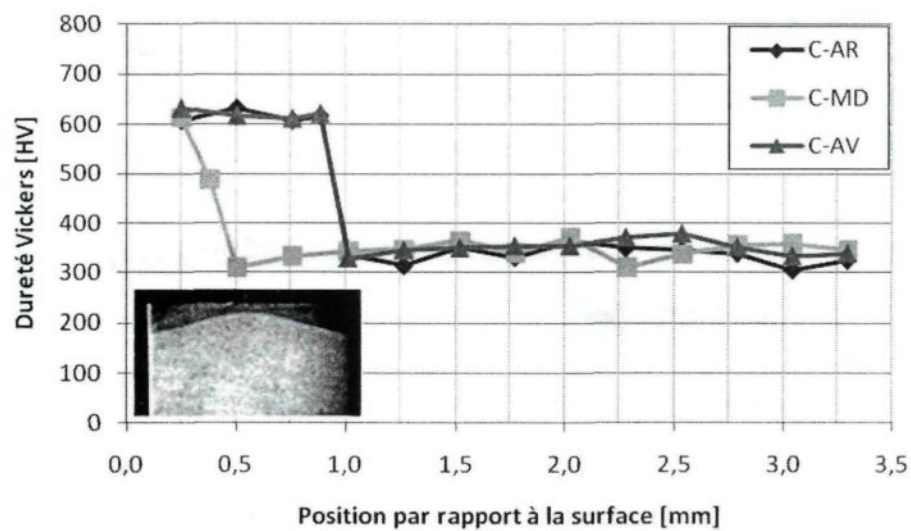


Figure 4-33 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée C1-1

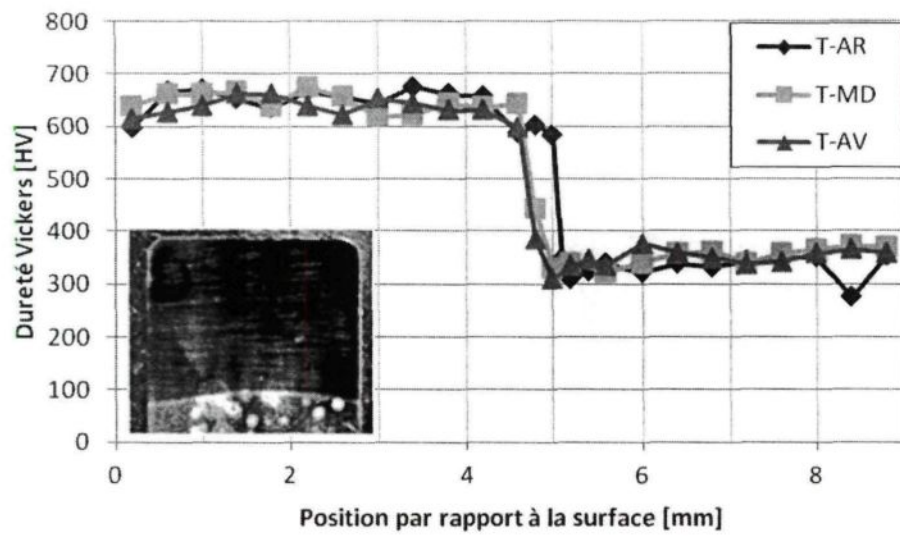


Figure 4-34 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée D1-1

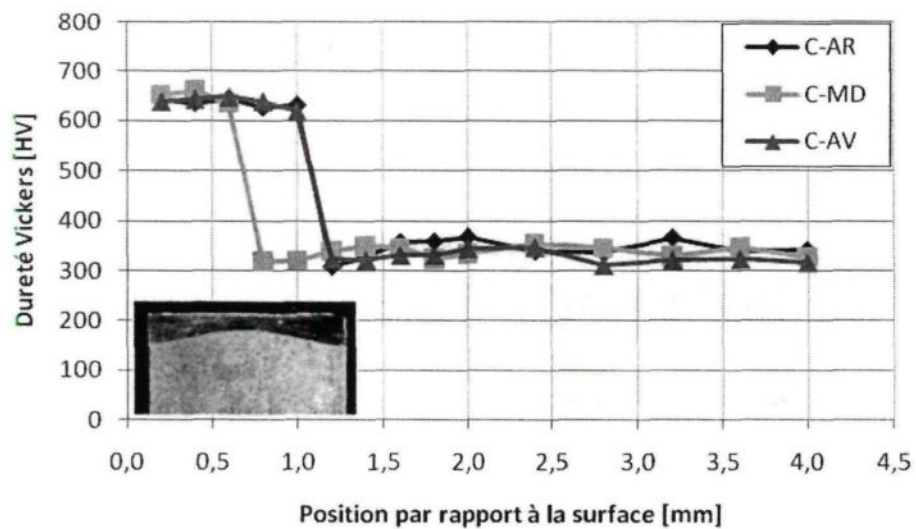


Figure 4-35 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée D1-1

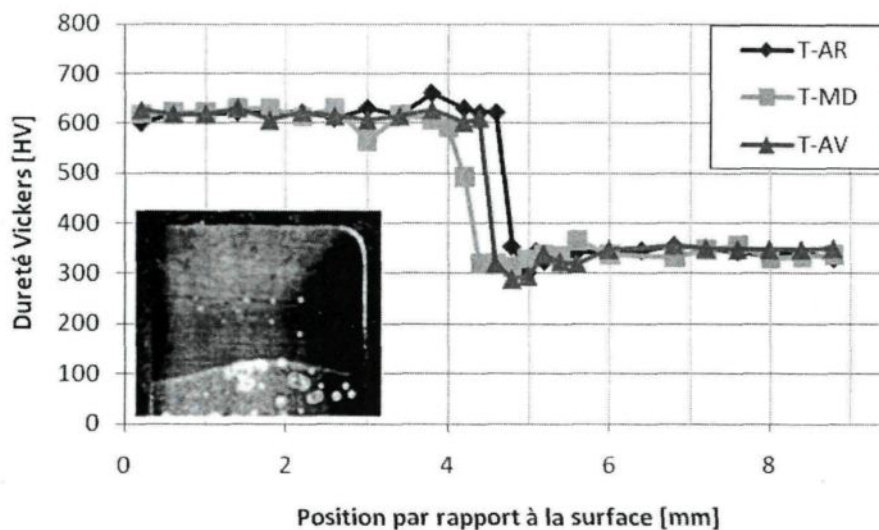


Figure 4-36 : Profil de dureté à la tête d'une dent de la roue dentée D2-1

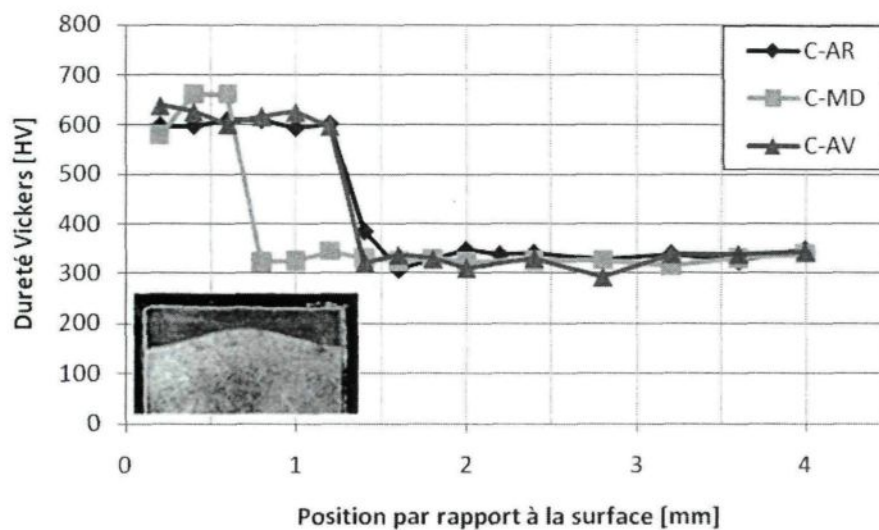


Figure 4-37 : Profil de dureté au pied d'une dent de la roue dentée D2-1

Comme présenté à la section 3.5, la profondeur durcie est la distance perpendiculaire à la surface à laquelle une dureté de 400 HV est atteinte. Cette mesure de position est obtenue par interpolation linéaire avec les deux mesures les plus près de 400 HV. Le tableau 4-18 présente les profondeurs obtenues.

Tableau 4-18 : Profondeur durcie

Roue dentée	Tête			Creux		
	Avant mm	Mi-denture mm	Arrière mm	Avant mm	Mi-denture mm	Arrière mm
A1-1	1,02	1,49	1,98	1,46	0,77	1,54
A2-1	1,53	1,64	1,88	1,09	0,37	1,15
A2-2	1,91	1,69	1,73	1,14	0,49	1,01
A3-1	1,99	1,74	1,74	1,21	0,53	1,23
A4-1	1,37	1,50	1,52	1,16	0,48	1,16
B1-1	2,34	2,10	2,50	1,25	0,62	1,12
B2-1	2,92	2,24	2,54	0,95	0,07	0,91
C1-1	3,76	3,22	3,85	0,99	0,44	0,99
D1-1	4,78	4,87	5,08	1,15	0,75	1,14
D2-1	4,54	4,31	4,77	1,34	0,75	1,39

Un des objectifs établi à la section 3.4.3 est d'obtenir approximativement la même profondeur durcie au milieu du creux à mi-largeur de denture pour toutes les recettes. Tel qu'expliqué à la section 3.4.4, un certain écart entre la profondeur mesurée et la profondeur cible est toléré afin de limiter le nombre de pièces détruites pendant le développement des recettes. La figure 4-38 présente la profondeur durcie au creux à mi-denture sous forme de diagramme en boîte. Selon la figure, les profondeurs durcies ne sont pas les mêmes pour toutes les recettes.

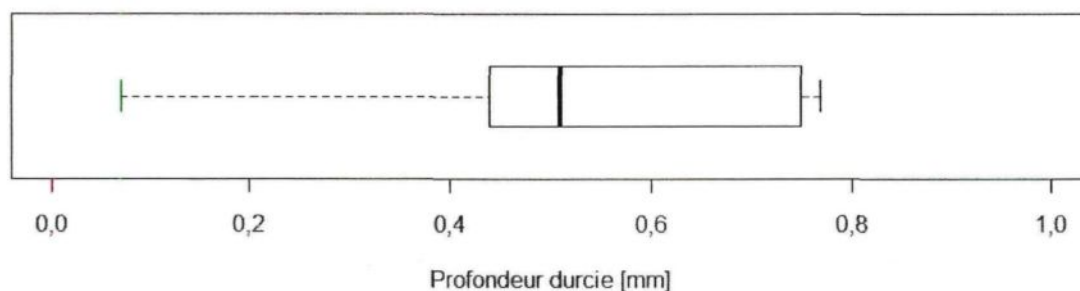


Figure 4-38 : Profondeur durcie en creux de dent à mi-denture

Un diagramme en boîte présente cinq informations principales : la valeur minimale, le premier quartile, la médiane, le troisième quartile et la valeur maximale. Les limites inférieures et supérieures des rectangles sont respectivement le premier et le troisième quartile. Un quartile est une des trois valeurs qui sépare un groupe de données en quatre parties égales. La ligne au centre des rectangles est la médiane. L'écart interquartile est la différence entre le troisième et le premier quartile. Les longueurs minimales et maximales sont représentées par un point ou un segment. Un segment s'étend jusqu'à la longueur extrême lorsque celle-ci est à moins de 1,5 fois l'écart interquartile de l'extrémité la plus proche du rectangle. Un point est utilisé dans le cas contraire.

Comme mentionné à la section 3.5.3, la profondeur durcie de la tangente à 30 ° est mesurée par analyse d'image. Le tableau 4-19 présente les mesures réalisées pour les différentes recettes.

Tableau 4-19 : Profondeur durcie de la tangente à 30 °

Recette	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	D1	D2
Profondeur mm	0,46	0,39	0,49	0,41	0,56	0,12	0,51	1,01	0,87

4.5 Inspection par particules magnétiques

Chaque dent soumise à un essai en flexion simple a été inspectée par particules magnétiques après l'essai. La figure 4-39 montre les photos de la roue A1-2 obtenues lors de l'inspection par particules magnétiques. Les photos des autres recettes ne sont pas présentées. Seules les mesures de longueur de fissure sont présentées pour tous les essais (section 4.3.3).

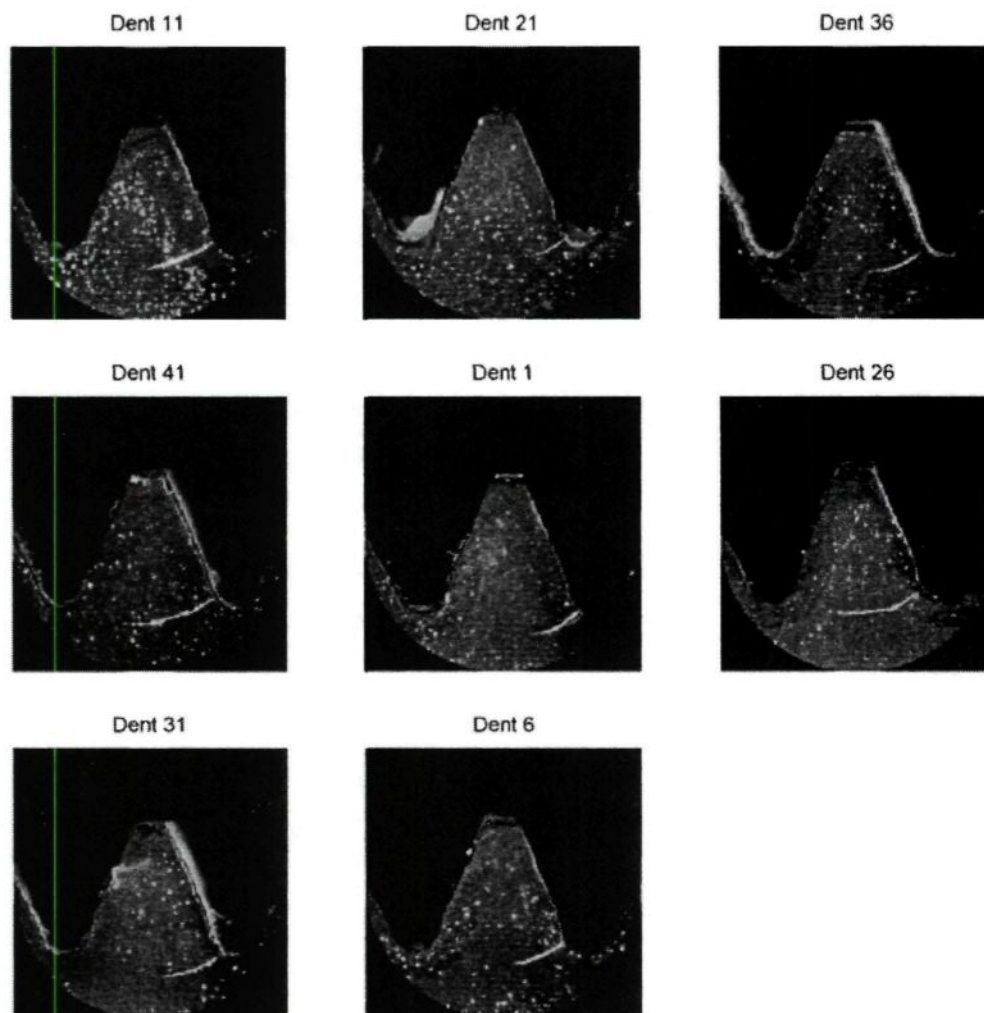


Figure 4-39 : Photos des fissures de la roue dentée A1-2

4.6 Détection des fissures et arrêt automatique

La figure 4-40 présente les longueurs de fissures à l'arrêt des essais sous forme de diagramme en boîte en les groupant selon la roue dentée et la charge. Les données du test ayant duré dix millions de cycles et les données des deux essais ayant subi une rupture complète des dents ne sont pas présentées sur la figure. Une fissure qui se propagerait jusqu'à la rupture aurait une longueur d'environ 5,6 mm.

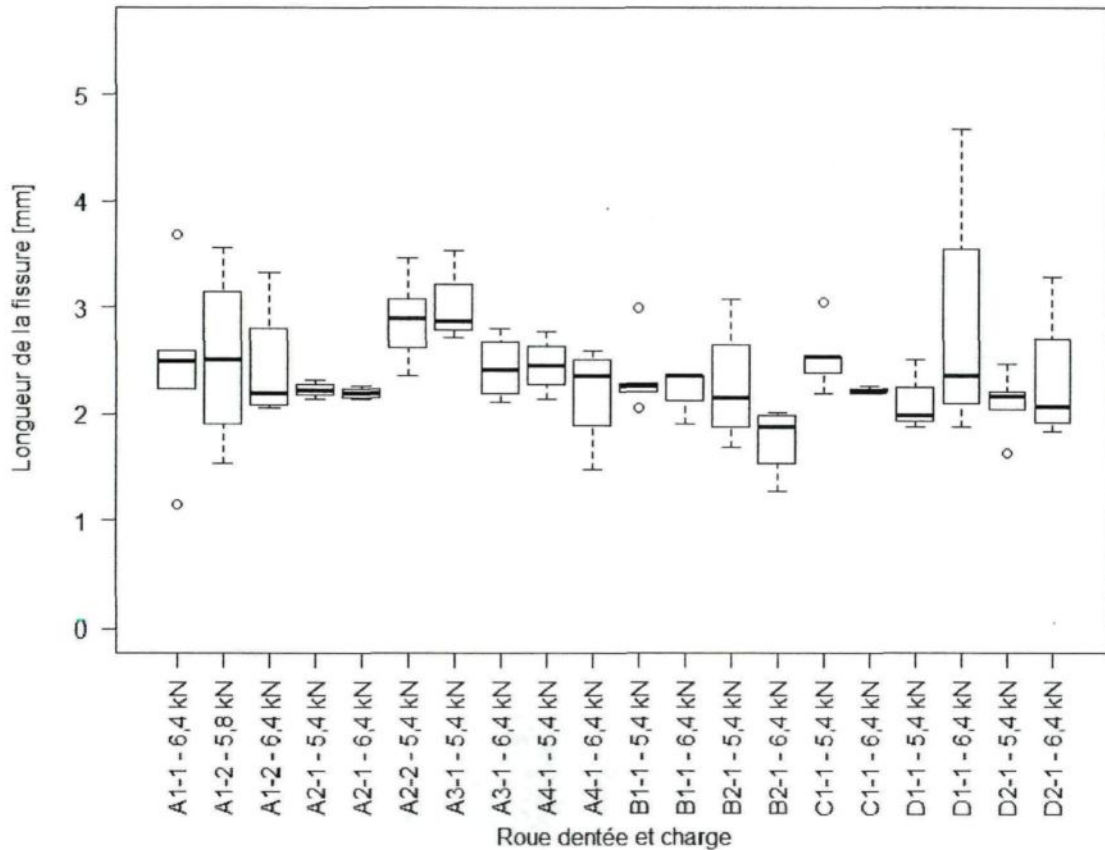


Figure 4-40 : Longueur de la fissure en fonction de la roue dentée et de la charge

Suite de l'observation de la figure 4-40, il ne semble pas que la roue dentée et la charge de l'essai influencent la longueur de la fissure. Les longueurs de fissure varient quelque peu, mais les valeurs médianes sont toutes regroupées dans une même plage de profondeurs durcies (1,9 mm à 2,9 mm). Il est supposé qu'une faible variation des longueurs de fissure a pour effet d'augmenter la dispersion des résultats. Puisque la différence entre les longueurs de fissures est faible, il est jugé acceptable de comparer les recettes selon le nombre de cycles quelque soit la longueur de la fissure.

Comme présenté à la section 3.6.4, cinq conditions servent de critère d'arrêt pour décider quand arrêter un essai en flexion simple :

- A. Limite supérieure du capteur de déformation
- B. Limite supérieure de la force sur la dent
- C. Limite inférieure de la force du vérin
- D. Limite supérieure du déplacement du vérin
- E. Atteinte de 10 millions de cycles

La figure 4-41 présente les proportions dans lesquelles ces cinq conditions sont survenues aux cours des essais.

