



**HAL**  
open science

# Etude expérimentale de l'usure et de l'échauffement d'un contact électrique glissant : application caténaire-pantographe

Théo Kziazzyk

► **To cite this version:**

Théo Kziazzyk. Etude expérimentale de l'usure et de l'échauffement d'un contact électrique glissant : application caténaire-pantographe. Energie électrique. Université Bourgogne Franche-Comté, 2023. Français. NNT : 2023UBFCD043 . tel-04468053

**HAL Id: tel-04468053**

**<https://theses.hal.science/tel-04468053v1>**

Submitted on 20 Feb 2024

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

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

**THÈSE DE DOCTORAT**

**DE L'ÉTABLISSEMENT UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE-FRANCHE-COMTE**

**PRÉPARÉE À L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ**

Ecole doctorale n°37

SPIM : Science Pour l'Ingénieur et Microthechniques

Doctorat de Génie Energétique

par

**Théo KZIAZYK**

**Étude expérimentale de l'usure et de l'échauffement d'un contact  
électrique glissant :  
Application caténaire–pantographe**

Présentée publiquement à Belfort, le 10 novembre 2023, devant le Jury composé de :

Pr. SIROUX Monica	INSA de Strasbourg	Présidente du Jury
MCF. BOUZERAR Robert	Université de Picardie Jules Verne	Rapporteur
Pr. SARI Ali	Université Lyon 1	Rapporteur
Pr. CHAMAGNE Didier	Université de Franche-Comté	Directeur de thèse
MCF. BAUCOUR Philippe	Université de Franche-Comté	Codirecteur de thèse
MCF. GAVIGNET Éric	Université de Franche-Comté	Encadrant
Pr. CORNUAULT Pierre-Henri	Université de Franche-Comté	Invité
M. PEDRON Adrien	SNCF	Invité



**Titre :** Étude expérimentale de l'usure et de l'échauffement d'un contact électrique glissant : application caténaire-pantographe

**Mots-clés :** Liaison pantographe-caténaire, contact électrique glissant, usure, métrologie, étude expérimentale, échauffement, graphite

**Résumé :**

L'objet de ces travaux expérimentaux est l'étude de la liaison pantographe-caténaire, et plus précisément du contact électrique glissant entre la bande de captage et le fil de contact. En effet, de nombreuses problématiques touchent encore ce système essentiel pour alimenter les transports électrifiés et particulièrement les trains. Parmi elles, l'échauffement et l'usure de la bande de captage en sont les principales causes. Ainsi, cette thèse est la continuité de deux thèses CIFRE et d'un Post-Doc financés par la SNCF. Durant ce dernier, un banc d'essais a été conçu et mis en place. L'objet de ces travaux est de rendre ce banc d'essais fiable et robuste, par exemple

en développant des modules embarqués d'instrumentation ou en apportant des modifications structurelles. Une méthodologie expérimentale a ensuite été mise au point pour pouvoir réaliser des essais d'usure et d'échauffement sur des échantillons des bandes de captage. Par exemple, une méthode de mesure de l'usure innovante a notamment été développée. Enfin, des essais s'appuyant sur des plans d'expériences ont été menés suivis de l'analyse des données. L'explication des phénomènes observés s'appuie sur des mesures de diffusivité thermique des nuances réalisées en 3D au sein du laboratoire.

**Title :** Experimental study of wear and heating of a sliding electrical contact :

**Keywords :** Catenary-pantographe link, sliding electrical contact, wear, metrology, experimental study, heating, graphite

**Abstract :**

This thesis relates on experimental studies that focus on the catenary-pantograph link and more precisely on the sliding electrical contact between the contact wire and the strip. This system is used to supply electrical transports like trains and tramways and is subject to heavy maintenance caused by heat and wear of the strip. This work is a continuation of two CIFRE thesis and one post-doc financed by SNCF. During this latter, a test-bench representing the catenary-pantograph link has been designed and mainly built. The purpose of this work is firstly to make the test bench work with good robustness and fiability. For example, embedded modules of instru-

mentation have been developed and structural modifications have been brought. Secondly, an experimental methodology has been developed in order to realize experimental heat and wear tests. In this context, a novel wear measurement method has been designed. Finally, experimental tests have been realized on different types of strips and based on experimental designs. The data have then been analyzed and discussed. The phenomena observed were then explained with the help of thermal diffusivity measures of nuances in 3D that were realized in the laboratory.



---

# REMERCIEMENTS

Je souhaite en premier lieu remercier les membres du jury : **Monica Siroux** pour avoir présidé la soutenance et **Robert Bouzerar** et **Ali Sari**, rapporteurs de ces travaux, qui ont accepté de lire, évaluer et commenter ces travaux. Je remercie aussi **Adrien Pedron** et **Pierre-Henri Cornuault** pour avoir assisté et commenté mes travaux lors de leur présentation.

Je remercie l'équipe d'encadrement **Didier Chamagne**, **Philippe Baucour** et **Eric Gavignet** pour leur confiance qu'ils m'ont accordé pour mener à bien cette thèse. Ils ont su être disponibles tout au long de ces quatre années lors de réunions d'avancement en apportant leurs critiques et points de vue. Leur nombreuses relectures et corrections ont également apportées précision et clarté au manuscrit. Je remercie Eric pour les nombreux échanges conviviaux et amicaux et pour les multiples coups de main qu'il m'a donnés dans la réalisation et le développement de l'instrumentation et du logiciel. Merci aussi à Philippe d'avoir partagé sa passion des outils informatiques open-sources et son talent pour la synthèse et la mise en forme des données. Côté industriel, merci à **Adrien Pedron** et **Gerard Auditeau** pour leur patience et l'intérêt qu'ils ont portés pour ces recherches.

Je souhaite témoigner ma reconnaissance à **Pierre-Henri Cornuault** pour avoir répondu à mon "appel au secours" et s'être rendu disponible en apportant ses compétences en tribologie. Il a largement contribué, malgré son emploi du temps déjà bien chargé, au développement de la méthodologie touchant à l'usure et à la gestion du troisième corps. Merci aussi d'avoir mis à disposition le microscope optique Alicona, pour lequel il m'a formé et donné sa confiance pour l'utiliser en autonomie. Cette rencontre n'aurait pas pu avoir lieu sans **Solène Barlemont** qui nous a mis en relation. Merci à elle, **Guilherme Bernardes**, **Etienne Louyot** et plus largement à l'équipe des doctorants du Département de Mécaniques Appliquées (DMA) de l'Institut FEMTO-ST qui m'ont toujours accueilli. J'ai réellement apprécié les échanges qu'on a pu avoir lors de mes venues à Besançon.

Ces travaux n'auraient peut-être pas pu aboutir, ou à minima avec bien plus de retard, sans la présence et le bon vouloir des techniciens usineurs du laboratoire **Bernard Rothlisberger** et **Laurent Callegari**. En dehors des nombreuses pièces usinées, ils sont sortis de leur domaine de compétence avec patience et détermination en trouvant des solutions à de nombreux problèmes mécaniques pouvant être parfois complexes. **Dominique Surdyk** et **Steve Djetel** ont aussi apporté leur pierre à l'édifice. Merci à **Gerard Michel** et **Arnaud Mutuel** pour m'avoir filé un coup de main dans le découpage des pions dans ces blocs de graphite cassant et poussiéreux. Mes remerciements à **Tianjiao Li** et **Serge Vives** pour avoir pris le temps de me montrer le fonctionnement du banc *LFA1000*. Enfin, merci à **Julien Petitgirard** qui m'a souvent aidé, par exemple pour réaliser et caractériser les thermocouples de type K. Ca a été un vrai plaisir d'être collègues de bureau pendant ces quelques années.

En dehors de la partie technique et recherche, je souhaite exprimer ma gratitude à **Isabelle Christen** qui a toujours su résoudre les tracas administratifs, le tout avec humanité, patience et empathie. Merci aussi à **Bruno Riccio** et **Sophie Granon** pour avoir résolu tous mes "tickets", c'est-à-dire passé les centaines de commandes et remboursements de missions avec réactivité et flexibilité suivant l'urgence des besoins. Ma reconnaissance va aussi à **Thérèse Leblois**, directrice de l'ED SPIM, pour son incroyable réactivité, flexibilité et empathie et tout également à **Alika Rossetti**, qui a

notamment été patiente face à mes oublis et mes retards administratifs.