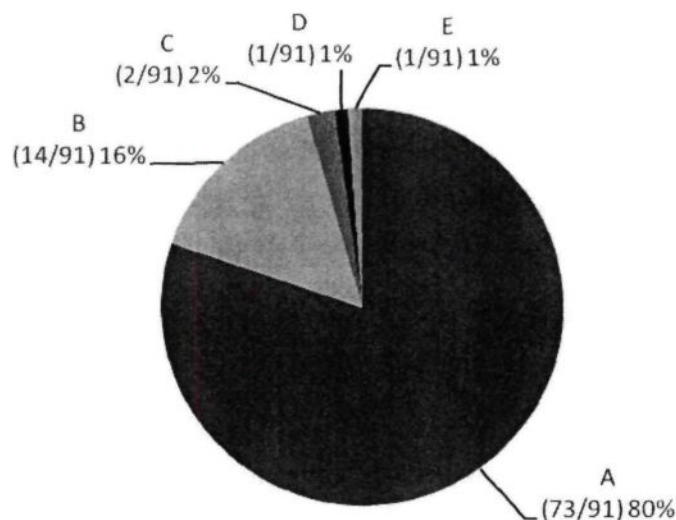


Figure 4-41 : Conditions d'arrêt ayant interrompu les essais

Les conditions A, B, C et D surviennent quand une fissure est suffisamment longue pour être détectée. La condition E survient si aucune des autres conditions ne survient avant dix millions de cycles.

Condition A

En règle générale, c'est la condition A qui met fin le plus souvent aux essais. Les autres conditions surviennent dans des conditions particulières.

Condition B

Comme expliqué à la section 4.3.1, la fissuration d'une dent cause l'augmentation du déplacement maximal du vérin et l'augmentation de la force maximale sur la dent. Si la force sur la dent augmente plus rapidement que le déplacement, la condition B survient avant la condition A.

Condition C

L'atteinte de la condition C est seulement survenue deux fois, et cela, sur la même roue dentée. Dans les deux cas, il y a eu rupture complète de la dent. Cela est survenu sur la roue dentée D1-1, une des roues dentées ayant la profondeur durcie la plus élevée. Dans les deux cas, la fissure débute dans la zone durcie et y reste jusqu'à la rupture totale de la dent. Dans les deux cas, la fissure est positionnée un peu plus vers la tête de la dent que toutes les autres fissures observées. La condition C a été dépassée lorsque la dent s'est séparée de la roue dentée. Les conditions A, B et D requièrent que la fissure s'ouvre. Il est supposé que les chemins de propagation des deux fissures n'ont pas causé l'ouverture de fissure habituellement rencontrée et que c'est pour cette raison que les conditions A, B ou D n'ont pas été rencontrées avant la rupture de la dent.

Condition D

La condition D n'est survenue qu'une seule fois. Pour cet essai, la limite de déplacement maximale du vérin avait été ajustée un peu trop basse à cause d'une erreur de

calcul de la limite. Comme expliqué à la section 3.6.4, la variation du signal du capteur de déformation est proportionnelle au déplacement du vérin. Lors du réglage des limites d'un essai, la limite supérieure du capteur de déformation et la limite supérieure du déplacement du vérin sont réglées de façon à ce que la limite supérieure du capteur de déformation s'active juste un peu avant la limite supérieure de déplacement du vérin. Ainsi, en temps normal, la limite supérieure de déplacement du vérin sert de limite de secours au cas où la limite du capteur de déformation ne s'activerait pas pour quelque raison.

Condition E

La condition E n'est survenue qu'une seule fois, à une charge de 5,4 kN avec la recette A1. Après cela, les autres essais sur la recette A1 ont été effectués à plus haute charge et ils ont pris fin avant dix millions de cycles.

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RÉSULTATS

Les résultats des essais présentés au chapitre 4 sont analysés au chapitre 5. La section 5.1 fait un rappel des objectifs. La section 5.2 présente la méthodologie d'analyse des résultats choisie. Dans la section 5.3, trois simplifications du modèle sont validées en se basant sur les résultats de tests statistiques. La section 5.4 expose le modèle retenu. Finalement, la section 5.5 compare les recettes entre elles et discute des causes expliquant le classement obtenu.

5.1 Retour sur les objectifs

L'objectif général est d'étudier expérimentalement la résistance à la flexion en pied de dent de roues cylindriques à denture droite ayant subi un durcissement de contour par induction thermique.

5.2 Méthodologie

Les étapes à suivre pour atteindre l'objectif général mentionné à la section 5.1 sont les suivants.

- Développer un modèle de la durée des essais en fonction de variables explicatives (section 5.2.1).
- Classer des recettes les unes par rapport aux autres selon la résistance à la flexion en pied de dent (section 5.2.2).

5.2.1 Élaboration du modèle

Une variable explicative est une variable qui explique les variations d'une autre variable. Une variable dépendante est une variable qui subit l'influence d'une ou de plusieurs autres variables. Dans le cas de l'étude de la résistance à la flexion en pied de dent, la variable dépendante est le nombre de cycles des essais. Plusieurs variables peuvent expliquer la variation du nombre de cycles. C'est un fait connu dans l'étude d'essais de fatigue qu'une augmentation de la charge cause une diminution du nombre de cycles. La charge est donc une variable explicative. Il est également connu que les profils de dureté et des contraintes résiduelles influencent le nombre de cycles. Les profils obtenus sont fonction des recettes, c'est-à-dire qu'ils varient d'une recette à l'autre. Les recettes sont choisies comme variable explicative. Chaque recette a ses propres profils de dureté et des contraintes résiduelles. En choisissant les recettes comme variable explicative, il est possible d'évaluer la résistance à la fatigue des recettes sans en connaître les profils de dureté et des contraintes résiduelles. L'analyse est effectuée ainsi, car les profils de contraintes résiduelles ne sont pas mesurés.

La prochaine étape consiste à choisir la distribution statistique qui représente le mieux la distribution de la variable dépendante. Selon de nombreux documents d'ingénierie, la distribution statistique du logarithme du nombre de cycles d'essais de fatigue est approximativement normale. La distribution de Weibull est souvent utilisée parce qu'elle peut modéliser des taux de défaillance croissants et décroissants (Nelson, 1990) et qu'elle attribue une probabilité de défaillance nulle à un nombre de cycles plus petit que zéro. C'est probablement la distribution la plus utilisée lors de l'élaboration de modèles de durée de vie (Lawless, 2003). C'est cette distribution qui est utilisée lors du développement du modèle. La densité de probabilité de la distribution de Weibull comprend deux paramètres (voir annexe III). Ceux-ci sont le facteur de forme β et le facteur d'échelle α_w .

Les valeurs des variables explicatives de la population sont inconnues. Les données des essais sont utilisées pour obtenir des estimations de ces valeurs en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance (voir annexe III.2). L'estimation des paramètres est effectuée avec le logiciel R (R development core team, 2009) et la librairie survival (Terry Therneau and original T port by Thomas Lumley, 2009).

La prochaine étape consiste à vérifier si certaines simplifications peuvent être faites. Le test du rapport des vraisemblances (voir annexe III.3), qui se sert des log-vraisemblance lv calculés pour les différents modèles, est utilisé à cette fin. Lorsqu'il est jugé acceptable qu'un paramètre soit le même pour toutes les recettes au lieu d'être fonction de la recette, le paramètre est estimé en utilisant les données de toutes les recettes. L'utilisation d'une plus grande quantité de données améliore la précision de l'estimation. Après simplification, un modèle est retenu et les résultats sont analysés selon ce modèle.

Selon la littérature (Castillo et Fernández-Canteli, 2009), la variation du logarithme naturel du nombre de cycles est linéairement proportionnelle à la variation de la contrainte dans la zone de haut nombre de cycles. Les charges des essais sont choisies de façon à ce que les essais se terminent à plus de 10 000 cycles et moins de dix millions de cycles, ce qui correspond à la zone de haut nombre de cycles. Ainsi, il est raisonnable de considérer que les résultats à deux charges d'une recette peuvent être reliés par une droite dans une figure semi-log.

5.2.2 Établir le classement des recettes

Une fois le modèle choisi, les estimations des variables explicatives du modèle sont obtenues par la méthode du maximum de vraisemblance. Le modèle est utilisé pour estimer le nombre de cycles de chacune des recettes en fonction des variables explicatives à un percentile de défaillance donné. Les recettes sont ensuite triées les unes

par rapport aux autres en fonction de leur nombre de cycles estimés. La recette ayant le plus grand nombre de cycles estimé à une charge donnée est la recette ayant la plus grande résistance à la fatigue en pied de dent à cette charge. À l’opposé, la recette ayant le plus faible nombre de cycles estimé à une charge donnée est la recette ayant la plus faible résistance à la flexion en pied de dent à cette charge. Des intervalles de confiance, expliqués à la section 3.9, sont utilisés pour évaluer si les différences de durée de vie entre les recettes sont statistiquement significatives.

5.3 Simplification du modèle

Trois simplifications sont testées. Premièrement, la section 5.3.1 teste l’égalité du facteur de forme de la distribution de Weibull β aux deux charges des essais d’une recette. Ensuite, la section 5.3.2 teste l’égalité du facteur de forme de la distribution de Weibull β pour toutes les recettes. Finalement, la section 5.3.3 teste l’égalité du coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF pour toutes les recettes.

5.3.1 Égalité de la valeur de β aux deux charges des essais d’une recette

Les tableaux 5-1, 5-2 et 5-3 présentent les informations sur les modèles où le facteur de forme de la distribution de Weibull β n’est pas contraint et est estimé. Un modèle est généré pour chaque recette à chaque charge. Ainsi, 18 modèles sont générés. Pour chaque modèle, le facteur d’échelle de la distribution de Weibull α_w est directement estimé.

Tableau 5-1 : Estimations du modèle non contraint à 5,4 kN

Recette	n	α_w	β	lv
A2	9	125 468	2,56	-108,9687
A3	4	155 135	6,27	-46,41657
A4	4	106 895	7,26	-44,43735
B1	5	104 453	6,52	-55,53018
B2	4	67 051	5,05	-43,80473
C1	5	107 973	2,66	-59,70868
D1	5	65 199	6,02	-53,69637
D2	5	75 930	13,06	-51,19431

Tableau 5-2 : Estimations du modèle non contraint à 5,8 kN

Recette	n	α_w	β	lv
A1	4	131 668	2,10	-49,26131

Tableau 5-3 : Estimations du modèle non contraint à 6,4 kN

Recette	n	α_w	β	lv
A1	9	79 313	2,10	-105,12800
A2	8	47 930	4,79	-85,21870
A3	4	46 957	10,90	-39,69927
A4	4	45 546	10,34	-39,59941
B1	4	36 612	4,65	-41,67852
B2	4	29 273	7,12	-39,32954
C1	4	36 296	9,91	-38,91063
D1	4	28 843	2,81	-42,23668
D2	4	34 679	13,34	-37,60592

Le tableau 5-4 présente les informations sur les modèles où le facteur de forme de la distribution de Weibull β est contraint à être égal aux deux charges des essais d'une recette. Un modèle est généré pour chaque recette avec les données à toutes les charges. Ainsi, neuf modèles sont générés. Pour chaque modèle, la charge est traitée comme une variable explicative de catégorie et le facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w est directement estimé.

Tableau 5-4 : Estimations du modèle contraint selon β

Recette	n	α_w			β	lv
		5,4 kN	5,8 kN	6,4 kN		
A1	13	-	135 946	78 308	2,41	-154,49980
A2	17	130 964	-	46 301	3,15	-195,54160
A3	8	157 552	-	46 442	7,88	-86,55618
A4	8	107 883	-	45 193	8,53	-84,23058
B1	9	103 280	-	37 243	5,58	-97,42623
B2	8	67 916	-	28 952	5,85	-83,31153
C1	9	114 542	-	35 095	3,62	-101,16910
D1	9	63 258	-	30 613	3,82	-97,04398
D2	9	75 950	-	34 667	13,19	-88,80093

Le tableau 5-5 présente les résultats de l'analyse statistique de l'égalité de la valeur de β aux deux charges des essais d'une recette. Le seuil de signification statistique α_s choisi est 0,05. Il est conclu que le facteur de forme de la distribution de Weibull β est différent aux deux charges lorsque $\Pr(\chi^2_{(1)} \geq T)$ est plus petit que 0,05. Dans le cas contraire, la conclusion est que le facteur de forme de la distribution de Weibull β est égal aux deux charges.

Tableau 5-5 : Test du rapport des vraisemblances

Recette	T	$\Pr(\chi^2_{(1)} \geq T)$	Conclusion
A1	0,22098	0,638	=
A2	2,70840	0,100	=
A3	0,88068	0,348	=
A4	0,38764	0,534	=
B1	0,43506	0,510	=
B2	0,35452	0,552	=
C1	5,09958	0,024	\neq
D1	2,22186	0,136	=
D2	0,00140	0,970	=

Selon le test, seul le facteur de forme de la distribution de Weibull β de la recette C1 est différent aux deux charges. Puisque les estimations des facteurs de forme de la distribution de Weibull β de la recette C1 sont basées sur relativement peu de données, les estimations sont approximatives. Pour cette raison et parce que tous les autres tests concluent à des facteurs de forme de la distribution de Weibull β identiques, le modèle qui contraint le facteur de forme de la distribution de Weibull β à une valeur unique pour chaque recette est retenu.

5.3.2 Égalité de la valeur de β pour toutes les recettes

Le tableau 5-6 présente les informations sur les modèles où le facteur de forme de la distribution de Weibull β n'est pas contraint. Un modèle est généré pour chaque recette avec les données à toutes les charges. Ainsi, neuf modèles sont générés. Pour chaque modèle, le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF , qui est une variable explicative continue, et le coefficient de recette cR , qui est une variable explicative de catégorie, sont estimés. Le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF , la force maximale appliquée sur la dent F_{\max} et le coefficient de recette cR sont utilisés pour calculer le facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_W (équation 5-1).

Équation 5-1 : Facteur d'échelle de la distribution de Weibull

$$\alpha_W = e^{cF \cdot F_{\max} + cR}$$

Tableau 5-6 : Estimations du modèle non contraint

Recette	n	Coefficients		α_w			β	lv
		Recette (cR)	Force (cF)	5,4 kN	5,8 kN	6,4 kN		
A1	13	17,15222	-0,91935	-	135 946	78 308	2,41	-154,49980
A2	17	17,39744	-1,03977	130 965	-	46 301	3,15	-195,54160
A3	8	18,56392	-1,22156	157 552	-	46 442	7,88	-86,55618
A4	8	16,28738	-0,87011	107 883	-	45 193	8,53	-84,23058
B1	9	17,05311	-1,01998	103 280	-	37 243	5,58	-97,42623
B2	8	15,73025	-0,85263	67 916	-	28 952	5,85	-83,31153
C1	9	18,03635	-1,18290	114 542	-	35 095	3,62	-101,16910
D1	9	14,97421	-0,72578	63 258	-	30 613	3,82	-97,04398
D2	9	15,47300	-0,78429	75 950	-	34 667	13,19	-88,80093

Le tableau 5-7 présente les informations sur le modèle où le facteur de forme de la distribution de Weibull β est contrainte à être le même pour toutes les recettes. Un seul modèle est généré avec toutes les données afin que le facteur de forme de la distribution de Weibull β soit le même pour toutes les recettes. L'équation 5-1 est utilisée pour calculer facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w .

Tableau 5-7 : Estimations du modèle contraint selon β

Recette	n	Coefficients		α_w			β	lv
		Recette (cR)	Force (cF)	5,4 kN	5,8 kN	6,4 kN		
A1	13	17,78056	-1,00421	-	155 767	85 271	4,04	-1004,97500
A2	17	17,66947	-1,07921	138 929	-	47 217		
A3	8	18,39059	-1,19737	150 966	-	45 590		
A4	8	16,16394	-0,85438	103 807	-	44 175		
B1	9	17,09313	-1,03087	101 360	-	36 155		
B2	8	15,63399	-0,84053	65 851	-	28 414		
C1	9	18,16809	-1,20306	117 194	-	35 190		
D1	9	14,93188	-0,71735	63 463	-	30 973		
D2	9	15,44225	-0,78380	73 848	-	33 724		

Le tableau 5-8 présente les résultats de l'analyse statistique de l'égalité de la valeur de β pour toutes les recettes. Le seuil de signification statistique α_s choisi est 0,05. Il est conclu que le facteur de forme de la distribution de Weibull β est différent pour au moins une recette par rapport aux autres recettes lorsque $\Pr(\chi^2(1) \geq T)$ est plus petit que 0,05. Dans le cas contraire, la conclusion est que le facteur de forme de la distribution de Weibull β est égal pour toutes les recettes.

Tableau 5-8 : Test du rapport des vraisemblances

Recette	T	$\Pr(\chi^2_{(8)} \geq T)$	Conclusion
A1	32,79014	6,717E-05	≠
A2			
A3			
A4			
B1			
B2			
C1			
D1			
D2			

Selon le test, au moins une des recettes a un facteur de forme de la distribution de Weibull β non égal à celui des autres recettes. Comme le nombre de données pour chaque recette est relativement peu élevé, l'estimation du facteur de forme de la distribution de Weibull β séparément pour chaque recette est imprécise. Selon plusieurs références sur les défaillances mécaniques, la distribution du logarithme naturel du temps de défaillance est généralement approximativement normale. La forme de la distribution de Weibull se rapproche de celle de la forme normale lorsque le facteur de forme de la distribution de Weibull β se situe entre trois et quatre. La valeur attendue du facteur de forme de la distribution de Weibull β se situe donc dans cet intervalle. Pour ces raisons, il est supposé que l'estimation du facteur de forme de la distribution de Weibull β utilisant toutes les données donne une estimation de valeur de β plus près de la valeur de la population que l'utilisation de facteurs de forme de la distribution de

Weibull β différents pour chaque recette. Le modèle retenu est donc celui qui contraint le facteur de forme de la distribution de Weibull β à une valeur unique pour toutes recettes.

5.3.3 Égalité du coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF pour toutes les recettes

Le tableau 5-9 présente les informations sur les modèles où le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF n'est pas contraint. Un modèle est généré pour chaque recette avec les données à toutes les charges. Ainsi, neuf modèles sont générés. Le facteur de forme de la distribution de Weibull β est contraint à être le même pour toutes les recettes et sa valeur est fixée à celle obtenue par le modèle contraint (tableau 5-10). L'équation 5-1 est utilisée pour calculer facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w .

Tableau 5-9 : Estimations du modèle non contraint

Recette	n	Coefficients		α_w			β	lv
		Recette (cR)	Force (cF)	5,4 kN	5,8 kN	6,4 kN		
A1	13	17,68623	-0,99147	-	152 623	84 191	3,74	-156,93710
A2	17	17,58235	-1,06660	136 311	-	46 915		-196,02710
A3	8	18,37277	-1,19485	150 329	-	45 512		-88,97072
A4	8	16,15214	-0,85280	103 467	-	44 100		-87,19059
B1	9	17,10496	-1,03375	100 985	-	35 918		-98,42193
B2	8	15,61535	-0,83816	65 466	-	28 314		-84,32989
C1	9	18,07702	-1,18913	115 352	-	35 123		-101,17780
D1	9	14,99021	-0,72897	63 183	-	30 480		-97,04733
D2	9	15,44008	-0,78363	73 754	-	33 687		-95,27326

Le tableau 5-10 présente les informations sur le modèle où le facteur de forme de la distribution de Weibull β et le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF sont contraints à être les mêmes pour toutes les recettes. Un seul modèle est généré avec

toutes les données afin que le facteur de forme de la distribution de Weibull β et le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF soient les mêmes pour toutes les recettes. L'équation 5-1 est utilisée pour calculer facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w .

Tableau 5-10 : Estimations du modèle contraint selon le coefficient de force

Recette	n	Coefficients		α_w			β	lv
		Recette (cR)	Force (cF)	5,4 kN	5,8 kN	6,4 kN		
A1	13	17,55253	-0,96994	-	151 275	84 532	3,74	-1008,99000
A2	17	17,01922		130 812	-	49 591		
A3	8	17,06882		137 465	-	52 113		
A4	8	16,84965		110 410	-	41 857		
B1	9	16,73394		98 345	-	37 283		
B2	8	16,40092		70 489	-	26 723		
C1	9	16,81702		106 865	-	40 513		
D1	9	16,42542		72 238	-	27 386		
D2	9	16,54513		81 424	-	30 868		

Le tableau 5-11 présente les résultats de l'analyse statistique de l'égalité du coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF pour toutes les recettes. Le seuil de signification statistique α_s choisi est 0,05. Il est conclu que le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF est différent pour au moins une recette par rapport aux autres recettes lorsque $\Pr(\chi^2(1) \geq T)$ est plus petit que 0,05. Dans le cas contraire, la conclusion est que le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF est égal pour toutes les recettes.

Tableau 5-11 : Test du rapport des vraisemblances

Recette	T	$\Pr(\chi^2_{(8)} \geq T)$	Conclusion
A1	7,22856	0,512	=
A2			
A3			
A4			
B1			
B2			
C1			
D1			
D2			

Selon le test, il est conclu que le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF peut être considéré comme le même pour toutes les recettes.