Ces travaux ont été de nombreuses fois vulgarisés à travers différents ateliers : ma thèse en 180 secondes, Experimentarium, Pint of Science, etc... Merci à l'incroyable équipe des services sciences, arts et culture de l'Université de Franche-Comté, **Jeremy Querenet**, **Magali Cabanas** et **Jeanne-Antide Leque** d'avoir organisé et encadré ces ateliers. Je conseille par ailleurs à tou.te.s les doctorant.e.s d'assister à ces formations qui permettent d'être à l'aise à l'oral et de mieux synthétiser ses recherches dans un cadre bienveillant tout en passant un agréable moment. Cela permet également de rencontrer des doctorant.e.s d'autres horizons. C'est à travers l'une de ces formations que j'ai rencontré Solène et que le lien avec l'équipe de tribologie du DMA a été noué. Merci aussi à **Romain Tabusse** et **Clotilde Robert**, ami.e.s vulgarisateur et vulgarisatrice que j'ai apprécié côtoyer.

Comme tout travail, une thèse se déroule d'autant mieux dans un environnement dynamique et convivial. Merci à **Bernard, François, Julien, Laurent, Fatima, Steve** et **Isabelle** pour avoir été fidèles au poste lors des cafés du matin. Merci à toute l'équipe d'Ananke ; **Pierre, Gauthier, Thibault, Xavier** ou **Elena** ; pour ceux et celles que j'ai le plus côtoyé ; d'insuffler du dynamisme au laboratoire et de m'avoir inclus dans les parties de *babyfoot* démentes qui défoulent.

Comme on peut souvent le lire dans les remerciements, venir à bout d'une thèse requiert régulièrement un gros soutien psychologique. Pour ma part, j'aurais clairement fait une sorti de route en signant un abandon de thèse sans ce soutien. Ce dernier, je le dois aux ami.e.s Belfortain.e.s, **Pierre, Cécile** ou **Thomas**, à ma famille et à ma compagne. Je dois notamment une fière chandelle à **mon oncle, mes grands-parents** et **ma mère**. Cette dernière a toujours été présente, d'autant plus à la toute fin ou elle a marqué les esprits avec ses délicieux desserts préparés lors du pot de thèse. Je suis énormément redevable à ma chère **Julie** pour ses longues heures de relecture et de correction du manuscrit, pour son soutien et pour avoir supporté mes galères et mes humeurs. Merci d'être restée positive et de m'avoir aidé à garder confiance en moi.

Ces remerciements pourraient n'en plus finir. Ainsi, je les conclus par de sincères excuses à ceux et celles qui n'y ont pas été cité.e.s.



---

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Analyse bibliographique</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction	3
1.1.1 Contexte	3
1.1.2 Les liaisons électriques	4
1.1.3 La caténaire	6
1.1.4 Le pantographe	7
1.1.5 Problématiques rencontrées	8
1.2 Physique du contact	10
1.2.1 Aspect mécanique	10
1.2.2 Nature de la bande de captage	11
1.2.3 Aspect tribologique : frottement et contact	11
1.2.4 Aspect tribologique : les différents types d'usure	13
1.2.5 Aspect électrique	15
1.2.6 Aspect thermique	17
1.3 Travaux antérieurs	19
1.3.1 Contact statique	20
1.3.2 Contact en mouvement	20
1.4 Bancs d'essais représentatifs de la liaison pantographe caténaire	21
1.4.1 Structure pion-disque	22
1.4.2 Structure bande-anneau	23
1.4.3 Banc d'essai échelle à échelle réelle	23
1.4.4 Autres bancs d'essais	24
1.5 Synthèse des résultats	26
1.5.1 Environnement	28
1.5.2 Matériaux	28
1.5.3 Force de contact	29
1.5.4 Vitesse de glissement et de balayage	31
1.5.5 Courant	33
1.6 Conclusion	35
<b>2 Description du banc d'essais</b>	<b>39</b>
2.1 Actionneurs	42
2.1.1 Moteur	42

2.1.2	Vérin d'appui . . . . .	42
2.1.3	Vérin de translation . . . . .	44
2.1.4	Alimentation . . . . .	45
2.2	Instrumentation . . . . .	46
2.2.1	Couple et vitesse de rotation . . . . .	46
2.2.2	Force normale et force transversale . . . . .	47
2.2.3	Vibrations . . . . .	48
2.2.4	Position transversale du pion . . . . .	49
2.2.5	Courant et tension . . . . .	50
2.2.6	Température du pion . . . . .	50
2.2.7	Température du disque . . . . .	53
2.2.8	Calcul d'incertitudes sur les thermocouples . . . . .	55
2.3	Contrôle, commande et acquisition . . . . .	59
2.3.1	Architecture . . . . .	60
2.3.2	Stratégie de contrôle . . . . .	60
2.3.3	Acquisition des données . . . . .	64
2.3.4	Interface graphique . . . . .	66
2.4	Exemple représentatif d'un essai . . . . .	68
2.5	Conclusion . . . . .	68
<b>3</b>	<b>Fiabilisation et méthodologie expérimentale</b>	<b>71</b>
3.1	Évolution structurelle du banc d'essais . . . . .	71
3.1.1	Maintien du disque . . . . .	71
3.1.2	Contrôle-commande du moteur et structure de transmission . . . . .	74
3.1.3	Balayage du pion . . . . .	77
3.1.4	Méthode d'alimentation et résistance électrique du système . . . . .	78
3.2	Mesure de l'usure du pion . . . . .	83
3.2.1	Utilisation d'encoches de référence . . . . .	83
3.2.2	Fabrication des pions en graphite . . . . .	84
3.2.3	Méthode de prise d'empreinte . . . . .	85
3.2.4	Fabrication des répliques . . . . .	86
3.2.5	Étude au microscope . . . . .	86
3.2.6	Analyse et mesure de volume . . . . .	86
3.2.7	Incertitude . . . . .	87
3.2.8	Exemple de résultats . . . . .	88
3.3	Condition initiale de surface du disque . . . . .	89
3.3.1	Traitement de la patine . . . . .	89
3.3.2	Problématique du cuivre neuf . . . . .	90
3.3.3	Oxydation du cuivre . . . . .	91
3.3.4	Altération de la surface du cuivre . . . . .	91
3.4	Conclusion . . . . .	94
<b>4</b>	<b>Analyse et discussion des résultats</b>	<b>97</b>
4.1	Introduction et objectifs des essais . . . . .	97
4.2	Caractéristiques des bandes étudiées . . . . .	97
4.2.1	Résultats d'usure en ligne . . . . .	98
4.2.2	Résultats d'échauffement sur le banc de Polimi . . . . .	98
4.2.3	Propriétés thermiques des nuances . . . . .	101
4.2.4	Synthèse sur les nuances . . . . .	106
4.3	Plans d'expériences . . . . .	106
4.3.1	Plan complet . . . . .	107
4.3.2	Plan fractionnaire . . . . .	109

4.3.3	Analyse de la variance . . . . .	110
4.4	Comportement thermique du pion . . . . .	112
4.4.1	Température et hauteur entre la sonde et le contact . . . . .	112
4.4.2	Évolution des températures des sondes du pion . . . . .	113
4.5	Échauffement du contact . . . . .	117
4.5.1	Caractéristique des essais . . . . .	117
4.5.2	Résultats . . . . .	117
4.5.3	Analyse de la variance . . . . .	120
4.6	Origine de l'usure du pion . . . . .	121
4.6.1	Méthode . . . . .	122
4.6.2	Première analyse . . . . .	124
4.6.3	Synthèse des résultats . . . . .	127
4.6.4	Résultats statistiques . . . . .	129
4.6.5	Conclusion . . . . .	131
	<b>Conclusion</b>	<b>133</b>
	<b>Perspectives</b>	<b>137</b>
	<b>A Étapes suivies sur le logiciel Gwyddion</b>	<b>149</b>
	<b>B Résultats d'usures</b>	<b>151</b>