5.4 Modèle retenu

Après la réalisation des analyses de données des sections 5.3.1 à 5.3.3, un modèle simplifié utilisant la distribution de Weibull à deux paramètres (α_w , β) est retenu. La méthode du maximum des vraisemblances est utilisée pour estimer le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF, les coefficients de recette cR et le facteur de forme de la distribution de Weibull β . Le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF, le coefficient de recette cR et la force maximale appliquée sur la dent F_{\max} sont utilisés pour calculer le facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w (équation 5-1). Le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF est le même pour toutes les recettes, le coefficient de recette cR est différent pour chaque recette et le facteur de forme de la distribution de Weibull β est le même pour toutes les recettes. Les estimés du coefficient de recette cR, du coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF et du facteur de forme de la distribution de Weibull β sont donnés dans le tableau 5-10. Le nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$ est calculé selon l'équation 5-2.

Équation 5-2 : Nombre de cycles prédit au 50^e percentile de la distribution de Weibull

$$t_{0,5} = \alpha_w [-\log(0,5)]^{1/\beta} = e^{cR+cF*F_{max}} [-\log(0,5)]^{1/\beta}$$

Les tableaux 5-12, 5-13 et 5-14, dans lesquels les données sont triées selon $t_{0,5}$, présentent le nombre de cycles prédit au 50^e percentile $t_{0,5}$ et ses intervalles de confiance pour chacune des recettes à chacune des charges. Des intervalles de confiance inférieurs ic_{inf} et supérieurs ic_{sup} sont calculés autour du facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w selon la méthode du rapport des vraisemblances à un niveau de confiance de 90% $nc_{0,9}$ en variant le coefficient de recette cR et le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF . Les intervalles de confiance du nombre de cycles prédit au 50^e percentile $t_{0,5}$ sont calculés en utilisant l'équation 5-2 et les intervalles de confiance calculés autour du facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w . Selon ces tableaux, la résistance à la flexion en pied de dent la plus élevée est attribuée à la recette A1 et la plus faible est attribuée à la recette D2.

Tableau 5-12 : Nombre de cycles et intervalles de confiance selon le modèle retenu à 5,4 kN

Recette	α_w			$t_{0,5}$		
	ic_{inf} $nc_{0,9}$	Estimé	ic_{sup} $nc_{0,9}$	ic_{inf} $nc_{0,9}$	Estimé	ic_{sup} $nc_{0,9}$
A3	119 303	137 465	207 862	108 175	124 643	188 473
A2	117 794	130 812	162 940	106 806	118 610	147 741
A4	84 318	110 410	136 161	76 453	100 111	123 460
C1	93 433	106 865	153 437	84 718	96 897	139 125
B1	84 462	98 345	127 064	76 584	89 172	115 212
D2	60 187	81 424	96 797	54 573	73 829	87 768
D1	50 747	72 238	85 375	46 013	65 500	77 411
B2	53 193	70 489	86 610	48 231	63 914	78 531

Tableau 5-13 : Nombre de cycles et intervalles de confiance selon le modèle retenu à 5,8 kN

Recette	α_w			$t_{0,5}$		
	ic_{inf} $nc_{0,9}$	Estimé	ic_{sup} $nc_{0,9}$	ic_{inf} $nc_{0,9}$	Estimé	ic_{sup} $nc_{0,9}$
A1	125 786	151 275	196 893	114 053	137 164	178 527

Tableau 5-14 : Nombre de cycles et intervalles de confiance selon le modèle retenu à 6,4 kN

Recette	α_w			$t_{0,5}$		
	ic_{inf} $nc_{0,9}$	Estimé	ic_{sup} $nc_{0,9}$	ic_{inf} $nc_{0,9}$	Estimé	ic_{sup} $nc_{0,9}$
A1	73 606	84 532	98 938	66 740	76 647	89 709
A3	36 119	52 113	62 920	32 750	47 252	57 051
A2	40 217	49 591	56 762	36 466	44 965	51 467
A4	35 933	41 857	58 043	32 581	37 953	52 629
C1	27 849	40 513	48 650	25 251	36 734	44 112
B1	29 495	37 283	46 632	26 744	33 805	42 282
D2	26 930	30 868	45 934	24 418	27 989	41 649
D1	23 949	27 386	42 996	21 715	24 831	38 985
B2	23 005	26 723	37 459	20 859	24 230	33 965

Les figures 5-1, 5-2 et 5-3 présentent, pour chaque recette, le nombre de cycles des essais, les estimés du nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$, les intervalles de confiance inférieurs ic_{inf} à un niveau de confiance de 90% $nc_{0,9}$ et les intervalles de confiance supérieurs ic_{sup} à un niveau de confiance de 90% $nc_{0,9}$.

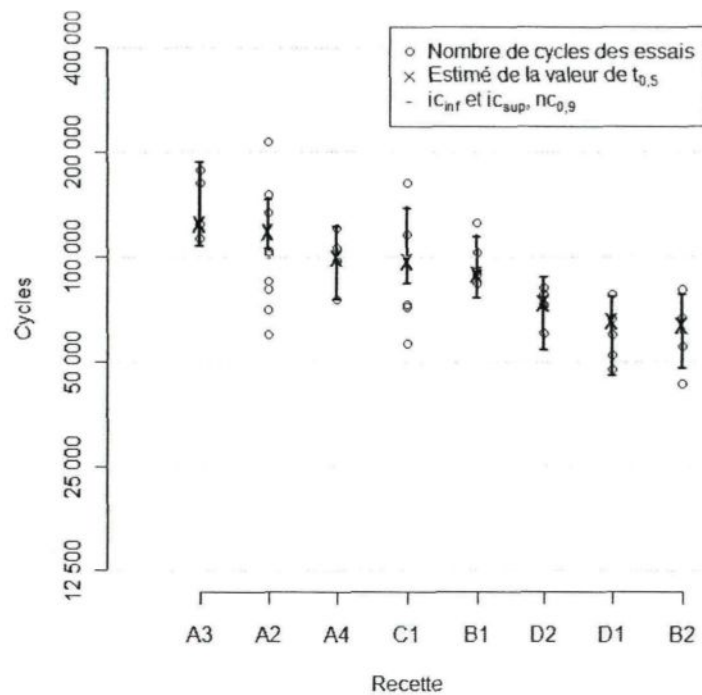


Figure 5-1 : Nombre de cycles des essais à 5,4 kN (recettes triées selon $t_{0.5}$ décroissant)

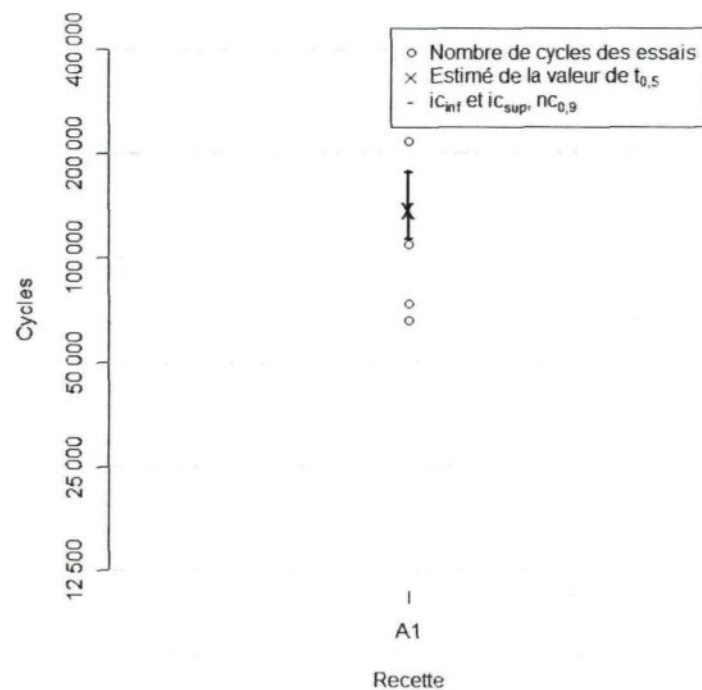


Figure 5-2 : Nombre de cycles des essais à 5,8 kN

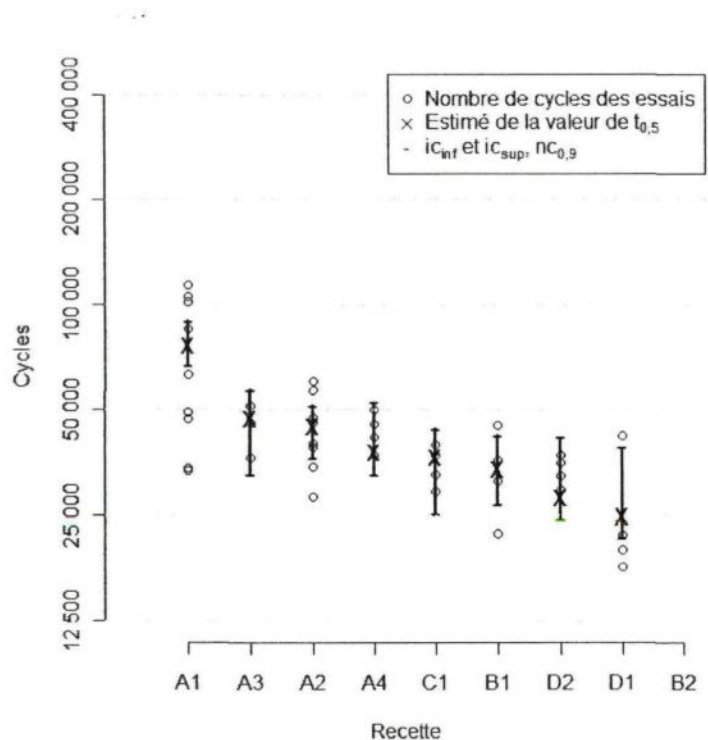


Figure 5-3 : Nombre de cycles des essais à 6,4 kN (recettes triées selon $t_{0.5}$ décroissant)

Les estimés du nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0.5}$ ne sont pas centrés à l'intérieur des intervalles de confiance parce que le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF est contraint à être le même pour toutes les recettes. Le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF est estimé de façon à être optimal pour l'ensemble des données. Ainsi, si l'estimé du nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0.5}$ d'une recette est plus près de l'intervalle de confiance inférieur ic_{inf} à un niveau de confiance de 90% $nc_{0.9}$ à une charge des essais, il est plus près de l'intervalle de confiance supérieur ic_{sup} à un niveau de confiance de 90% $nc_{0.9}$ à l'autre charge, et vice-versa (figures 5-4 à 5-12).

Les figures 5-4 à 5-12 présentent, pour chaque recette individuellement, le nombre de cycles de chaque essai, les estimés du nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0.5}$, les intervalles de confiance inférieurs ic_{inf} et les intervalles de confiance supérieurs ic_{sup}

à un niveau de confiance de 90% $nc_{0,9}$. Dans le calcul statistique, le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF et le coefficient de recette cR utilisés dans le calcul du facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w , sont des variables indépendantes et le nombre de cycles est une variable dépendante. Les figures présentent les cycles en abscisse car c'est de cette façon que les résultats de durée de vie sont présentés en ingénierie. Lors du calcul des intervalles de confiance à l'aide des rapports des vraisemblances, le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF et le coefficient de recette cR sont tous les deux variés. Les intervalles de confiance sont courbes parce que le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF est varié. Les intervalles de confiance seraient des droites si le coefficient de recette cR était varié en gardant le coefficient de force maximale appliquée sur la dent cF constant.

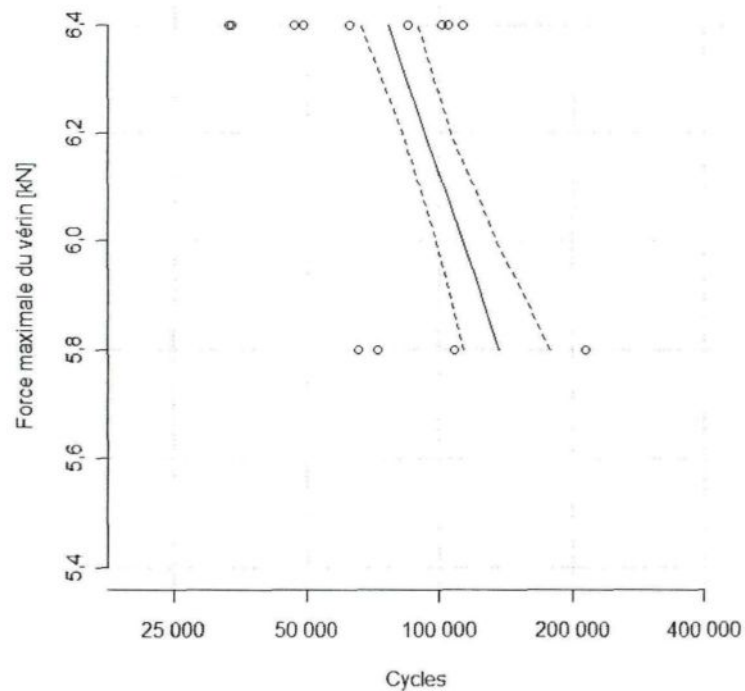


Figure 5-4 : Nombre de cycles de la recette A1

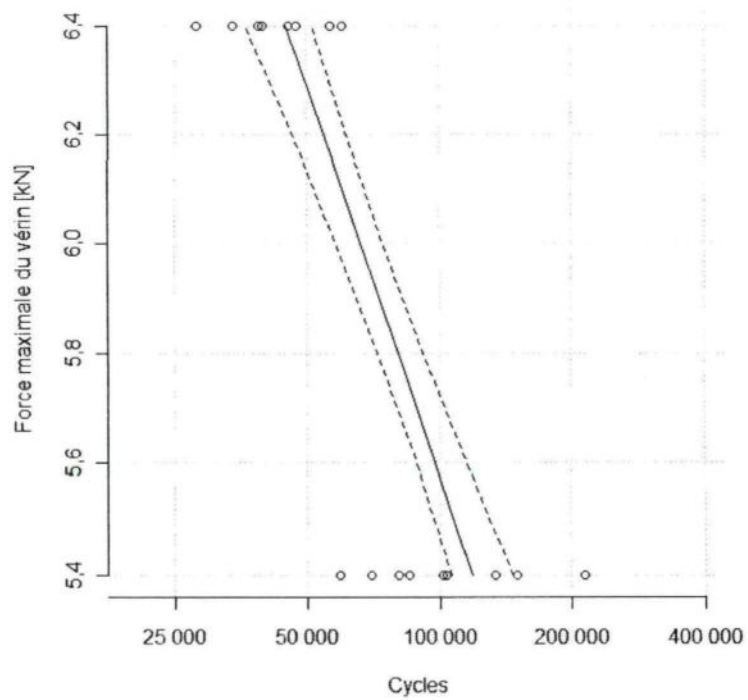


Figure 5-5 : Nombre de cycles de la recette A2

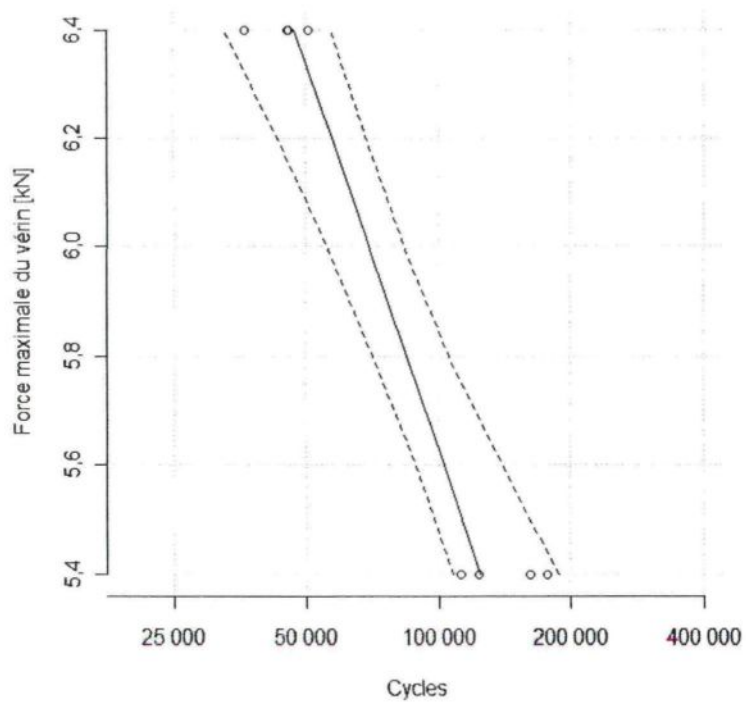


Figure 5-6 : Nombre de cycles de la recette A3

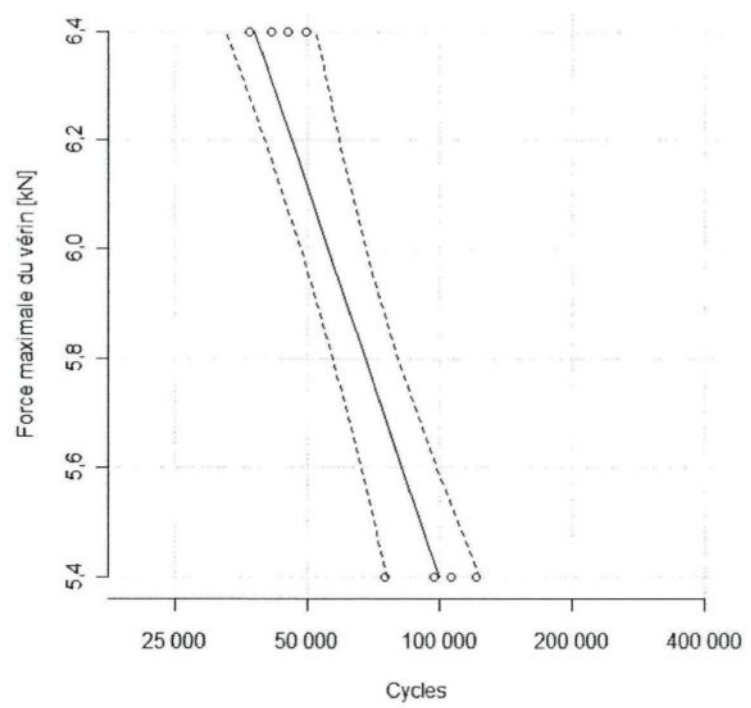


Figure 5-7 : Nombre de cycles de la recette A4

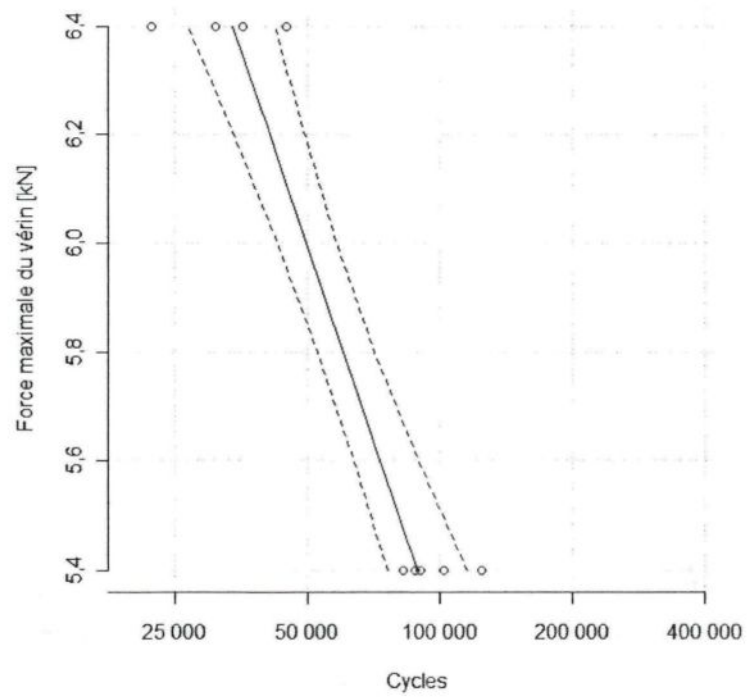


Figure 5-8 : Nombre de cycles de la recette B1

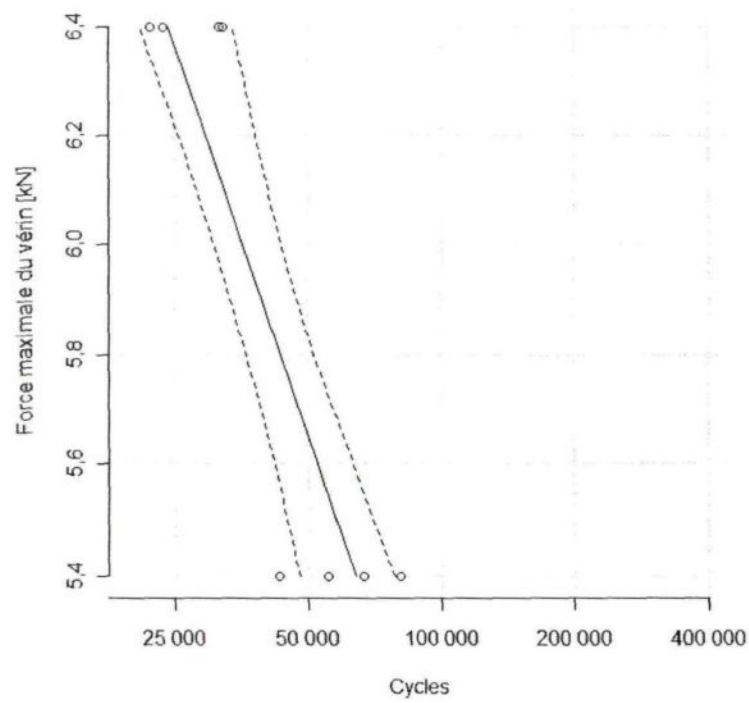


Figure 5-9 : Nombre de cycles de la recette B2

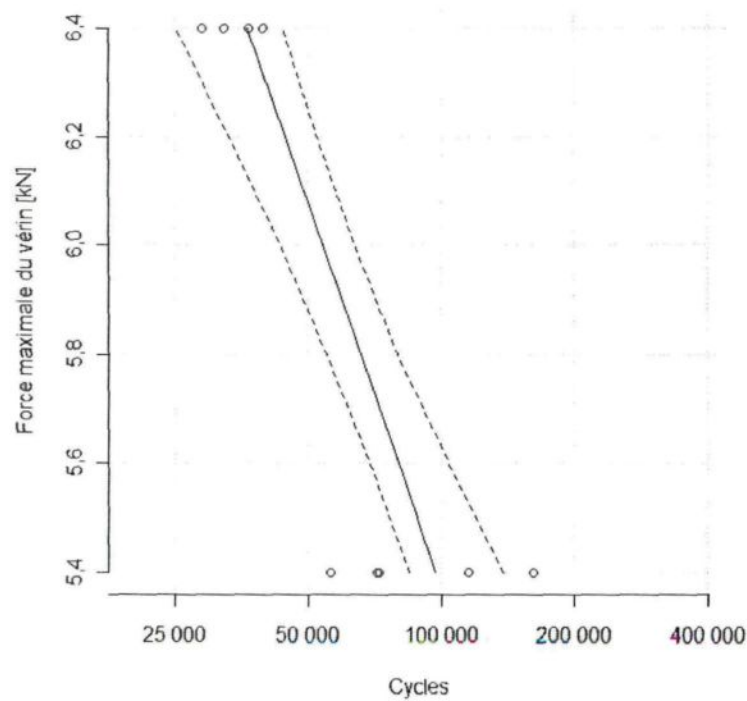


Figure 5-10 : Nombre de cycles de la recette C1

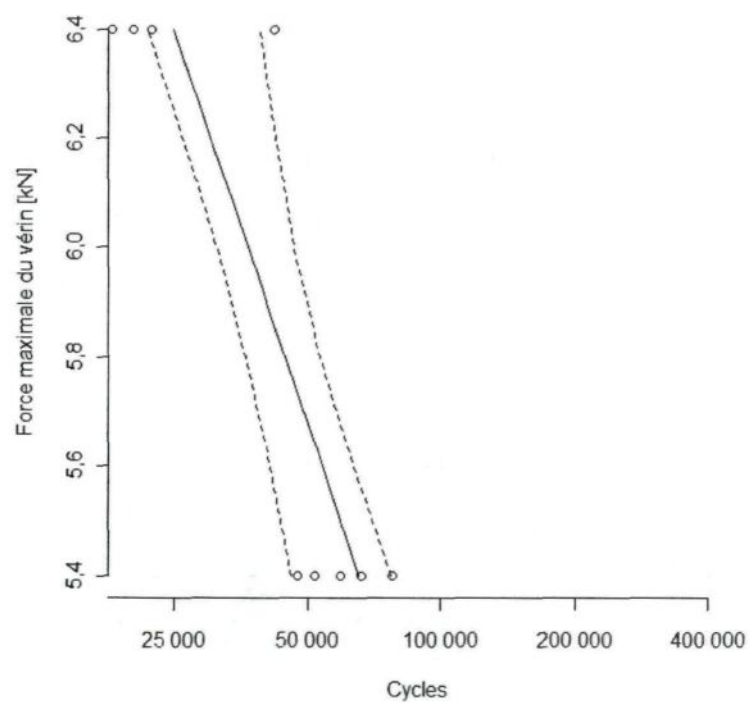


Figure 5-11 : Nombre de cycles de la recette D1

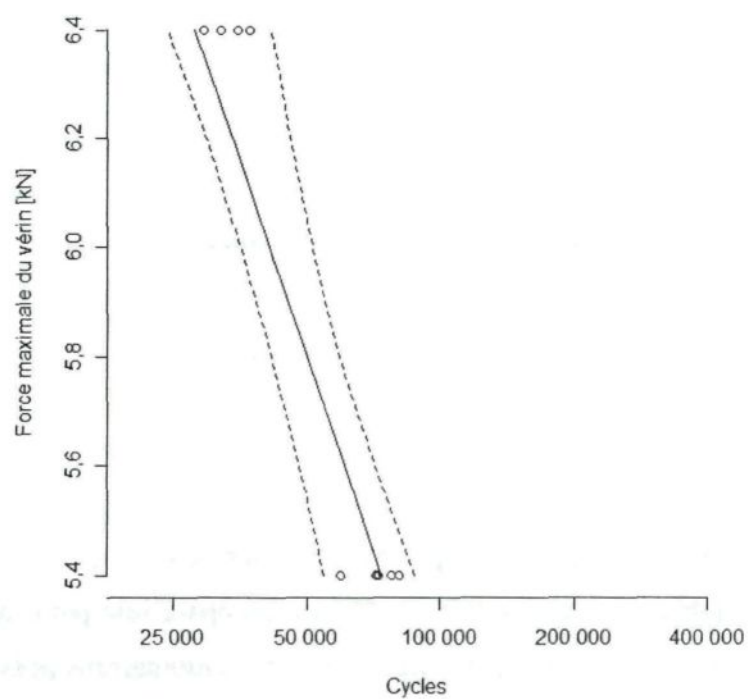


Figure 5-12 : Nombre de cycles de la recette D2

Il est plus facile de comparer les recettes les unes aux autres sur une même figure. La figure 5-13 montre les estimés du nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$ de toutes les recettes. Les intervalles de confiance ne sont pas affichés afin de ne pas encombrer la figure. L'élaboration d'un classement entre les recettes requiert de prendre en compte les intervalles de confiance afin de savoir si les différences entre les courbes de la figure 5-13 sont statistiquement significatives ou non. Cela sera fait à la section suivante.

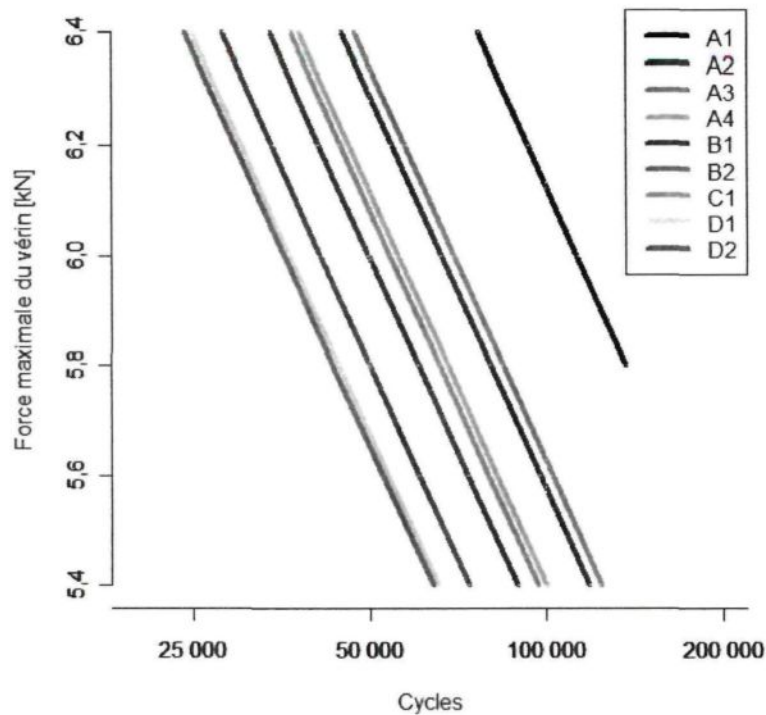


Figure 5-13 : Estimés de la valeur de $t_{0,5}$ de toutes les recettes

5.5 Comparaisons

La première étape consiste à comparer les recettes deux à deux à l'aide du test du rapport des vraisemblances (section 5.5.1). Ce test compare une paire de recettes à la fois et le test doit être répété pour comparer toutes les combinaisons possibles de paires de recettes. Le risque de faire une erreur de type I (rejeter l'hypothèse nulle quand elle

est vraie) augmente en réalisant plusieurs tests. L'hypothèse nulle est qu'il n'y a pas de différence de nombre de cycles entre deux recettes. Rejeter cette hypothèse lorsqu'elle est vraie, signifie de conclure qu'il y a une différence de nombre de cycles entre deux recettes quand il n'y en a pas.

La seconde étape consiste à comparer les recettes deux à deux à l'aide des comparaisons multiples de Tukey (section 5.5.2). Ce test compare toutes les combinaisons possibles de paires de recettes et apporte une correction pour diminuer le risque de commettre une erreur de type I.

L'étape suivante est de faire une synthèse des résultats obtenus par les deux méthodes de comparaison (section 5.5.3). Trois cas de figure sont possibles.

1. La différence entre deux recettes est non statistiquement significative pour les deux tests.
2. La différence entre deux recettes est statistiquement significative pour les deux tests.
3. La différence entre deux recettes est statistiquement significative pour un test, mais non statistiquement significative pour l'autre test.

Deux types de tests (rapport des vraisemblances et comparaisons multiples de Tukey) sont réalisés au lieu d'un seul afin de détecter le troisième cas de figure mentionné. Ce résultat est interprété comme voulant dire qu'il manque de données pour pouvoir affirmer hors de tout doute que la différence est statistiquement significative ou non. Un plus grand nombre d'essais est alors requis.

Lorsque la différence entre deux recettes est non statistiquement significative, cela signifie que les intervalles de confiance sont trop larges par rapport à la différence entre les recettes pour détecter une différence statistiquement significative. Des essais supplémentaires sont requis pour que la différence devienne statistiquement

significative. La section 5.5.4 présente les résultats d'une simulation du nombre d'essais requis pour détecter une différence entre les recettes. Les données de cette section peuvent être utilisées pour planifier des essais supplémentaires sur les recettes de façon à ne pas gaspiller des ressources si le nombre d'essais requis pour rendre une différence entre deux recettes statistiquement significative s'avère trop élevé en pratique.

5.5.1 Comparaisons selon les tests du rapport des vraisemblances

Des tests du rapport des vraisemblances sont effectués pour toutes les combinaisons de paires des recettes possibles. Le tableau 5-15 présente les résultats des tests effectués à un niveau de confiance de 90% $\alpha_{0,9}$. Dans ce tableau, les recettes sont classées par ordre de performance en flexion simple, soit l'ordre des courbes de la figure 5-13.

Tableau 5-15 : Différences statistiquement significatives ou non (vraisemblance)

		Recette								
		A1	A3	A2	A4	C1	B1	D2	D1	B2
Recette	A1		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	A3			Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
	A2				Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
	A4					Non	Non	Oui	Oui	Oui
	C1						Non	Oui	Oui	Oui
	B1							Non	Oui	Oui
	D2								Non	Non
	D1									Non
	B2									
Oui		la différence est statistiquement significative								
Non		la différence est non statistiquement significative								

L'analyse de ce tableau permet de réaliser un classement des recettes les unes par rapport aux autres (tableaux 5-16 à 5-24).

Tableau 5-16 : Classement des recettes selon A1

Classement	Recettes
Supérieur à A1	aucune
Égal à A1	aucune
Inférieur à A1	A3, A2, A4, C1, B1, D2, D1, B2

Tableau 5-17 : Classement des recettes selon A3

Classement	Recettes
Supérieur à A3	A1
Égal à A3	A2, A4, C1
Inférieur à A3	B1, D2, D1, B2

Tableau 5-18 : Classement des recettes selon A2

Classement	Recettes
Supérieur à A2	A1
Égal à A2	A3, A4, C1
Inférieur à A2	B1, D2, D1, B2

Tableau 5-19 : Classement des recettes selon A4

Classement	Recettes
Supérieur à A4	A1
Égal à A4	A3, A2, C1, B1
Inférieur à A4	D2, D1, B2

Tableau 5-20 : Classement des recettes selon C1

Classement	Recettes
Supérieur à C1	A1
Égal à C1	A3, A2, A4, B1
Inférieur à C1	D2, D1, B2

Tableau 5-21 : Classement des recettes selon B1

Classement	Recettes
Supérieur à B1	A1, A3, A2
Égal à B1	A4, C1, D2
Inférieur à B1	D1, B2

Tableau 5-22 : Classement des recettes selon D2

Classement	Recettes
Supérieur à D2	A1, A3, A3, A4, C1
Égal à D2	B1, D1, B2
Inférieur à D2	aucune

Tableau 5-23 : Classement des recettes selon D1

Classement	Recettes
Supérieur à D1	A1, A3, A2, A4, C1, B1
Égal à D1	D2, B2
Inférieur à D1	aucune

Tableau 5-24 : Classement des recettes selon B2

Classement	Recettes
Supérieur à B2	A1, A3, A2, A4, C1, B1
Égal à B2	D2, D1
Inférieur à B2	aucune

Le tableau 5-25 présente un classement fait à partir des tableaux 5-16 à 5-24.

Tableau 5-25 : Classement des recettes

Classement	Recettes
1	A1
2	A3, A2
3	A4, C1
4	B1
5	D2
6	D1, B2

5.5.2 Comparaisons multiples de Tukey

Des comparaisons multiples de Tukey sont effectuées pour toutes les combinaisons de paires des recettes possibles. Le tableau 5-26 présente les résultats du test effectué à un niveau de confiance de 90% $\alpha_{0,9}$. Dans ce tableau, les recettes sont classées par ordre de performance en flexion simple, soit l'ordre des courbes de la figure 5-13.

Tableau 5-26 : Différences statistiquement significatives ou non (Tukey)

		Recette								
		A1	A3	A2	A4	C1	B1	D2	D1	B2
Recette	A1		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	A3			Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
	A2				Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
	A4					Non	Non	Non	Oui	Oui
	C1						Non	Non	Oui	Oui
	B1							Non	Non	Non
	D2								Non	Non
	D1									Non
	B2									
Oui		la différence est statistiquement significative								
Non		la différence est non statistiquement significative								

L'analyse de ce tableau permet de réaliser un classement des recettes les unes par rapport aux autres (tableaux 5-27 à 5-35).

Tableau 5-27 : Classement des recettes selon A1

Classement	Recettes
Supérieur à A1	aucune
Égal à A1	aucune
Inférieur à A1	A3, A2, A4, C1, B1, D2, D1, B2

Tableau 5-28 : Classement des recettes selon A3

Classement	Recettes
Supérieur à A3	A1
Égal à A3	A2, A4, C1, B1
Inférieur à A3	D2, D1, B2

Tableau 5-29 : Classement des recettes selon A2

Classement	Recettes
Supérieur à A2	A1
Égal à A2	A2, A4, C1, B1
Inférieur à A2	D2, D1, B2

Tableau 5-30 : Classement des recettes selon A4

Classement	Recettes
Supérieur à A4	A1
Égal à A4	A3, A2, C1, B1, D2
Inférieur à A4	D1, B2

Tableau 5-31 : Classement des recettes selon C1

Classement	Recettes
Supérieur à C1	A1
Égal à C1	A3, A2, A4, B1, D2
Inférieur à C1	D1, B2

Tableau 5-32 : Classement des recettes selon B1

Classement	Recettes
Supérieur à B1	A1
Égal à B1	A3, A2, A4, C1, D2, D1, B2
Inférieur à B1	aucune

Tableau 5-33 : Classement des recettes selon D2

Classement	Recettes
Supérieur à D2	A1, A3, A2
Égal à D2	A4, C1, B1, D1, B2
Inférieur à D2	aucune

Tableau 5-34 : Classement des recettes selon D1

Classement	Recettes
Supérieur à D1	A1, A3, A2, A4, C1
Égal à D1	B1, D2, B2
Inférieur à D1	aucune

Tableau 5-35 : Classement des recettes selon B2

Classement	Recettes
Supérieur à B2	A1, A3, A2, A4, C1
Égal à B2	B1, D2, B2
Inférieur à B2	aucune

Le tableau 5-36 présente un classement fait à partir des tableaux 5-27 à 5-35.

Tableau 5-36 : Classement des recettes

Classement	Recettes
1	A1
2	A3, A2
3	A4, C1
4	B1
5	D2
6	D1, B2

Le tableau 5-36 et le tableau 5-25 sont identiques. Donc, les comparaisons selon les tests du rapport des vraisemblances et les comparaisons de Tukey arrivent au même classement des recettes.

5.5.3 Synthèse des deux méthodes de comparaison

L'analyse des données montre que les trois cas de figure exposés à la section 5.5 surviennent. Le tableau 5-37 résume l'information sur les trois cas de figure. La différence entre les deux méthodes de comparaison est que la méthode du rapport des vraisemblances trouve plus de différences statistiquement significatives que la méthode des comparaisons de Tukey.

Tableau 5-37 : Différences statistiquement significatives ou non

		Recette								
		A1	A3	A2	A4	C1	B1	D2	D1	B2
Recette	A1		2	2	2	2	2	2	2	2
	A3			1	1	1	3	2	2	2
	A2				1	1	3	2	2	2
	A4					1	1	3	2	2
	C1						1	3	2	2
	B1							1	3	3
	D2								3	3
	D1									3
	B2									
1		différences non statistiquement significatives selon les deux tests								
2		différences statistiquement significatives selon les deux tests								
3		différences non statistiquement significatives selon le test de Tukey et statistiquement significatives selon le test du maximum des vraisemblances								

5.5.4 Simulation du nombre d'essais à réaliser

Le nombre d'essais requis pour que les différences entre toutes les combinaisons de paires de recettes dont les différences sont statistiquement non significatives selon les deux méthodes de comparaison dans le tableau 5-37 deviennent statistiquement significatives sont calculés par simulation en utilisant le test du rapport des vraisemblances à un niveau de confiance de 90% $nc_{0,9}$. L'hypothèse est faite que les

estimés du nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$ restent les mêmes calculés précédemment. La simulation emploie forces maximales appliquées sur la dent F_{\max} et le même nombre d'essais à chacune des forces maximales appliquées sur la dent F_{\max} . Le tableau 5-38 donne le nombre d'essais requis en moyenne pour une force maximale appliquée sur la dent F_{\max} de 5,4 kN (chiffre de gauche) et de 6,4 kN (chiffre de droite) pour que la différence entre deux recettes statistiquement non significative dans le tableau 5-37 devienne statistiquement significative. Puisque deux recettes sont comparées, le nombre d'essais calculé doit être réalisé sur chacune des deux recettes. Le nombre d'essais requis est simulé 10 000 fois en utilisant les paramètres du modèle retenu et c'est la moyenne de ces 10 000 résultats qui est donnée. Le nombre requis n'est pas calculé lorsqu'il dépasse 45 essais. En effet, plus la différence entre deux recettes est faible et plus le nombre d'essais requis pour détecter une différence statistiquement significative est grand. Une différence entre deux recettes peut être pratiquement non significative. Cela signifie qu'en pratique, il n'est pas utile de savoir si la différence existe parce qu'elle est trop petite pour faire une différence lors de l'utilisation du produit. Ainsi, deux recettes pratiquement non significatives sont équivalentes du point de vue de la résistance à la flexion en pied de dent. Ainsi, il est décidé que la différence de toute paire de recettes requérant plus de 45 essais est trop faible pour être pratiquement significative et elle est donc pratiquement non significative.