# TABLE DES FIGURES

1.1	Évolution du réseau ferré national français : toutes voies confondues et voies électrifiées [1]. . . . .	3
1.2	Proportion des trains électrifiés, thermiques ou en bi-mode par type de réseau [1]. . . . .	4
1.3	Camions à pantographe sur une voie d'autoroute équipée d'une caténaire. Photo extraite d'une communication de Siemens [2]. . . . .	4
1.5	Schéma d'une caténaire vue de dessus : mise en lumière de son désaxement. . . . .	6
1.6	Schéma d'un pantographe en "Z" et son modèle masse/ressort/amortisseur à trois étages [3]. . . . .	7
1.7	Schéma des bandes de captage montées sur leur archet. . . . .	8
1.8	Fil de contact en cuivre-argent après test d'usure : (a) section où l'usure mécanique est prédominante et (b) section où une usure due au courant et aux arcs est observée (photo issues de Derosa.S et al [4]). . . . .	9
1.9	Modèle mécanique du pantographe et du fil de contact. . . . .	10
1.10	Structure du graphite : (a) schéma d'une couche de graphène et de ses liaisons covalentes $\pi$ et $\sigma$ , (b) schéma de couches de graphène liées par liaisons Van der Waals, formant le graphite. . . . .	11
1.11	Schéma du contact entre le pantographe et le fil de contact : (a) vue macroscopique et contact apparent, (b) vue microscopique, (c) différence entre contact apparent et contact réel. . . . .	13
1.12	Schémas des principaux types d'usure intervenant dans une LPC. . . . .	14
1.13	Résistance de contact électrique avec différents matériaux frottant contre du cuivre, inspiré de la thèse de Grandin [5]. Cu70, Cu26, Cu6 équivalent à des nuances de graphite imprégné en cuivre à respectivement 70 %, 26 % et 6 %. Cu équivaut à du cuivre pur. . . . .	16
1.14	Évolution temporelle du coefficient de partage, pour un objet fixe en pression sur un disque en rotation, à différentes vitesses et à différents rapports de conductivité ( $k_1$ étant la conductivité du corps fixe et $k_2$ celle du disque en mouvement). . . . .	18
1.15	Écoulement d'air autour d'une bande de captage pour un train roulant à $140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , travaux tirés de du mémoire de stage de Magny.S [6]. . . . .	20
1.16	Profil de température au centre de la bande de captage [7]. . . . .	21
1.17	Effet du point de rebroussement sur le profil de température [7]. . . . .	21
1.18	Configuration du banc d'essai de l'Université de génie électrique, Xi'an, Chine, traduit d'un article de Yang,Z et al. [8, 9, 10]. . . . .	23
1.20	Schéma du banc d'essais de POLIMI, utilisé pendant les travaux de N. Delcey. . . . .	25
1.22	Visualisation d'une liaison pantographe caténaire comme système à entrées/sorties avec des propriétés physiques et des phénomènes intermédiaires. . . . .	26
1.23	(a) Mesures d'usure en fonction du taux d'imprégnation en cuivre dans des nuances de graphite. Résultats de trois auteurs [11, 10, 12]. (b) Tendances de l'usure en fonction de la teneur en cuivre dans le graphite. (1) Graphite pur à résistance électrique importante, (2) structure du matériau affaibli par la présence d'un faible taux de cuivre, (3) apparition d'une matrice de cuivre, (4) point optimal, (5) sensibilité à l'oxydation car trop de cuivre, (6) perte des propriétés auto-lubrifiantes du graphite. . . . .	30