Tableau 5-38 : Nombre d'essais requis en moyenne

		Recette								
		A1	A3	A2	A4	C1	B1	D2	D1	B2
Recette	A1		-	-	-	-	-	-	-	-
	A3			>45/>45	8/8	6/6	-	-	-	-
	A2				14/14	10/10	-	-	-	-
	A4					>45/>45	27/27	-	-	-
	C1						>45/>45	-	-	-
	B1							11/11	-	-
	D2								27/27	19/19
	D1									>45/>45
	B2									

Le nombre d'essais supplémentaire à réaliser (tableau 5-39) se calcule en soustrayant le nombre d'essais du tableau 5-38 au nombre d'essais déjà réalisés (tableaux 4-6 et 4-8).

Tableau 5-39 : Nombre d'essais supplémentaires requis

		Recette								
		A1	A3	A2	A4	C1	B1	D2	D1	B2
Recette	A1		-	-	-	-	-	-	-	-
	A3			>45/ >45	A3 4/4 A4 4/4	A3 2/2 C1 1/2	-	-	-	-
	A2				A2 5/6 A4 10/10	A2 1/2 C1 5/6	-	-	-	-
	A4					>45/>45	A4 23/23 B1 22/23	-	-	-
	C1						>45/>45	-	-	-
	B1							B1 6/7 D2 6/7	-	-
	D2								D2 22/23 D1 22/23	D2 14/15 B2 15/15
	D1									>45/>45
	B2									

Les données du tableau 5-39 donnent une idée du nombre d'essais à réaliser s'il était souhaité de détecter des différences statistiquement significatives entre certaines

recettes. Comme le calcul est basé sur les rapports des vraisemblances, un nombre d'essais légèrement supérieur serait requis afin que les différences soient également détectées statistiquement significative avec les comparaisons multiples de Tukey. De plus, comme les résultats sont basés sur la supposition que les estimés du nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$ ne varient pas et que cette supposition peut être fausse, le nombre d'essais requis pourrait être différent de celui calculé mais cela donne un bon ordre d'idée.

5.6 Discussion des résultats

La section 5.6.1 compare les résultats des essais des recettes de classe A et des recettes de classe D. La section 5.6.2 discute de la recette B2 et de sa profondeur durcie insuffisante. La section 5.6.3 porte sur la profondeur durcie de la tangente à 30 ° et son influence sur le nombre de cycles des essais. La section 5.6.4 présente la profondeur durcie recommandée pour la cémentation et la compare à celle établie pour l'induction à la section précédente. La section 5.6.5 fournit une comparaison des profondeurs durcies de quatre recettes similaires. La section 5.6.6 traite de la recette A1, la recette ayant la plus grande résistance à la flexion selon les essais.

5.6.1 Recettes de classe A versus classe D

La première chose à remarquer dans le classement est que les recettes de classe A sont classées aux trois premières positions et que les recettes de classe D sont classées aux deux dernières. Il en est conclu qu'en règle générale, les recettes de durcissement de contour ont une plus grande résistance à la flexion en pied de dent que les recettes de durcissement à travers. La vérification de l'hypothèse qu'un durcissement de contour améliore plus la résistance à la flexion en pied de dent qu'un durcissement à cœur fait partie des objectifs (section 1.3) et les résultats confirment cette hypothèse.

La profondeur durcie en pied de dent à mi-largeur de denture est plus faible pour les recettes de classe A que pour les recettes de classe D. Il est supposé que dans les deux cas, la profondeur est suffisante pour augmenter la résistance à la flexion en pied de dent. Ainsi, l'hypothèse envisagée pour expliquer la différence de résistance à la flexion en pied de dent entre les recettes de classe A et D est que la profondeur durcie des recettes A est plus optimale pour générer des profils des contraintes résiduelles qui améliorent la résistance à la flexion. Cette hypothèse a préalablement été présentée à la section 2.3.1.

5.6.2 Recette B2 et chauffe en séquentiel ou en simultané

La recette B2 est classée en sixième position. Ce résultat s'explique par une profondeur durcie insuffisante en pied de dent. Cette recette est celle ayant la plus faible profondeur durcie en creux de dent à mi-denture (tableau 4-18) et la plus faible profondeur durcie de la tangente à 30 ° (tableau 4-19) de toutes les recettes développées.

L'hypothèse envisagée pour expliquer la très faible profondeur durcie en pied de dent de la recette B2, malgré des quantités d'énergie fournies en MF et HF supérieures à celles de la recette A1 (tableau 4-5), est que la quantité d'énergie dissipée vers le cœur était plus importante pour la recette B2 à cause du délai supplémentaire entre la fin de la chauffe en MF et la douche de refroidissement.

Il serait intéressant de développer trois recettes afin d'améliorer les connaissances par rapport aux différences apportées par l'utilisation d'une chauffe en séquentiel comparativement à une chauffe en simultané. Ces trois recettes utiliseraient les mêmes puissances de chauffe et les mêmes temps de chauffe à chaque fréquence de chauffe. Elles utiliseraient également les mêmes préchauffes. La chauffe finale de la première recette serait réalisée en séquentiel en débutant par une chauffe en MF et en terminant par une chauffe en HF. La chauffe finale de la deuxième recette serait réalisée en

séquentiel en débutant par une chauffe en HF et en terminant par une chauffe en MF. La chauffe finale de la troisième recette serait réalisée en simultané. Ces trois recettes permettraient d'étudier l'effet de dissipation de la chaleur en fonction du type de chauffe finale.

5.6.3 Profondeur durcie de la tangente à 30°

À la section 3.5.3, l'hypothèse a été émise que, même si ce n'est pas le seul paramètre, la profondeur durcie de la tangente à 30° a une influence importante sur la résistance à la flexion. L'hypothèse qu'il existe une plage de profondeur durcie de la tangente à 30° optimale pour améliorer la résistance à la flexion est émise. La figure 5-14 est tracée afin de vérifier cette hypothèse.

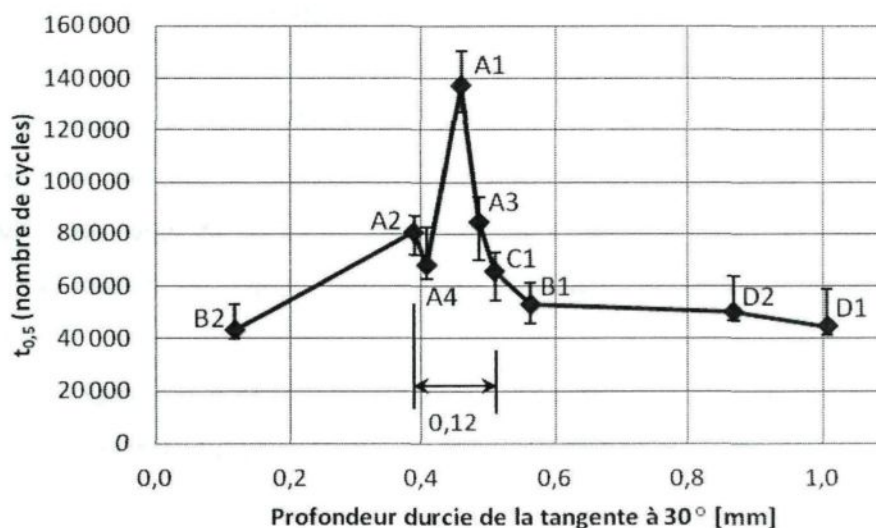


Figure 5-14 : Nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$ à une charge de 5,8 kN en fonction de la profondeur durcie de la tangente à 30° (barres d'erreurs = ic_{inf} et ic_{sup} à $nc_{0,9}$)

Le tableau 5-36 classe les neuf recettes étudiées en fonction de leur résistance à la flexion. Les recettes A1, A2, A3, A4 et C1 sont parmi les recettes classées en première, deuxième et troisième position. Ces recettes ont des profondeurs durcies de la tangente à

30 ° incluses dans la plage de 0,39 mm à 0,51 mm (tableau 4-19). Cette plage a une largeur de 0,12 mm (figure 5-14). Les recettes ayant des profondeurs durcies de la tangente à 30 ° en dehors de cette plage sont les recettes B1, B2, D1 et D2. Ces recettes sont parmi les recettes classées en quatrième, cinquième et sixième position. L'hypothèse qu'il existe une plage de profondeur durcie de la tangente à 30 ° optimale pour améliorer la résistance à la flexion est retenue. La plage obtenue lors de cette étude est de 0,39 mm à 0,51 mm.

5.6.4 Profondeur durcie recommandée

La plage de valeurs recommandées, après finition de la denture, pour la profondeur de cémentation afin d'éviter toute rupture en pied de dent dans la norme ISO 6336 (Iso 6336-5:2003, 2003) est de 0,1 à 0,2 fois le module normal en millimètres. Comme présenté au tableau 3-3, le module normal des roues utilisées est de 2,1167 mm. Ainsi, la plage recommandée pour la cémentation est d'environ 0,22 mm à 0,42 mm. Selon la norme, cette profondeur durcie est mesurée une saillie sous le cercle de tête à la profondeur où la dureté atteint 550 HV. Puisque la profondeur durcie est approximativement la même en tout point du profil pour une roue traitée par cémentation, la profondeur mesurée une saillie sous le cercle de tête est approximativement la même que celle mesurée à la tangente à 30°. La figure 5-15 montre la plage de profondeur durcie pour la cémentation selon la norme ISO 6336 et la plage de profondeur durcie pour l'induction thermique établie à la section précédente.

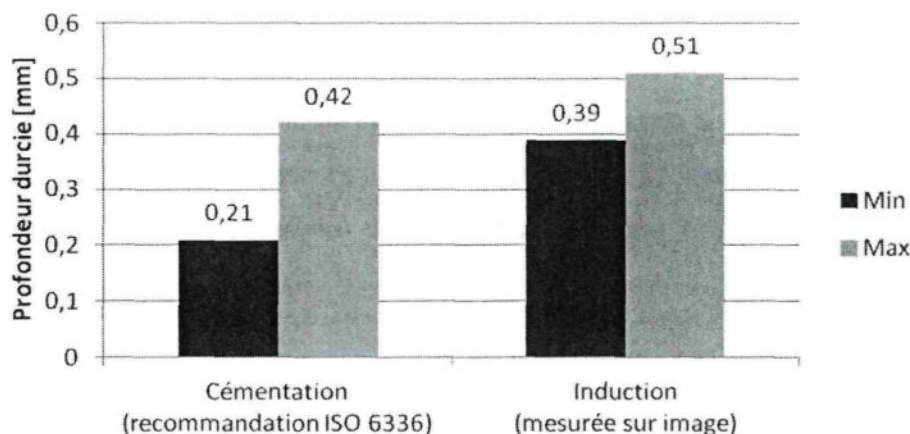


Figure 5-15 : Plage de valeurs pour la cémentation et l'induction thermique

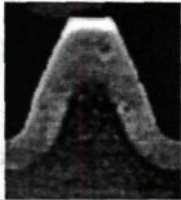
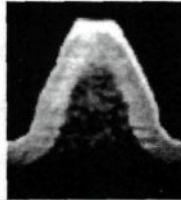
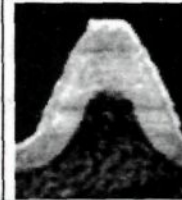
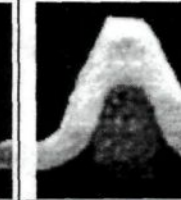
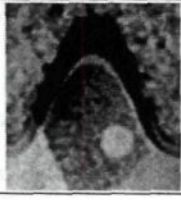
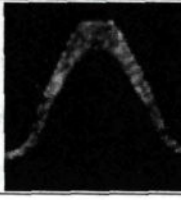
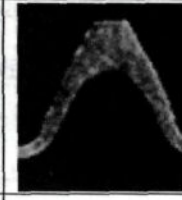
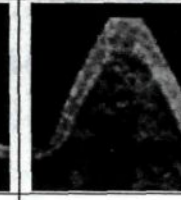
Les profondeurs durcies minimales et maximales établies pour l'induction thermique sont légèrement supérieures à celles recommandées pour la cémentation. Il est à noter que la méthode de mesure et le critère de mesure utilisé pour définir la profondeur durcie ne sont pas les mêmes dans les deux cas. La mesure pour la cémentation se fait par microdureté à 550 HV (Iso 6336-5:2003, 2003) tandis que la mesure pour l'induction thermique a été réalisée visuellement à une dureté inconnue située entre 344 et 610 HV (section 3.5.3). La méthode de mesure visuelle est moins précise que la méthode de mesure par microdureté. Pour ces raisons, les mesures pour l'induction thermique seraient légèrement différentes si elles étaient réalisées par microdureté à 550 HV.

Il est également à noter que le positionnement du point le plus contraint en tension au point de la tangente à 30° (figure 3-9) est une approximation. Dans le cas où la position réelle du point le plus contraint en flexion serait connue, la mesure de la profondeur durcie pour l'induction thermique devrait être déplacée en ce point, ce qui changerait quelque peu la plage de profondeur durcie recommandée pour l'induction (figure 5-15).

5.6.5 Variation de la puissance en moyenne fréquence MF

Il est intéressant de comparer les profondeurs durcies et profondeurs durcies de la tangente à 30 ° des recettes A2, A4, B1 et A3, car leurs paramètres machine sont tous les mêmes à l'exception de la puissance en moyenne fréquence MF de la chauffe finale (tableau 5-40).

Tableau 5-40 : Recettes similaires à l'exception de la puissance moyenne

		Roue dentée			
		A2-2	A4-1	B1-1	A3-1
Puissance en MF [kW]		81	95	100	110
Photos	Face avant				
	Mi-denture				
Profondeur durcie [mm]	Tête, moyenne des deux faces	1,82	1,45	2,42	1,87
	Tête, mi-denture	1,69	1,50	2,10	1,74
	Creux, moyenne des deux faces	1,08	1,16	1,19	1,22
	Creux, mi-denture	0,49	0,48	0,62	0,53
	Tangente 30°	0,39	0,41	0,56	0,49

Les quatre recettes sont présentées en ordre croissant d'augmentation de la puissance en MF. En théorie, plus la puissance est grande et plus la profondeur durcie est grande. Ainsi, le résultat attendu de l'utilisation d'une puissance MF de plus en plus

élevée en conservant les autres paramètres constants est une augmentation de la profondeur durcie d'une recette à l'autre. Cependant, ce n'est pas ce qui est observé. Les profondeurs durcies de la roue dentée B1-1 sont légèrement plus élevées que prévu et la cause en est inconnue.

5.6.6 Recette A1

Les figures 4-5 à 4-8 sont utiles pour comparer les recettes entre elles selon l'énergie fournie lors du traitement d'induction thermique. Selon le classement du tableau 5-36, la recette A1 est en première position. Il est intéressant d'observer qu'au niveau de l'énergie fournie, la recette A1 est similaire aux recettes A2, A4, B1 et A3. Les profondeurs durcies en divers points de la recette A1 sont d'un même ordre de grandeur que celles des ces quatre recettes. Au niveau des paramètres machine et de la quantité d'énergie fournie, les facteurs qui différencient la recette A1 de ces quatre autres recettes sont les suivants.

1. La durée de la chauffe finale de la recette A1 est plus longue.
2. La quantité totale d'énergie fournie en MF à la recette A1 est plus élevée.
3. La quantité totale d'énergie fournie en HF à la recette A1 est plus faible.

Il serait intéressant de développer des recettes en se basant sur la recette A1. Le tableau 5-41 montre quelques suggestions de recettes basées sur la recette A1. Ces recettes suggérées utilisent toutes la même préchauffe que la recette A1 :

Tableau 5-41 : Changement des paramètres comparativement à la recette A1

Recette	Durée de la chauffe finale	Puissance	Profondeur durcie
1	Plus long	Même	Plus élevée
2	Plus long	MF et HF plus faibles	Même profondeur
3	Même	MF plus élevée	Plus élevée
4	Même	HF plus faible	Plus faible

Ces suggestions sont liées aux trois facteurs mentionnés. La première recette suggérée est liée au premier facteur. Cette recette servirait à vérifier si la résistance à la flexion augmenterait encore plus en augmentant davantage le temps de chauffe finale et donc la profondeur durcie en creux et en tête de dent.

La deuxième recette suggérée est également liée au premier facteur. La puissance serait diminuée et le temps serait augmenté, de façon à garder la quantité d'énergie totale fournie identique ou presque à celle de la recette A1. La diminution de la puissance en même temps que l'augmentation du temps de chauffe permettrait d'expérimenter avec un plus long temps de chauffe sans augmenter considérablement la profondeur durcie.

La troisième recette suggérée est liée au deuxième facteur. Cette recette servirait à vérifier si la résistance à la flexion augmenterait encore plus en augmentant davantage la puissance de chauffe en MF. Là aussi on s'attend à ce que la profondeur durcie soit plus élevée.

Finalement, la quatrième recette suggérée est liée au troisième facteur. Cette recette servirait à vérifier si la résistance à la flexion augmenterait encore plus en diminuant davantage la puissance HF.

CHAPITRE 6

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

La conclusion fait un retour sur la problématique, les objectifs, la méthodologie, les recettes développées, les essais réalisés et les résultats obtenus. Elle se termine par une discussion au sujet de l'atteinte des objectifs et des suites à donner au projet.

Problématique

La tendance actuelle de l'industrie aérospatiale est de rechercher des moyens de diminuer les émissions polluantes générées par la fabrication et le fonctionnement de leurs produits. Les moteurs d'avion contiennent des engrenages. Le traitement thermique de ces engrenages est une étape importante du procédé de fabrication, car il améliore la résistance à la flexion en pied de dent des engrenages. L'amélioration de la résistance à la flexion en pied de dent permet l'emploi d'engrenages plus légers. Des engrenages plus légers contribuent à diminuer les émissions polluantes des moteurs. Ainsi, le choix judicieux du traitement thermique permet de répondre au défi de produire des moteurs plus légers et plus économes en carburant.

La résistance à la flexion en pied de dent d'une roue dentée dépend de ses profils de dureté et de ses profils des contraintes résiduelles. Un traitement thermique par induction appliqué à une roue dentée modifie ses profils de dureté et ses profils des contraintes résiduelles.

Objectifs

L'objectif principal du projet consiste à étudier expérimentalement la résistance à la flexion en pied de dent de roues droites cylindriques ayant subi un durcissement de

contour par induction thermique. Cela requiert d'étudier les liens possibles entre la durée de vie, les recettes, les profils de dureté et les profils des contraintes résiduelles. L'étude des profils des contraintes résiduelles ne fait pas partie des objectifs. Le mémoire a aussi exploré l'hypothèse qu'un durcissement de contour améliore plus la résistance à la flexion en pied de dent qu'un durcissement à cœur, ainsi que l'hypothèse que plusieurs recettes peuvent mener au même profil de dureté tout en générant des profils des contraintes résiduelles différents.

Méthodologie

Des roues dentées sont d'abord fabriquées. Elles sont par la suite traitées thermiquement par induction selon neuf recettes. Les recettes ont des durées de chauffe et des puissances de chauffe qui varient à deux fréquences de chauffe. Les roues dentées traitées thermiquement par induction sont soumises à des essais en flexion simple à deux niveaux de charge par recette. Après les essais, les longueurs des fissures sont mesurées. Les roues sont par la suite coupées à quelques endroits définis et la profondeur durcie, ainsi que la profondeur durcie de la tangente à 30 ° sont mesurées. Ensuite, les résultats des essais de flexion simple sont étudiés et discutée. Des modèles du nombre de cycles en fonction de la recette et de la charge sont développés et utilisés pour classer les recettes les unes par rapport aux autres selon leur résistance à la flexion en pied de dent.

Recettes développées et essais réalisés

Les recettes sont nommées en fonction de la profondeur durcie à la tête. Pour les recettes de classe A, B, C et D, les profondeurs durcies en tête de dent sont respectivement très peu profonde, peu profonde, profonde et très profonde. Afin de répondre au troisième objectif, il était souhaité que les recettes aient toutes la même profondeur durcie en creux de dent. La figure 4-38 montre que les profondeurs durcies

en creux de dent à mi-denture sont différentes les unes des autres mais que la majorité des profondeurs durcies sont situées dans une plage étroite de valeurs.

Des essais de flexion simple ont été réalisés sur 91 dents de 11 roues dentées traitées selon neuf recettes (A1, A2, A3, A4, B1, B2, C1, D1, D2). Pour chaque recette, les essais ont été réalisés à deux niveaux de charge et quatre à neuf essais ont été réalisés à chaque charge. Cette quantité de répétition à chaque charge est adéquate pour un projet de recherche de type exploratoire.

Résultats obtenus

Le nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$ et des intervalles de confiance autour de cette valeur sont estimés pour chacune des neuf recettes à chacune des charges des essais. Lorsque la différence entre le nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$ de deux recettes est trop faible par rapport à la largeur des intervalles de confiance, la différence entre les recettes est non statistiquement significative. À l'opposé, lorsque la différence entre le nombre de cycles prédit au 50e percentile $t_{0,5}$ de deux recettes est suffisamment élevée par rapport à la largeur des intervalles de confiance, la différence entre les recettes est statistiquement significative.

La comparaison par paire de neuf recettes requiert de réaliser trente-six comparaisons. Pour approximativement la moitié de ces comparaisons, les différences entre les recettes sont jugées statistiquement significatives. Puisqu'il avait été choisi d'étudier un grand nombre de recettes avec peu de répétitions (section 3.9), il était anticipé que les intervalles de confiance seraient larges et que les différences entre les recettes ne seraient pas toutes statistiquement significatives.

Les recettes de classe A sont des recettes de durcissement de contour et les recettes de classe D sont des recettes de durcissement à cœur. Les recettes ayant la résistance à la

flexion la plus élevée sont les recettes de classe A et celles ayant la résistance à la flexion la plus faible sont celles de classe D. L'hypothèse retenue pour expliquer cela est que les recettes de classe A bénéficient de contraintes résiduelles bénéfiques plus élevées que les recettes de classe D.

De toutes les recettes étudiées, la recette A1 est celle ayant la plus grande résistance à la flexion en pied de dent. Il est donc supposé que cette recette est celle possédant la combinaison de profondeurs durcies et contraintes résiduelles la plus optimale de toutes les recettes pour améliorer la résistance à la flexion en pied de dent.

L'hypothèse a été émise que la profondeur durcie de la tangente à 30° est un facteur qui influence la résistance à la flexion en pied de dent. Il a été supposé qu'il existe une plage de profondeur durcie de la tangente à 30 ° optimale pour améliorer la résistance à la flexion. Une telle plage a été trouvée lors de la présente étude et la profondeur durcie de la tangente à 30 ° de la recette A1 se trouve au centre de cette plage.

En règle générale, plus la quantité d'énergie fournie est élevée et plus la profondeur durcie est élevée. Ainsi, pour un même temps de chauffe, plus la puissance est élevée et plus la profondeur durcie est élevée. Il arrive que ce ne soit pas le cas. Par exemple, la puissance en MF de la recette A3-1 est plus élevée que celle de la recette B1-1 mais c'est la recette B1-1 qui a la profondeur à la tête la plus élevée. La cause de ce phénomène est inconnue.

Au niveau des courbes de l'énergie fournie pendant le traitement par induction thermique, les recettes A2, A4, B1 et A3 sont celles dont les courbes se rapprochent le plus de la courbe de la recette A1, qui est celle ayant la plus grande résistance à la flexion en pied dent. Il ressort de la comparaison de ces courbes que la recette A1 utilise

une chauffe finale plus longue, qu'elle utilise une plus grande quantité d'énergie en MF et qu'elle utilise une plus faible quantité d'énergie en HF.

Atteinte des objectifs

Les objectifs de ce projet de recherche sont atteints. Neuf recettes d'induction thermique ont été développées selon diverses philosophies. Les profondeurs durcies en pied de dent de toutes les recettes sont principalement d'un même ordre de grandeur, tandis que les profondeurs durcies en tête de dent varient, de très peu profondes à très profondes. Les résultats obtenus montrent que certains liens ont été observés avec succès entre les diverses informations disponibles telles que les paramètres des recettes, la profondeur durcie et les résultats des essais.

Suites à donner au projet

Au cours du projet, plusieurs philosophies de recettes ont été employées. Certaines ont mené à des recettes dont les durées de vie étaient élevées et d'autres ont mené à des recettes dont la durée de vie était faible. Les résultats obtenus donnent des idées pour développer d'autres recettes.

Il serait intéressant de développer des recettes servant à étudier l'effet de chauffer en MF et en HF en séquentiel ou en simultané. Voici un exemple de trois recettes servant à étudier cela.

- Préchauffe en MF, pause, chauffe en MF, pause, chauffe en HF.
- Préchauffe en MF, pause, chauffe en HF, pause, chauffe en MF.
- Préchauffe en MF, pause, chauffe en MF et en HF en simultané.

Des les trois cas, les puissances sont les mêmes et seul l'ordre d'applications des puissances de chauffe finale varient.

Il a été supposé que le point le plus contraint de la roue dentée était situé au point de la tangente à 30° . Il serait intéressant de vérifier cette hypothèse expérimentalement et de mesurer la position réelle du point le plus contraint.

Il serait intéressant d'étudier expérimentalement le lien entre la profondeur durcie au point le plus contraint de la roue dentée et le nombre de cycles des essais avec de nouvelles recettes.

La mesure de la profondeur durcie est plus précise avec un microduromètre qu'avec un logiciel d'analyse d'image. C'est pourquoi, il est recommandé de privilégier l'utilisation du microduromètre pour mesurer la profondeur durcie lorsque cela s'avère possible.

À cause de l'effet de bord, la profondeur durcie est plus faible à mi-denture qu'aux faces avant et arrière des roues dentées traitées par induction thermique. L'influence de l'effet de bord sur la résistance à la flexion n'a pas été analysée dans le présent mémoire. Dans un projet futur, il pourrait être intéressant de :

- développer des techniques pour diminuer l'effet de bord ;
- développer des recettes montrant un effet de bord plus ou moins marqué ;
- étudier expérimentalement la résistance à la flexion en pied de dent des roues montrant un effet de bord plus ou moins marqué.

Les essais ont été réalisés sur des roues dentées possédant une dureté à cœur de 39 HRC. Il serait intéressant d'étudier expérimentalement la résistance à la flexion en pied de dent de roues dentées traitées par induction thermique selon la même recette mais possédant des duretés à cœur différentes.

Comme mentionné plus tôt, la recette A1 ressemble quelque peu aux recettes A2, A4, B1 et A3. Les différences principales sont que la recette A1 utilise une chauffe

finale plus longue, qu'elle utilise une plus grande quantité d'énergie en MF et qu'elle utilise une plus faible quantité d'énergie en HF. Il serait intéressant de développer des recettes basées sur la recette A1 et de faire varier les trois paramètres mentionnés. Voici les quatre exemples de recettes proposés et expliqués à la section 5.6 :

- recette identique à A1, mais avec un temps de chauffe finale plus long;
- recette avec un temps de chauffe finale plus long, mais des puissances HF et MF plus faibles;
- recette identique à A1, mais avec une puissance en MF plus élevée;
- recette identique à A1, mais avec une puissance en HF plus faible.

Lors des essais réalisés à une fréquence d'application de la charge de 30 Hz, il a été remarqué que la charge maximale appliquée par le vérin du banc à chaque cycle variait très peu mais que le couple maximal et la force sur la dent maximale variaient quelque peu tout au long d'un essai. L'hypothèse a été émise que cela était causé par un effet dynamique. Si la variation du couple et de la force sur la dent sont en effet causés par des effets dynamiques, une diminution de la fréquence d'application de la charge diminuera l'amplitude de ces variations. Pour des essais futurs, il est donc recommandé de diminuer la fréquence d'application de la charge.

En plus des profils de dureté et des profils des contraintes résiduelles, la rugosité de surface est un autre facteur qui influence la durée de vie en flexion d'une roue dentée. Lorsqu'une amorce de fissure apparaît, cela se produit au point faible du matériau. Lorsque la résistance à la flexion en pied de dent de différentes recettes d'induction thermique est étudiée, ce qui est recherché c'est d'établir des liens entre le nombre de cycles des essais et les propriétés du matériau modifiées par le traitement thermique. La rugosité n'est pas modifiée par l'induction thermique. Pour ces raisons, il est préférable que l'initiation d'une fissure ne soit pas causée par un fini de surface inadéquat. Il est possible d'utiliser un microscope électronique à balayage pour visualiser le site d'amorçage d'une fissure. Si l'initiation de la fissure n'est pas causée par un fini de

surface inadéquat, il est possible d'établir des liens entre le mode de défaillance observé et les propriétés du matériau modifiées par le traitement d'induction thermique. Pour des essais futurs, il est donc recommandé de s'assurer d'utiliser des procédés d'usinage générant une faible rugosité dans la région du profil de raccordement en pied de dent.

La majorité des essais se sont terminés bien avant dix millions de cycles, soit le nombre de cycles maximal fixé. Pour des essais futurs, il est donc recommandé de diminuer quelque peu les charges de façon à réaliser des essais à plus haut nombre de cycles.

Il est à noter que les neuf recettes ont été développées sur des roues usinées selon un profil final. Des roues dentées destinées à des essais en flexion rotative sont généralement usinées en y laissant un surplus de matière enlevé par rectification après le traitement thermique. L'utilisation des neuf recettes développées, sur des roues destinées à des essais en flexion rotative, aurait pour effet de diminuer la profondeur durcie, car une couche de matériau serait enlevée par la rectification finale. Des essais en flexion simple sont typiquement réalisés avec l'objectif de passer à des essais en flexion rotative par la suite. Afin d'obtenir les mêmes profondeurs durcies avec les mêmes recettes avec les deux types de bancs d'essais, il est recommandé d'utiliser le même procédé de fabrication dans les deux cas. Ainsi, pour des essais futurs en flexion simple, il est recommandé de développer des recettes sur des roues dentées possédant un surplus de matière et subissant une rectification après le traitement thermique.

ANNEXE I

CALCUL DU POINT LE PLUS HAUT DE

CONTACT UNIQUE

Équation I-1 : Rayon du cercle au point le plus haut de contact unique

$$r_{en} = \frac{z}{|z|} \sqrt{\left[\sqrt{\left(\frac{d_{an}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{bn}}{2}\right)^2} - \frac{\pi d \cos \beta \cos \alpha_n}{|z|} (\varepsilon_{an} - 1) \right]^2 + \left(\frac{d_{bn}}{2}\right)^2}$$

Où

z : nombre de dents (positif pour engrenages à denture extérieure)

d_{an} : diamètre de tête de la roue dentée droite équivalente, mm

d_{bn} : diamètre de base de la roue dentée droite équivalente, mm

d : diamètre de référence, mm

β : angle d'hélice (sur le cylindre de référence), degré

α_n : angle de pression (sur le cylindre de référence) de la roue dentée droite équivalente, degré

ε_{an} : rapport de conduite équivalent

Tableau I-1 : Données pour le calcul du diamètre du cercle au point le plus haut de contact unique

Donnée	Valeur
z	48
d_{an} , mm	105,8418
d_{bn} , mm	92,08008
d , mm	101,6
β , degré	0
α_n , degré	25
ε_{an}	1,53517

ε_{an} se calcule à l'aide de l'équation ci-dessous.

Équation I-2 : Rapport de conduite équivalent

$$\varepsilon_{an} = \frac{\varepsilon_a}{\cos^2 \beta_b}$$

Où

ε_a : rapport de conduite apparent

β_b : angle d'hélice de base, degré

β_b se calcule à l'aide de l'équation ci-dessous.

Équation I-3 : Angle d'hélice de base

$$\beta_b = \arccos \sqrt{1 - (\sin \beta \cos \alpha_n)^2} = \arcsin(\sin \beta \cos \alpha_n)$$

ε_a se calcule à partir de l'équation ci-dessous.

Équation I-4 : Rapport de conduite apparent

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\xi_{fw1} + \xi_{aw1}}{\tau_1} = \frac{\xi_{fw2} + \xi_{aw2}}{\tau_2}$$

Où

$\xi_{fw1,2}$: angles de roulement des diamètres de forme de pied au point primitif, radians

$\xi_{aw1,2}$: angles de roulement du point primitif au diamètre de tête, radians

$\tau_{1,2}$: pas angulaire du pignon et de la roue, radians

$\xi_{fw1,2}$ se calculent à l'aide des cinq équations qui suivent. $\xi_{fw1,2}$ est égal à la valeur la plus faible calculée.

Équation I-5 : Angles de roulement des diamètres de forme de pied au point primitif limité par les diamètres de base

$$\xi_{fw1,2} = \tan \alpha_{wt}$$

Où

α_{wt} : angle de pression sur le cylindre primitif de fonctionnement

Équation I-6 : Angles de roulement des diamètres de forme de pied au point primitif limité par les diamètres de forme de pied

$$\xi_{fw1} = \tan \alpha_{wt} - \tan \arccos \frac{d_{b1}}{d_{soi1}}, \xi_{fw2} = \tan \alpha_{wt} - \tan \arccos \frac{d_{b2}}{d_{soi2}}$$

Où

α_{wt} : angle de pression sur le cylindre primitif de fonctionnement, degré

d_{b1} : diamètre de base du pignon, mm

d_{b2} : diamètre de base de la roue, mm

d_{soi1} : diamètre au début de la développante du pignon, mm

d_{soi2} : diamètre au début de la développante de la roue, mm

Tableau I-2 : Données pour le calcul du rapport de conduite apparent

Donnée	Valeur
α_{wt} , degré	25
d_{b1} , mm	92,08008
d_{b2} , mm	92,08008
d_{soi1} , mm	96,82075
d_{soi2} , mm	96,82075

Équation I-7 : Angles de roulement des diamètres de forme de pied au point primitif limité par les diamètres de tête de la roue et du pignon (début du profil actif)

$$\xi_{fw1} = \left(\tan \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}} - \tan \alpha_{wt} \right) \frac{z_2}{z_1}, \xi_{fw2} = \left(\tan \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}} - \tan \alpha_{wt} \right) \frac{z_1}{z_2}$$

Où

d_{b1} : diamètre de base du pignon, mm

d_{b2} : diamètre de base de la roue, mm

d_{a1} : diamètre de tête du pignon, mm

d_{a2} : diamètre de tête de la roue, mm

α_{wt} : angle de pression sur le cylindre primitif de fonctionnement, degré

z_1 : nombre de dents du pignon (positif pour engrenages à denture extérieure)

z_2 : nombre de dents de la roue (positif pour engrenages à denture extérieure)

Tableau I-3 : Données pour le calcul des angles de roulement des diamètres de forme de pied au point primitif limité par les diamètres de tête de la roue et du pignon (début du profil actif)

Donnée	Valeur
d_{b1} , mm	92,08008
d_{b2} , mm	92,08008
d_{a1} , mm	105,84180
d_{a2} , mm	105,84180
α_{wt} , degré	25
z_1	48
z_2	48

Équation I-8 : Angles de roulement du point primitif au diamètre de tête

$$\xi_{aw1} = \xi_{fw2} \frac{z_2}{z_1}, \xi_{aw2} = \xi_{fw1} \frac{z_1}{z_2}$$

Où

ξ_{fw1} : angle de roulement du diamètre de forme de pied au point du pas de fonctionnement du pignon, radians

ξ_{fw2} : angle de roulement du diamètre de forme de pied au point du pas de fonctionnement de la roue, radians

z_1 : nombre de dents du pignon (positif pour engrenages à denture extérieure)

z_2 : nombre de dents de la roue (positif pour engrenages à denture extérieure)

Tableau I-4 : Données pour le calcul des angles de roulement du point primitif au diamètre de tête

Donnée	Valeur
ξ_{fw1} , radians	0,10048
ξ_{fw2} , radians	0,10048
z_1	48
z_2	48

Équation I-9 : Pas angulaire du pignon et de la roue

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{z_1}, \tau_2 = \frac{2\pi}{z_2}$$

Où

z_1 : nombre de dents du pignon (positif pour engrenages à denture extérieure)

z_2 : nombre de dents de la roue (positif pour engrenages à denture extérieure)

Tableau I-5 : Données pour le calcul du pas angulaire du pignon et de la roue

Donnée	Valeur
z_1	48
z_2	48

Le diamètre au début de la développante se calcule à l'aide de l'équation I-10.

Équation I-10 : Diamètre au début de la développante

$$d_{soi} = 2 \sqrt{\left[\frac{d}{2} - (h_{fp} - x m_n - \rho_{fp} + \rho_{fp} \sin \alpha_n) \right]^2 + \left[\frac{h_{fp} - x m_n - \rho_{fp} + \rho_{fp} \sin \alpha_n}{\tan \alpha_t} \right]^2}$$

Où

d : diamètre de référence, mm

h_{fp} : creux de la crémaillère de référence d'une roue cylindrique, mm

x : coefficient de déport

m_n : module normal, mm

ρ_{fp} : rayon du profil de raccordement en pied du tracé de référence pour les engrenages cylindriques, mm

α_n : angle de pression normal, degré

α_t : angle de pression apparent, degré

Tableau I-6 : Données pour le calcul du diamètre au début de la développante

Donnée	Valeur
d , mm	101,60000
h_{fp} , mm	2,75082
x	0
m_n , mm	2,11667
ρ_{fp} , mm	0
α_n , degré	25
α_t , degré	25

Le calcul du rayon du cercle au point le plus haut de contact unique donne un rayon de 51,41 mm.

ANNEXE II

ESSAIS EN FLEXION SIMPLE DANS LA

LITTÉRATURE

Tableau II-1 : Informations sur des essais en flexion simple dans la littérature

Article	Fréquence utilisée	Nombre de cycles (maximal ou troncation)	R	Position de chargement	Ratio dents utilisées ^a
(Shaw et al., 2003)	Environ 160 Hz	10 000 000	0,05	Environ à 1 mm du bout de la dent	-
(Eyericioglu, Walton et Dean, 1997)	105-115 Hz	Un peu plus de 10 000 000	Charge min fixée à 0,5 kN	Point le plus haut de contact unique, environ 2,2 mm du bout de la dent	25%
(Hidayetoglu, 2001)	Max 100 Hz.	2 900 500	-	Bout de la dent	-
(Nigarura, Parameswaran et Trasorras, août 2007)	60 Hz	10 000 000	0,01	-	-
(Jeong et al., 1992)	40-60 Hz	3 000 000 et 10 000 000		Équivalent au bout de la dent	-
(Benedetti et al., 2002)	50 Hz	Cherche la limite d'endurance à 6 000 000	0,1	-	-
(Benedetti et al., 2001)	50 Hz	Cherche la limite d'endurance à 6 000 000	0,1	-	-
(Singh, 2001)	40 Hz	350 000	0,01	-	-
(Akata, Altinbalik et Çan, 2004)	30 Hz	6 000 000	Charge min fixée à 0,25 kN	Point le plus haut de contact unique	-
^a Ratio du nombre de dents testées par roue dentée par rapport au nombre de dents total par roue dentée					

Tableau II-2 : Informations sur des essais en flexion simple dans la littérature (suite)

Article	Fréquence utilisée	Nombre de cycles (maximal ou troncation)	R	Position de chargement	Ratio dents utilisées ^a
(Townsend, Baber et Nagy, 1979)	25 Hz	3 000 000	Charge min fixée à 445 N	Point le plus haut de contact unique	-
(Nagamura, Terauchi et Martowibowo, 1994)	18 Hz	3 000 000	-	Près du bout de la dent	-
(Daniewicz et Moore, 1998)	15 Hz	10 588 000	0,10	Près du bout de la dent	47%
(Ferguson, Li et Freborg, 2007)	-	10 000 000	0,1	Près du bout de la dent	-
(Wheitner et Houser, 1994)	10 Hz	1 000 000	0,1	Près du bout de la dent	47%
(Woods, Daniewicz et Nellums, 1999)	10 Hz	2 000 000	0,1	Près du bout de la dent	-
(Krantz et Tufts, March/April 2008)	0,5 Hz	Environ 1 000 000	Charge minimale utilisée, mais valeur non mentionnée	Point le plus haut de contact unique	-
(Handschuh et al., janvier 2008)	0,5 Hz	18 315	Charge min notée pour chaque essai, 20 à 119 lbf	Point le plus haut de contact unique	18%
(Yang, 1996)	-	2 464 700	0,05	-	-
^a Ratio du nombre de dents testées par roue dentée par rapport au nombre de dents total par roue dentée					

ANNEXE III

STATISTIQUES

III.1 Distribution de Weibull

La distribution de Weibull est typiquement utilisée pour modéliser des phénomènes de durée de vie. On retrouve de la documentation sur cette distribution dans de nombreux documents de référence (Lawless, 2003; Murthy, Xie et Jiang, 2004; Nelson, 1990, , 2004). Appliquée à un phénomène de durée de vie, cette distribution a la propriété d'attribuer une probabilité nulle de défaillance à tout temps plus petit que zéro (ce qui correspond à une défaillance avant le début de l'essai). De plus, la distribution peut être symétrique, asymétrique positive et asymétrique négative, ce qui la rend flexible. Les deux paramètres de la distribution de Weibull à deux paramètres sont le facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_W et facteur de forme de la distribution de Weibull β . La fonction de répartition de la distribution est :

Équation III-1 : Fonction de répartition de la distribution de Weibull

$$F(t, \alpha_W, \beta) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha_W} \right)^\beta \right]$$

Où $t \geq 0$, $\alpha_W > 0$ et $\beta > 0$.