1.25	Résultats de taux d'usure en fonction de la vitesse de balayage, obtenus via un modèle basé sur des résultats expérimentaux du CCTB. Courbes reprises d'un article de Derosa.S et al. [13]. . . . .	32
1.26	Effets de la température et du courant sur le coefficient de frottement, inspiré d'un article de Ding.T et al. [14]. . . . .	33
1.29	Impacts du courant sur un contact électrique glissant. . . . .	36
1.30	Bilan des nombreuses composantes, ainsi que leurs niveaux d'avancement, consacrés à l'étude de l'usure et de l'échauffement des bandes de captage dans une liaison pantographe-caténaire. . . . .	37
2.1	Synoptique du banc d'essais. . . . .	40
2.2	Schéma d'un train et de sa caténaire présentant les paramètres du contact pantographe caténaire reproduits sur le banc d'essais. . . . .	40
2.3	Entrées et sorties du banc d'essais. . . . .	41
2.4	Schéma du système gérant la rotation du disque en cuivre. . . . .	42
2.5	Schéma du système permettant la mise en pression du pion sur le cuivre. . . . .	43
2.6	Schéma du système gérant le balayage du pion sur le cuivre. . . . .	44
2.7	Schéma du système gérant l'alimentation du pion. . . . .	45
2.9	Schéma de positionnement des cellules de pesage mesurant les forces normale $F_N$ et transversale $F_T$ . . . . .	48
2.15	Écart entre les températures mesurées et la température de référence, dans une configuration où les thermocouples et la PT100 sont dans le bain thermostatique. . . . .	53
2.16	Module d'instrumentation permettant la mesure de la température du disque : <b>(a)</b> Positionnement du pion et des thermocouples sur le disque, <b>(b)</b> Photo du module. . . . .	54
2.17	Description de l'instrumentation permettant la mesure de la température du disque : <b>(a)</b> schéma du fonctionnement axé sur l'ensemble micro-contrôleurs, amplificateurs, thermocouples et <b>(b)</b> exemple de courbes de caractérisation. . . . .	55
2.18	Incertitudes de dispersion et de reproductibilité calculées sur 9 jeux de 3 thermocouples. Chaque point représente une dispersion ou une reproductibilité sur un ensemble de mesures ( $N>100$ ) à une certaine température ( $20\text{ °C} < T < 95\text{ °C}$ ). . . . .	57
2.19	Incertitudes de dispersion et de reproductibilité calculées sur les 26 thermocouples et leurs chaînes d'acquisition en fonction de la température de consigne. . . . .	58
2.20	Architecture d'agencement du matériel de contrôle-commande et des grandeurs associées. . . . .	61
2.21	Architecture des programmes implémentés sur le cRIO, basés sur la philosophie UNIX : "Écrivez des programmes qui effectuent une seule chose et qui le font bien". . . . .	62
2.22	Exemple d'enregistrement de position lors d'un essai à vitesse de balayage de $8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . . . . .	63
2.23	Consigne et mesure de vitesse de rotation, et écart entre les deux, pour un essai à vitesse linéaire de $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et vitesse de balayage de $16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . . . . .	63
2.24	Consigne, mesures filtrées et mesures lissées de la force normale $F_N$ pour un essai dont la consigne est de 90 N. . . . .	64
2.25	Interface graphique permettant de contrôler le banc d'essai. . . . .	66
2.26	Fenêtre de contrôle spécifique aux vibrations en x, y et z et aux forces normale et transversale de contact. . . . .	66
2.27	Exemple d'un début d'essai (nuance A, $F_N=60\text{ N}$ , $I=60\text{ A}$ , $v_l=30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , $v_b=8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ et $k=4\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ). . . . .	68
3.1	(a) Ajout d'un arbre en acier et de deux paliers entre le renvoi d'angle et le disque en cuivre, (b) bride du disque par rapport à l'arbre en début de thèse et (c) après modification. . . . .	72
3.2	Disque sous contrainte mécanique et prêt à être chauffé pour faire une correction de planéité. . . . .	73
3.3	Différents roulements et roues utilisés comme points d'appui du disque : <b>(a)</b> roulement en acier trempé et copeaux liés à l'usure de la bande de roulement, <b>(b)</b> bande de roulement usée, <b>(c)</b> roues fabriquées/achetées et testées comme support du disque et <b>(d)</b> roue de luge de rue cassée dont les ailettes du noyau ont fondu. . . . .	73
3.5	Mesure du couple de frottement pour différentes vitesses de rotation ( $F_N=80\text{ N}$ et $I=60\text{ A}$ ou $I=0\text{ A}$ ). (a) Couple de frottement en fonction de la vitesse de rotation et (b) Couple de frottement en fonction du coefficient de frottement. . . . .	76