Un percentile est de la distribution est calculé selon :

Équation III-2 : Percentile de la distribution de Weibull

$$t_p = \alpha_W [-\ln(1 - p)]^{1/\beta}$$

Où

$\ln()$: logarithme naturel

p : percentile, 0 à 1

Le 63,2^e percentile de la distribution de Weibull est presque égal à α_W ($1 - e^{-1} \approx 0,632$) :

Équation III-3 : 63,2^e percentile de la distribution de Weibull

$$t_{1-e^{-1}} = \alpha_W [-\ln(1 - [1 - e^{-1}])]^{1/\beta} = \alpha_W [-\ln(e^{-1})]^{1/\beta} = \alpha_W$$

Le facteur de forme de la distribution de Weibull β modifie la forme de distribution. Le facteur de forme de la distribution de Weibull β n'as pas d'unité. Lorsque le facteur de forme de la distribution de Weibull β est égal à 1, la distribution prend la forme de la distribution exponentielle. Lorsque le facteur de forme de la distribution de Weibull β est entre 3 et 4, la forme de la distribution est proche de celle de la distribution normale. La fonction de risque cumulatif est croissante lorsque le facteur de forme de la distribution de Weibull β est plus grand que 1, constante lorsque le facteur de forme de la distribution de Weibull β est égal à 1 et décroissante lorsque le facteur de forme de la distribution de Weibull β est plus petit que 1. C'est cette souplesse qui rend la distribution de Weibull populaire.

Le calcul de l'exponentielle à la base e de l'équation du modèle donne le facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w . Par exemple, le calcul pour obtenir le facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w dans un modèle qui utilise une équation du premier degré est :

Équation III-4 : Facteur d'échelle de la distribution de Weibull α_w dans une équation du premier degré

$$\alpha_w = e^{\theta_1 x + \theta_2}$$

Où

x : variable explicative du modèle

θ_1, θ_2 : coefficients du modèle

III.2 Maximum de vraisemblance et régression sur la durée de vie

La méthode du maximum de vraisemblance est utilisée pour trouver les paramètres d'un modèle qui maximisent la fonction log-vraisemblance. La méthode du maximum de vraisemblance est flexible. Entre autres, elle s'applique à divers modèles, à plusieurs distributions statistiques et aux données censurées ou non. Dans ce mémoire, la distribution

utilisée est celle de Weibull et les données sont non censurées. La fonction log-vraisemblance de Weibull lorsque les données sont non censurées est (Nelson, 2004) :

Équation III-5 : Fonction log-vraisemblance de Weibull

$$lv = \sum_i [\ln(\beta) + (\beta - 1) \ln(t_i) - \beta \ln(\alpha_w) - (t_i/\alpha_w)^\beta]$$

Où

α_w : facteur d'échelle de la distribution de Weibull

β : facteur de forme de la distribution de Weibull

t_i : nombre de cycles

III.3 Test du rapport des vraisemblances

Un test du rapport des vraisemblances est un test statistique utilisé pour comparer un modèle général et un modèle contraint. Il sert à vérifier si le modèle général décrit mieux les données que le modèle contraint. Plusieurs types de comparaisons peuvent être réalisés. Les deux utilisés au chapitre 5 sont :

- comparer J estimés pour l'égalité entre eux lorsque le modèle est ajusté à un seul échantillon ;
- comparer K estimés d'une même quantité lorsque K échantillons sont utilisés et que le même modèle est ajusté à chaque échantillon.

Pour les deux types de comparaisons mentionnées, les valeurs de Q sont respectivement (Nelson, 1990) :

Équation III-6 : Degrés de liberté de la distribution χ^2

$$Q = J - 1 \text{ et } Q = K - 1$$

La statistique du test du rapport des vraisemblances est (Nelson, 1990) :

Équation III-7 : Statistique du test du rapport des vraisemblances

$$T = 2(lv_g - lv_c)$$

Où

lv_g : log-vraisemblance obtenu par la maximisation du modèle général

lv_c : log-vraisemblance obtenu par la maximisation du modèle contraint

Le lv_g peut être constitué de l'addition de plusieurs lv . L'hypothèse nulle est que les estimés des modèles généraux et contraints sont égaux. Si l'hypothèse nulle est vraie, T suit asymptotiquement une distribution χ^2 avec Q degrés de liberté. Le seuil de signification est approximativement égal à (Liao, 2002) :

Équation III-8 : Seuil de signification

$$\Pr(\chi^2_{(Q)} \geq T)$$

Cette équation calcule la probabilité unilatérale de la distribution χ^2 évaluée à la valeur T avec Q degré de liberté. L'hypothèse nulle est rejetée lorsque le seuil de signification est plus petit que le seuil de signification statistique α_s choisi. Dans le cas contraire, l'hypothèse nulle est acceptée.

III.4 Comparaisons multiples de Tukey

Lorsque des moyennes de résultats de différents traitements sont comparées entre elles, il est requis d'évaluer si les différences entre chaque paire de moyennes sont statistiquement significatives ou non. Le test de Tukey compare toutes les combinaisons possibles de traitements. Lorsque le nombre d'échantillons est le même pour chaque traitement, l'équation du test est (Blischke et Murthy, 2000) :

Équation III-9 : Test de Tukey pour même nombre d'échantillons dans les deux traitements comparés

$$w(k) = \frac{q_{\alpha}(k, df)s}{\sqrt{r}}$$

Où

r : nombre d'échantillons commun aux deux traitements

$q_{\alpha}(k, df)$: test de l'étendue de Student

s : écart-type de toutes les données, pas uniquement celles des deux groupes comparés

Lorsque le nombre d'échantillons est différent pour chaque traitement, l'équation du test est (Blischke et Murthy, 2000) :

Équation III-10 : Test de Tukey pour différent nombre d'échantillons dans les deux traitements comparés

$$w_{ij}(k) = q_{\alpha}(k, df)s \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}$$

Où

n_i : nombre d'échantillons du premier traitement

n_j : nombre d'échantillons du deuxième traitement

Le résultat du test est additionné et soustrait aux différences entre les traitements afin de calculer des intervalles de confiance. Lorsque zéro n'est pas inclus dans l'intervalle, il est conclu que la différence entre les deux moyennes comparées est statistiquement

significative. À l'inverse, lorsque zéro est inclus dans l'intervalle, il est conclu que la différence entre les deux moyennes comparées est non statistiquement significative.

ANNEXE IV
MESURES DE MICRODURETÉ

IV.1 Mesures de microdureté sur la roue dentée A1-1

Tableau IV-1 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée A1-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Laboratoire des matériaux à l'ÉTS
Temps de chargement, s	10 à 12
Chargement, g	200
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,5
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,3
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,5
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,5

Tableau IV-2 : Dureté des mesures sur la roue dentée A1-1

Profondeur	Dureté					
	HV					
mm	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
0,2	575	618	589	532	618	396
0,4	618	639	598	494	540	401
0,6	613	613	623	509	549	409
0,7	-	520	-	-	-	-
0,8	613	345	618	528	557	396
1,0	628	319	618	509	480	409
1,2	639	336	589	501	480	332
1,4	639	343	516	450	473	362
1,5	457	-	323	-	-	-
1,6	310	341	304	444	303	351
1,8	332	299	332	429	362	347
2,0	353	332	330	396	339	336
2,2	332	323	345	364	319	339
2,4	347	334	341	321	329	319
2,6	330	312	330	330	327	319
2,8	336	323	325	319	334	341
3,0	332	330	332	313	330	296
3,2	312	330	312	312	330	303

IV.2 Mesures de microdureté sur la roue dentée A2-1

Tableau IV-3 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée A2-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Laboratoire des matériaux à l'ÉTS
Temps de chargement, s	10 à 12
Chargement, g	200
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,3
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,5
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,5
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,5

Tableau IV-4 : Dureté des mesures sur la roue dentée A2-1

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
0,2	509	570	562	593	655	618
0,3	-	570	-	-	-	-
0,4	570	325	540	608	644	618
0,6	575	321	549	618	639	562
0,8	593	321	575	598	649	608
1,0	608	321	487	628	644	528
1,1	476	-	-	-	-	-
1,2	312	321	286	618	623	598
1,4	330	330	345	618	549	483
1,6	329	325	321	598	420	358
1,8	330	341	341	426	312	321
2,0	312	330	347	362	304	298
2,2	308	336	332	329	312	308
2,4	327	351	325	310	321	313
2,6	277	339	321	327	327	288
2,8	329	332	312	303	345	330
3,0	317	313	304	317	332	334

IV.3 Mesures de microdureté sur la roue dentée A2-2

Tableau IV-5 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée A2-2

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Le centre intégré en formation en métallurgie de La Pocatière
Temps de chargement, s	10
Chargement, g	200
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,381
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,381
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,381
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,381

Tableau IV-6 : Dureté des mesures sur la roue dentée A2-2

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
0,254	707	683	655	666	639	639
0,381	-	466	-	-	-	-
0,508	683	391	655	655	666	649
0,762	644	383	701	644	666	689
0,889	672	-	-	-	-	-
1,016	394	404	666	623	677	666
1,143	-	-	396	-	-	-
1,270	396	376	391	566	644	598
1,524	412	383	383	473	466	575
1,778	381	383	362	383	364	441
2,032	381	381	396	341	345	362
2,286	369	376	374	332	345	343
2,540	381	345	386	353	351	351
2,794	374	383	367	369	376	369
3,048	381	353	367	381	367	358
3,302	383	396	383	364	383	362

IV.4 Mesures de microdureté sur la roue dentée A3-1

Tableau IV-7 : Caractéristiques des mesures sur la tête de la roue dentée A3-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Laboratoire des matériaux à l'ÉTS
Temps de chargement, s	10 à 12
Chargement, g	300
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,5
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,5

Tableau IV-8 : Dureté des mesures sur la tête de la roue dentée A3-1

Profondeur mm	Dureté HV		
	T-AR	T-MD	T-AV
0,2	418	635	622
0,4	618	661	635
0,6	618	657	626
0,8	564	648	626
1,0	583	639	614
1,2	561	635	631
1,4	561	598	622
1,6	470	499	511
1,8	373	362	478
2,0	311	315	396
2,2	346	315	336
2,4	312	325	305
2,6	323	317	308
2,8	325	301	315
3,0	302	308	308

Tableau IV-9 : Dureté des mesures sur la tête de la roue dentée A3-1 (suite)

Profondeur mm	Dureté HV		
	T-AR	T-MD	T-AV
3,2	321	325	294
3,4	-	-	309
3,6	331	321	317
4,0	305	353	333
4,4	349	364	320
4,8	315	344	318
5,2	355	353	336
5,6	328	349	348
6,0	366	339	331

Tableau IV-10 : Caractéristiques des mesures sur le creux de la roue dentée A3-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Laboratoire des matériaux à l'UQAR
Temps de chargement, s	10
Chargement, g	300
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,3
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,3

Tableau IV-11 : Dureté des mesures sur le creux de la roue dentée A3-1

Profondeur mm	Dureté HV		
	C-AR	C-MD	C-AV
0,15	725	671	682
0,25	689	658	689
0,35	671	652	692
0,45	703	645	675
0,55	689	339	710
0,65	699	321	678
0,75	729	359	689
0,85	714	355	675
0,95	710	348	675
1,05	685	358	675
1,15	612	374	479
1,25	336	362	339
1,35	342	334	337
1,45	345	361	350
1,55	353	355	344
1,65	349	352	348
1,75	357	345	369
1,85	365	376	340
1,95	340	330	366
2,05	270	337	376
2,15	350	358	350
2,25	349	361	354
2,35	314	353	349
2,45	366	382	347
2,55	353	342	339

IV.5 Mesures de microdureté sur la roue dentée A4-1

Tableau IV-12 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée A4-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Laboratoire des matériaux à l'ÉTS
Temps de chargement, s	10 à 12
Chargement, g	300
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,3
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,3
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,5
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,5

Tableau IV-13 : Dureté des mesures sur la roue dentée A4-1

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
0,2	618	639	614	598	626	530
0,4	648	441	648	618	631	537
0,6	648	337	598	639	639	598
0,8	614	333	618	594	657	547
1,0	644	348	602	543	648	470
1,2	337	368	348	579	631	444
1,4	344	357	328	457	470	394
1,6	337	348	349	366	336	331
1,8	348	339	329	315	323	329
2,0	336	328	331	320	323	321
2,2	333	331	341	336	337	323
2,4	357	329	344	323	329	328
2,6	348	362	355	320	331	336
2,8	341	355	355	318	331	339
3,0	334	358	317	333	346	346
3,2	-	-	-	-	341	-

Tableau IV-14 : Dureté des mesures sur la roue dentée A4-1 (suite)

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
3,4	-	-	-	348	336	337
3,8	-	-	-	337	357	334
4,2	-	-	-	351	366	349
4,6	-	-	-	348	339	355
5,0	-	-	-	331	351	358

IV.6 Mesures de microdureté sur la roue dentée B1-1

Tableau IV-15 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée B1-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Le centre intégré en formation en métallurgie de La Pocatière
Temps de chargement, s	10
Chargement, g	200
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,381
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,381
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,381
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,381

Tableau IV-16 : Dureté des mesures sur la roue dentée B1-1

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
0,254	726	649	672	701	701	660
0,508	713	613	701	672	695	701
0,635	-	367	-	-	-	-
0,762	713	362	726	689	689	666
1,016	695	381	618	707	707	713
1,143	349	-	683	-	-	-
1,270	358	388	347	713	713	689
1,524	364	407	376	733	677	695
1,778	386	371	325	689	603	660
2,032	376	374	371	644	418	608
2,286	388	345	379	516	351	412
2,540	371	362	394	379	362	358
2,794	371	369	394	336	332	313
3,048	362	362	343	304	319	345
3,302	364	362	379	336	334	332
3,556	-	-	-	-	364	-

IV.7 Mesures de microdureté sur la roue dentée B2-1

Tableau IV-17 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée B2-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Laboratoire des matériaux à l'ÉTS
Temps de chargement, s	10 à 12
Chargement, g	200
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,3
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,3
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,5
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,5

Tableau IV-18 : Dureté des mesures sur la roue dentée B2-1

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
0,05	-	412	-	-	-	-
0,2	644	299	594	618	644	634
0,4	618	264	628	589	644	571
0,6	618	325	623	594	618	594
0,8	494	331	628	594	549	634
1,0	327	317	321	589	618	598
1,2	333	349	317	580	644	589
1,4	321	347	314	575	644	634
1,6	369	349	323	549	571	634
1,8	386	351	367	528	549	623
2,0	369	356	376	571	473	613
2,4	-	-	-	463	374	566
2,5	351	362	353	-	-	-
2,6	-	-	-	374	331	517
2,8	-	-	-	341	333	473
3,0	341	362	333	312	333	351
3,2	-	-	-	317	333	349
3,4	-	-	-	312	321	312

Tableau IV-19 : Dureté des mesures sur la roue dentée B2-1 (suite)

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
3,5	345	-	331	-	-	-
3,6	-	-	-	312	317	321
3,8	-	-	-	317	337	333
4,0	351	349	315	329	312	329
5,0	-	-	-	331	321	308
6,0	-	-	-	347	353	349
6,5	-	-	-	372	353	347
7,0	-	-	-	331	353	362

IV.8 Mesures de microdureté sur la roue dentée C1-1

Tableau IV-20 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée C1-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Le centre intégré en formation en métallurgie de La Pocatière
Temps de chargement, s	10
Chargement, g	200
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,381
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,381
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,381
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,381

Tableau IV-21 : Dureté des mesures sur la roue dentée C1-1

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
0,254	608	613	633	644	660	644
0,381	-	487	-	-	-	-
0,508	633	310	618	-	-	672
0,762	608	332	613	-	-	584
0,889	618	-	623	-	-	-
1,016	334	343	329	-	-	677
1,270	313	347	345	-	660	677
1,524	351	364	349	-	-	666
1,778	330	341	353	-	-	672
2,032	362	371	353	-	-	655
2,286	349	310	371	672	666	672
2,540	345	336	379	-	-	660
2,794	339	355	351	-	666	-
3,048	304	358	332	-	466	-
3,302	325	345	339	-	367	-
3,556	-	-	-	655	345	623

Tableau IV-22 : Dureté des mesures sur la roue dentée C1-1 (suite)

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
3,810	-	-	-	438	-	349
4,064	-	-	-	325	-	336
4,318	-	-	-	330	-	332
4,572	-	-	-	341	-	321

IV.9 Mesures de microdureté sur la roue dentée D1-1

Tableau IV-23 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée D1-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Laboratoire des matériaux à l'ÉTS
Temps de chargement, s	10 à 12
Chargement, g	300
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,3
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,3
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,5
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,5

Tableau IV-24 : Dureté des mesures sur la roue dentée D1-1

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
0,2	644	652	639	598	639	614
0,4	635	661	644	-	-	-
0,6	644	635	648	666	661	626
0,8	626	318	639	-	-	-
1,0	631	320	618	671	661	639
1,2	308	339	323	-	-	-
1,4	328	349	321	652	666	661
1,6	357	346	331	-	-	-
1,8	358	325	331	635	639	661
2,0	368	334	344	-	-	-
2,2	-	-	-	666	675	639
2,4	339	355	348	-	-	-
2,6	-	-	-	657	657	622
2,8	336	346	311	-	-	-
3,0	-	-	-	644	618	652
3,2	366	329	321	-	-	-

Tableau IV-25 : Dureté des mesures sur la roue dentée D1-1 (suite)

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
3,4	-	-	-	675	622	644
3,6	339	348	323	-	-	-
3,8	-	-	-	661	644	631
4,0	341	328	317	-	-	-
4,2	-	-	-	657	635	631
4,6	-	-	-	586	644	598
4,8	-	-	-	602	441	383
5,0	-	-	-	583	329	308
5,1	-	-	-	344	-	-
5,2	-	-	-	308	339	333
5,4	-	-	-	323	-	344
5,6	-	-	-	337	321	334
6,0	-	-	-	320	339	375
6,4	-	-	-	337	357	358
6,8	-	-	-	331	360	348
7,2	-	-	-	343	339	336
7,6	-	-	-	348	357	341
8,0	-	-	-	349	366	357
8,4	-	-	-	275	371	364
8,8	-	-	-	353	370	358

IV.10 Mesures de microdureté sur la roue dentée D2-1

Tableau IV-26 : Caractéristiques des mesures sur la roue dentée D2-1

Caractéristique	Valeur
Endroit de la prise de mesure	Laboratoire des matériaux à l'ÉTS
Temps de chargement, s	10 à 12
Chargement, g	300
Distance entre la face arrière et la ligne C-AR, mm	0,3
Distance entre la face avant et la ligne C-AV, mm	0,3
Distance entre la face arrière et la ligne T-AR, mm	0,5
Distance entre la face avant et la ligne T-AV, mm	0,5

Tableau IV-27 : Dureté des mesures sur la roue dentée D2-1

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
0,2	598	579	639	602	618	626
0,4	598	661	626	-	-	-
0,6	610	661	602	618	622	618
0,8	610	323	618	-	-	-
1,0	594	325	626	618	622	618
1,2	602	344	598	-	-	-
1,4	385	331	321	622	631	631
1,6	308	325	337	-	-	-
1,8	328	329	329	622	631	606
2,0	348	323	311	-	-	-
2,2	337	-	-	622	614	622
2,4	341	325	331	-	-	-
2,6	-	-	-	610	631	614
2,8	328	326	293	-	-	-
3,0	-	-	-	631	564	606
3,2	339	315	339	-	-	-
3,4	-	-	-	618	618	614

Tableau IV-28 : Dureté des mesures sur la roue dentée D2-1 (suite)

Profondeur mm	Dureté HV					
	C-AR	C-MD	C-AV	T-AR	T-MD	T-AV
3,6	325	331	339	-	-	-
3,8	-	-	-	661	606	626
4,0	348	339	344	-	590	-
4,2	-	-	-	631	493	602
4,4	-	-	-	622	320	610
4,6	-	-	-	622	320	318
4,8	-	-	-	355	312	289
5,0	-	-	-	302	329	295
5,1	-	-	-	344	-	-
5,2	-	-	-	325	339	339
5,4	-	-	-	323	336	323
5,6	-	-	-	343	366	320
6,0	-	-	-	343	337	348
6,4	-	-	-	346	-	-
6,8	-	-	-	357	333	357
7,2	-	-	-	351	348	349
7,6	-	-	-	344	357	348
8,0	-	-	-	334	331	348
8,4	-	-	-	343	333	348
8,8	-	-	-	329	337	349

ANNEXE V

DÉTECTION DE FISSURE SELON DEUX

CAPTEURS DIFFÉRENTS

Cette annexe présente une comparaison entre deux méthodes de détection de fissure. Une méthode emploie une jauge de propagation de fissure collée en pied de dent sur la face avant tandis que l'autre emploie le capteur de déformation fixé entre la fourche et le bâti du banc. Le tableau V-1 présente la longueur des fissures et le nombre de cycles au moment de la détection d'une fissure par une jauge de déformation et par le capteur de déformation. Les essais présentés sont ceux dans lesquels une jauge de propagation de fissure a été utilisée.