3.6	Calcul du couple d'accélération : (a) valeurs maximales en fonction de la vitesse linéaire et pour différentes vitesses de balayages calculées et (b) couple en fonction de la position du pion, pour différentes vitesses linéaires ( $v_b=16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). . . . .	77
3.10	Variations de tension, courant, vitesse et vibrations mesurées par l'AEF lors d'un essai en ligne en fonction du temps (1,5 kV DC). . . . .	81
3.11	(a) Variations de tension et de courant mesurées et résistance calculée en fonction du temps ( $v_l=90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , $I=60 \text{ A}$ , $F_N=60 \text{ N}$ , $v_b=12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) et (b) circuit électrique équivalent du banc sans charge. . . . .	81
3.12	Différents câblages des patins et du pion permettant de mesurer $R_{s,0}$ , $R_{s,1}$ , $R_{s,2}$ et $R_{s,3}$ . . . . .	82
3.13	(a) Résistances calculées dans différentes configurations, (b) Résistance de contact pion/disque et résistance équivalente des patins en parallèle $R_{p,eq}$ en fonction de la vitesse linéaire ( $F_N=60 \text{ N}$ , $I=60 \text{ A}$ , $v_b=12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ). . . . .	82
3.14	(a) Schéma de découpe du pion (unité en mm), (b) Rendu visuel vues de face, de dessous et de profil et (c) schéma d'utilisation des encoches permettant de mesurer le pion. . . . .	83
3.15	(a) Essai de découpe d'un pion au jet d'eau, (b) découpe de pion idéale (par électro-érosion), (c) pion ayant des défauts et inutilisable en essai et (d) problématique rencontrée lors de tentatives de découpes au fil. . . . .	84
3.16	Processus de fabrication d'une réplique du volume d'un pion : (a) Pistolets utilisés pour injecter le silicone et la résine. (b) Mouille de la surface du pion au silicone pour éviter les bulles d'air. (c) Trempe du pion dans un bain de silicone et (d) négatif du volume étudié. (e) Négatifs remplis de résine puis (f) mis sous pression dans un cuiseur vapeur pour faire remonter les bulles d'air. (g) Résine démoulée qui est une copie du volume étudié et (h) microscope utilisé à SUPMICROTECH-ENSM de Besançon pour mesurer le volume. . . . .	85
3.17	Coupe du volume observée sur le programme Gwyddion et visualisation des différentes étapes permettant la mesure du volume. (a) Estimation et remplacement des points noirs et (b) nivellement de la surface de contact à partir de plan de référence. . . . .	87
3.18	Répétition de mesure de volume sur dix répliques réalisées sur un même pion. . . . .	88
3.19	Calcul du volume perdu du pion (Nuance A, $\rho=2,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) par la mesure de la masse avant et après essai et par mesure de volume à différentes distances, en fonction de la distance. Test 1 : $F_N=90 \text{ N}$ , $v_l=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , $I=60 \text{ A}$ , $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ , $v_b=16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Test 2 : $F_N=60 \text{ N}$ , $v_l=29 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , $I=60 \text{ A}$ , $k=12 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ , $v_b=16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . . . . .	88
3.20	Photos du disque ayant différents états de surface : (a) patine après essai standard, (b) patine présentant des dépôt par arcs électriques et (c) disque poli. . . . .	89
3.21	Variations des températures du pion et coefficient de frottement en fonction du temps. Essais menés après polissage du disque. Les données (a) et (b) proviennent d'essais distincts réalisés dans les mêmes conditions (nuance A, $v_l=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , $F_N=60 \text{ N}$ , $v_b=12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ , $I=0 \text{ A}$ ). . . . .	90
3.22	Évolution de l'épaisseur de la couche d'oxyde de cuivre recouvrant une plaque de cuivre pur en fonction du temps, données expérimentales adaptées d'un article de Rhodin T. N. Jr [15], (a) avec une échelle de temps linéaire et (b) avec une échelle de temps logarithmique. . . . .	92
3.23	Exemple de détérioration partielle de la surface du disque en cuivre sur trois rayons différents, (a) vue sous forme de pics d'échauffement et (b) observation visuelle. Essai réalisé à vitesse de rotation constante ( $v_{\text{rot}}=350 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ , $F_N=80 \text{ N}$ , $I=0 \text{ A}$ , $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ , $v_b=8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ et $d_b=200 \text{ mm}$ ). . . . .	92
4.1	Répartition dans la bande de captage et numéros des thermocouples mis en place par N. Delcey lors de ses essais à Polimi. . . . .	99
4.2	Exemple de courbes d'échauffement et de courant observées pendant un essai réalisé par N. Delcey à Polimi (nuance A, bande de 18 mm d'épaisseur, $F_N=60 \text{ N}$ ; $v_l=140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ )[16]. . . . .	100
4.3	(a) Températures moyennes $T_{\text{moy}}$ et (b) températures moyennes sur le courant au carré $\left(\frac{T_{\text{moy}}}{I^2}\right)$ en fonction du courant et de la force de contact (pour rappel $v_l=140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , bandes d'épaisseur 18 mm). . . . .	100
4.4	Réponse du capteur infrarouge et du modèle en fonction du temps. . . . .	102
4.5	Diffusivités thermiques de chaque nuance $\alpha_x$ , $\alpha_y$ et $\alpha_z$ à différentes températures. . . . .	102
4.6	Diffusivités thermiques $\alpha_x$ , $\alpha_y$ et $\alpha_z$ de la nuance B à différentes températures. . . . .	103
4.7	Régressions linéaires des diffusivités thermiques en fonction de la température, selon les axes $x$ , $y$ , et $z$ et pour les trois nuances A, B et C. . . . .	104