Tableau V-1 : Nombre de cycles et longueur de la fissure au moment de la détection par un capteur

Roue dentée et dent	Capteur	Nombre de cycles	Longueur de la fissure mm
A1-1, dent 11	Jauge ^a	27 804	0,5334
	Déformation ^b	33 813	2,2352
A2-2, dent 6	Jauge ^a	26 341	0,1778
	Déformation ^b	70 125	2,5400
A2-2, dent 25	Jauge ^a	33 911	0,4572
	Déformation ^b	80 571	2,6162
C1-1, dent 11	Jauge ^a	46 483	0,2032
	Déformation ^b	71 483	2,3876
C1-1, dent 36	Jauge ^a	29 493	0,2540
	Déformation ^b	36 815	2,2606
D1-1, dent 16	Jauge ^a	14 988	0,2286
	Déformation ^b	18 039	1,8796
D1-1, dent 35	Jauge ^a	45 217	0,2540
	Déformation ^b	66 174	2,5146
D2-1, dent 6	Jauge ^a	43 635	0,2032
	Déformation ^b	71884	2,4638
D2-1, dent 26	Jauge ^a	14 895	0,4318
	Déformation ^b	29214	1,8288
^a après bris du premier fil de la jauge de propagation de fissure			
^b après augmentation de 0,005 comparativement à la valeur en début d'essai			

Pour les jauges de propagation de fissures, la fissure est détectée lors du bris du premier fil. La longueur de fissure détectée par la jauge de propagation de fissure dépend de la distance entre le premier fil et la surface du profil de raccordement en pied de dent. La longueur de fissure détectée par la jauge de propagation de fissure varie d'un essai à l'autre parce que les jauges n'ont pas toutes été collées exactement au même endroit sur chaque roue dentée.

Le capteur de déformation arrête l'essai lorsqu'une fissure est détectée. Comme expliqué à la section 3.6.4, l'essai est arrêté lorsque l'augmentation du maximum du signal de déformation comparativement à la valeur en début d'essai excède 0,005.

Suite l'analyse du Tableau V-1, il est conclu qu'une fissure est détectée plus tôt en utilisant une jauge de propagation de fissure qu'en utilisant le capteur de déformation. Il est également conclu que la longueur d'une fissure minimale détectée par une jauge de propagation de fissure est influencée par la position de la jauge.

ANNEXE VI

RÉPÉTABILITÉ

Les roues dentées A2-1 et A2-2 ont toutes deux été traitées selon la recette A2. En théorie, puisque toutes les conditions expérimentales sont les mêmes pour ces deux roues, la différence entre les résultats des essais en flexion simple des deux roues devrait être statistiquement non significative. Cette hypothèse est vérifiée en comparant les valeurs de $t_{0,5}$ de ces deux roues dentées. La durée de vie en fonction du nombre de cycles est modélisée avec la distribution de Weibull. La valeur de β estimée se rapproche plus de la valeur réelle de la population lorsque la quantité de données utilisée pour l'estimer est grande. C'est pour cette raison que, lors de l'estimation des paramètres des modèles, la valeur de β est fixée à celle obtenue dans le tableau 5-7. Les figures VI-1 et VI-2 présentent les résultats de la modélisation des deux roues dentées.

Figure VI-1 : Nombre de cycles des essais à 5,4 kN

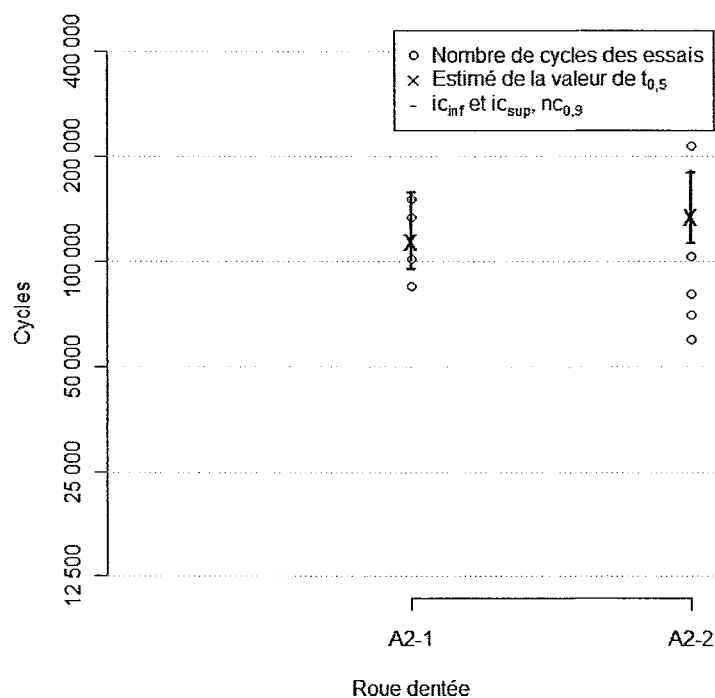
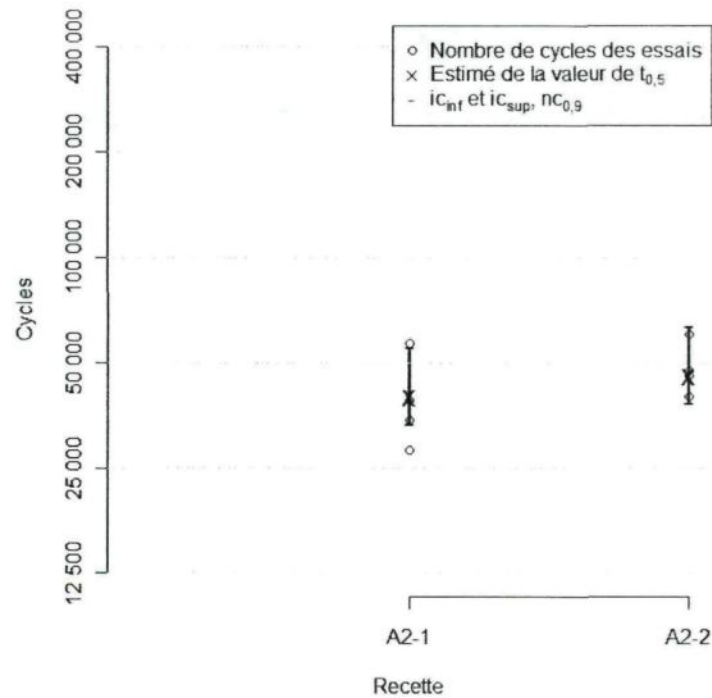
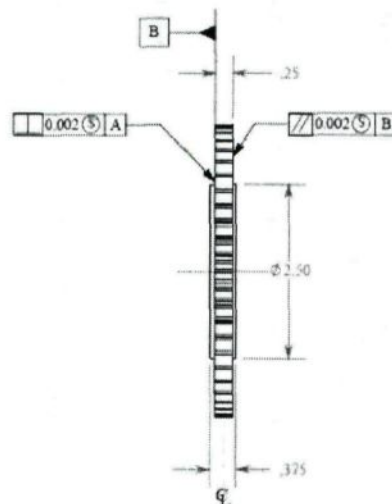
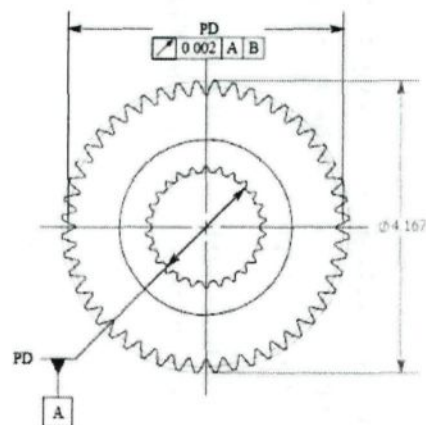


Figure VI-2 : Nombre de cycles des essais à 6,4 kN



Puisque la valeur de $t_{0,5}$ d'une roue dentée se retrouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance de la valeur de $t_{0,5}$ de l'autre roue dentée, il est conclu que les différences entre les durées de vie des recettes sont statistiquement non significatives.

ANNEXE VII
MISE EN PLAN DE LA ROUE DENTÉE



Gear data

Number of teeth : 48
 DP : 12.0000
 Pressure angle : 25.0000°
 Arc tooth thickness : 0.1278-0.1258
 Base diameter : 3.6252
 Root diameter : 3.775-3.760
 PD : 4.0000
 Fillet R : 0.170 min - 0.243 max
 Form dia : 3.8535
 Form dia roll angle : 20.65°

Ref data :
 Measurement over 0.144 dia wire
 4.1959-4.1918
 Over wires dim based on 0.1278-0.1258
 Arc tooth thickness

Spline data

Fillet root, side fit
 Number of tooth : 26
 Spline pitch : 16/32
 Pressure angle : 30°
 Base diameter : 1.4073
 PD : 1.6250
 Form diameter : 1.6875
 Major diameter : 1.7535-1.7435
 Fillet R : 0.016 min

Variation allowance per ANSI B92.1-1970 class 5
 Circ space width
 Actual 0.1013
 Eff 0.0982 min

Ref data :
 Measurement between 0.090 dia wires
 1.5304-1.5278
 Between wires dim based on 0.1013-0.0998
 Actual circ space width

General notes

1. Material : SAE 4340
2. Break edge of gear teeth
3. Surface texture (63)
4. Angular relation of spline to gear teeth is not important.
5. Hardness core: 35-41 HRC or equiv

Date : 2008-10-22

Unités : pouce

Tolérances non spécifiées

Fini de surface : 63

Linéaire :

X = ± 1 .XXX = ± 0.001
 X = ± 0.1
 .XX = ± 0.01

Echelle : 1:2

UQAR

Titre :

Dessiné par : Samuel Austin

Approuvé par : Jean Brousseau

No dessin : EFD101280 (Mod)

Rev 0

Matériel : Acier 4340

Quantité : 25

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AKATA, E., M. T. ALTINBALIK et Y. ÇAN. 2004. « Three point load application in single tooth bending fatigue test for evaluation of gear blank manufacturing methods ». *International Journal of Fatigue*, volume 26, numéro 7, pp. 785-789.
- ALBAN, L. E. 1988. « Number 1 gear failure-tooth bending fatigue SAE Paper 841088 ».
- ASI, O., A. C. CAN, J. PINEAULT et M. BELASSEL. 2007. « The relationship between case depth and bending fatigue strength of gas carburized SAE 8620 steel ». *Surface and Coatings Technology*, volume 201, numéro 12, pp. 5979-5987.
- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. 1991. « *ASM Handbook: volume 4: Heat Treating* ». ASM International.
- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. 2004. « *ASM Handbook Volume 9: Metallography And Microstructures* ». : ASM International.
- BARKA, Nouredine, Philippe BOCHER, Jean BROUSSEAU, Michel GALOPIN et Subramanya SUNDARARAJAN. 2007. « Modeling and sensitivity study of the induction hardening process ». *Advanced Materials Research*. volume 15-17, pp. 525-530. Vancouver, BC.
- BENEDETTI, M., V. FONTANARI, B. R. HÖHN, P. OSTER et T. TOBIE. 2002. « Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit of case hardened gears ». *International Journal of Fatigue*, volume 24, numéro 11, pp. 1127-1136.
- BENEDETTI, M., V. FONTANARI, P. OSTER et T. TOBIE. 2001. « Influence of residual stresses on fatigue behaviour of surface treated gears ». *Proc. of the XXX AIAS Conf.*, pp. 263-272.
- BLISCHKE, Wallace R. et D. N. Prabhakar MURTHY. 2000. « *Reliability - Modeling, Prediction, and Optimization* ». New York: Wiley-Interscience.
- CASTILLO, Enrique et Alfonso FERNÁNDEZ-CANTELI. 2009. « *A Unified Statistical Methodology for Modeling Fatigue Damage* ». : Springer.
- DANIEWICZ, S. R. et D.H. MOORE. 1998. « Increasing the bending fatigue resistance of spur gear teeth using a presetting process ». *International Journal of Fatigue*, volume 20, numéro 7, pp. 537-542.

- DAVIS, J. R. 2005. « *Gear Materials, Properties, and Manufacture* ». Materials Park, OH: ASM International.
- DOSSETT, L. Jon. 2007, March/April 2007. « Make Sure Your Specified Heat Treatment is Achievable ». *Heat Treating Progress*, pp. 23-30.
- EYERCIOGLU, O., D. WALTON et T. A. DEAN. 1997. « Comparative bending fatigue strength of precision forged spur gears ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, volume 211, numéro 4, pp. 293-299.
- FAIRFIELD Mfg. Co. Inc. 2004. « Enviro-friendly gear manufacturing ». *Gear Technology*, July/August, p. 33.
- FERGUSON, B. L., Z. LI et A. M. FREBORG. 2007. « Heat treat simulation used to improve gear performance ». *Heat Treating Progress*, volume 7, numéro 4, pp. 29-35.
- GARIBAY, R. P. et N. S. CHANG. 1987. « Improved fatigue life of a carburized gear by shot peening parameter optimization ». *Carburizing: processing and performance. Proceedings of an international conference. ASM International*, pp. 283-289.
- HANDSCHUH, R. F., T. L. KRANTZ, B. A. LERCH et C. S. BURKE. janvier 2008. « Low-Cycle Bending Fatigue of AISI 9310 Steel Spur Gears ». *Gear Solutions*, pp. 18-25.
- HIDAYETOGLU, T. K. 2001. « Effect of the gear finishing process on bending fatigue crack initiation and propagation in spur gears ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, volume 215, numéro 7, pp. 785-792.
- ISO 3754-1976. (1976). « Acier -- Détermination de la profondeur conventionnelle de trempe après chauffage superficiel ». Suisse. 4 p.
- ISO 6336-2:2006. (2008). « Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale -- Partie 2: Calcul de la résistance à la pression de contact (piqûre) ». Suisse. 33 p.
- ISO 6336-3:2006. (2008). « Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale -- Partie 3: Calcul de la résistance à la flexion en pied de dent ». Suisse. 43 p.

- ISO 6336-5:2003. (2003). « Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale -- Partie 5: Résistance et qualité des matériaux ». Suisse. 45 p.
- JEONG, B., M. KATO, K. INOUE et N. TAKATSU. 1992. « The bending strength of carburized fine module gear teeth ». *JSME Int. J. Series III*, volume 35, numéro 1, pp. 136-141.
- KAWALEC, Andrzej, Jerzy WIKTOR et Dariusz CEGLAREK. 2006. « Comparative analysis of tooth-root strength using ISO and AGMA standards in spur and helical gears with FEM-based verification ». *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, volume 128, numéro 5, pp. 1141-1158.
- KLAREN, Christopher M., John DEERE, WATERLOO WORKS et Buehler Ltd. James NELSON. 1990. « Methods of Measuring Case Depth ». *ASM Handbook Volume 4, Heat Treating (ASM International)*, pp. 454-461.
- KRANTZ, T. et B. TUFTS. March/April 2008. « Pitting and bending fatigue evaluations of a new case-carburized gear steel ». *Gear Technology*, pp. 52-57.
- LAWLESS, Jerald F. 2003. « *Statistical Models and Methods for Lifetime Data* ». (deuxième édition^e éd.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- LIAO, Tim Futing. 2002. « *Statistical Group Comparison* ». New York: John Wiley & Sons, Inc.
- MACKENZIE, S. 2007. « Heat treatment of gears: Control of residual stress and distortion ». *Heat Treating Progress*, volume 7, numéro 4, pp. 47-56.
- MCPHERSON, D.R. et S.B. RAO. 2008. « Methodology for translating single-tooth bending fatigue data to be comparable to running gear data ». *Gear Technology*, pp. 42-51.
- MURTHY, D.N. Prabhakar, Min XIE et Renyan JIANG. 2004. « *Weibull Models* ». Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- MURZIN, V. A. et V. P. PONOMAREV. 1975. « Change in the dimensions of gear wheels during gas carburizing and quenching ». *Metal Science and Heat Treatment*, volume 17, numéro 3, pp. 215-220.
- NAGAMURA, Kazuteru, Yoshio TERAUCHI et Sigit Yoewono MARTOWIBOWO. 1994. « Study on gear bending fatigue strength design based on reliability engineering (prediction of crack propagation and fatigue life of MAC14

- supercarburized steel gear) ». *JSME International Journal, Series C: Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing*, volume 37, numéro 4, pp. 795-803.
- NELSON, Wayne B. 1990. « *Accelerated testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis* ». Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- NELSON, Wayne B. 2004. « *Applied Life Data Analysis* ». Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- NIGARURA, S., R. PARAMESWARAN et J. R. L. TRASORRAS. août 2007. « Bending Fatigue of Surface Densified Gears ». *Gear Solutions*, pp. 44-52, 55.
- OBERG, Erik, Franklin D. JONES, Holbrook L. HORTON et Henry H. RYFFEL. 2000. « *Machinery's Handbook* ». (26th edition^e éd.). New York: Industrial Press Inc.
- PAVLINA, E. J. et C. J. VAN TYNE. 2008. « Correlation of Yield strength and Tensile strength with hardness for steels ». *Journal of Materials Engineering and Performance*, volume 17, numéro 6, pp. 888-893.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2009 « R: A Language and Environment for Statistical Computing ». Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Repéré à <http://www.R-project.org>
- RUDNEV, V., D. LOVELESS, R. COOK et M. BLACK. 2003a. « *Handbook of Induction Heating* ». New York: Marcel Dekker Inc.
- RUDNEV, V., D. LOVELESS, R. COOK et M. BLACK. 2003b. « Induction Hardening of Gears: a Review ». *Heat Treatment of Metals*, volume 30, numéro 4, pp. 97-103.
- RUDNEV, Valery I. 2009. « Single-coil dual-frequency induction hardening of gears ». *Heat treating progress*, pp. 9-11.
- SADIKU, Matthew N. O. 2001. « *Elements of Electromagnetics* ». (Third Edition^e éd.). Oxford, New York: Oxford University Press, Inc.
- SHAW, B. A., C. AYLOTT, P. O'HARA et K. BRIMBLE. 2003. « The role of residual stress on the fatigue strength of high performance gearing ». *International Journal of Fatigue*, volume 25, numéro 9-11, pp. 1279-1283.
- SINGH, A. 2001. « An experimental investigation of bending fatigue initiation and propagation lives ». *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, volume 123, numéro 3, pp. 431-435.

- SOUZA, M. C. F., M. SACCO et A. J. V. PORTO. 2006. « Virtual manufacturing as a way for the factory of the future ». *Journal of Intelligent Manufacturing*, volume 17, numéro 6, pp. 725-735.
- STEPHENS, R. I., A. FATEMI, R. R. STEPHENS et H. O. FUCHS. 2000. « *Metal fatigue in engineering* ». : Wiley-Interscience.
- Terry Therneau and Original R port by Thomas Lumley. 2009 « survival: Survival analysis, including penalised likelihood. ». (Version R package version 2.35-7). Repéré à <http://CRAN.R-project.org/package=survival>
- TOWNSEND, Dennis P., Berl B. BABER et Andrew NAGY. 1979. « Evaluation of High-Contact-Ratio Spur Gears With Profile Modification ». *NASA Technical Paper*, numéro 1458
- WHEITNER, J. et D. R. HOUSER. (1994). « Investigation of the Effects of Manufacturing Variations and Materials on Fatigue Crack Detection Methods in Gear Teeth ». Columbus, Ohio: The Ohio State University. 118 p.
- WOODS, J. L., S. R. DANIEWICZ et R. NELLUMS. 1999. « Increasing the bending fatigue strength of carburized spur gear teeth by presetting ». *International Journal of Fatigue*, volume 21, numéro 6, pp. 549-556.
- YANG, Q. J. 1996. « Fatigue test and reliability design of gears ». *International Journal of Fatigue*, volume 18, numéro 3, pp. 171-177.
- ZURN, Z. et C. RAZIM. 1989. « On the fatigue strength of case hardened parts ». *Carburizing: processing and performance. Proceedings of an international conference*. pp. 239-248. Metals Park, OH: ASM International.