4.8	Incertitudes de dispersion et de répétabilité en fonction de la température. . . . .	105
4.9	Exemple d'un plan complet de deux facteurs $x_A$ et $x_B$ à deux niveaux : (a) pas d'interaction, (b) interaction entre $x_A$ et $x_B$ . . . . .	108
4.10	Variation des températures moyennes de chaque couronne $T_{c1}$ , $T_{c2}$ et $T_{c3}$ et de la température moyenne du disque $T_d$ en fonction du temps (voir figure 2.16 (a)). . . . .	112
4.11	Pour différents courants et vitesses linéaires ( $F_N=60$ N, Nuance A), (a) distance parcourue en fonction de la hauteur du thermocouple 1 $h_{T_1}$ et (b) température $\Delta T_1$ en fonction de la hauteur $h_{T_1}$ . . . . .	113
4.12	(a) Pince entourée d'un cache en aluminium et de feuilles de plastique permettant de limiter la convection. (b) Géométrie du pion, de la pince en cuivre et des pièces en plastique de PTFE l'entourant. . . . .	114
4.13	Évolution de la température en fonction du courant injecté et de la hauteur des thermocouples par rapport au contact $h_c$ (Nuance B, $v_l=30$ km·h <sup>-1</sup> et $F_N=70$ N). . . . .	115
4.14	Variation des écarts de température en fonction du temps (Nuance B, $I=200$ A, $v_l=30$ km·h <sup>-1</sup> et $F_N=70$ N). . . . .	115
4.15	Schémas explicatif du déséquilibre entre $T_1$ , $T_2$ et $T_3$ : (a) convection sur la surface du pion sortante de la pince, (b) conduction dans le disque et les fils électriques et (c) échauffement interne du pion. . . . .	116
4.16	Variations de la température moyenne en fonction de la force de contact pour différentes vitesses linéaires et différents courants. . . . .	118
4.17	(a) Valeurs de la température $\bar{T}_1$ en fonction du courant $\bar{I}$ , (b) vue 3D de cette même figure en fonction de la tension $\bar{U}$ . . . . .	119
4.18	Variation des températures $T_1$ , $T_2$ et $T_3$ et de la tension $U$ en fonction du temps à différents courants ( $v_l=57$ km·h <sup>-1</sup> et $\bar{F}_N<50$ N). . . . .	119
4.19	Analyse de la variance de la température $\bar{T}_1$ , de la tension $\bar{U}$ et de la puissance $\bar{P}$ , (a) pour le jeu de données complet et (b) lorsque $\bar{F}_N>50$ N. . . . .	121
4.20	(a) Réponse des températures $\bar{T}_1$ et $\bar{T}_3$ et (b) tension $\bar{U}$ en fonction de la force de contact moyenne $\bar{F}_N$ et pour différentes valeurs de courant injecté $I$ (toutes vitesses linéaires $v_l$ confondues). . . . .	122
4.21	Différentes formes d'échauffement observées en fonction du temps (configuration des tests tableau 4.15 et valeurs des facteurs tableau 4.14). . . . .	125
4.22	Premiers résultats d'usure (échelle logarithmique) en fonction du test triés par ordre croissant, catégorisés par type de nuance et type d'échauffement observé. . . . .	127
4.23	Taux d'usures calculés pour chaque test, (a) échelle linéaire et (b) échelle logarithmique. . . . .	129
4.24	Diagrammes circulaires représentant l'analyse de la variance de chaque réponse en fonction des alias. . . . .	130
4.25	Taux d'usure en fonction du ratio du centile 98 (ou 85) sur la moyenne de (a) la température $T_1$ , (b) la tension aux bornes de l'alimentation $U$ et (c) le coefficient de frottement $\mu$ . . . . .	131
4.26	Exemple d'une photo, prise dans le noir pour un temps d'exposition de 25 s ( $F_N=60$ N, $I=120$ A, $v_b=8$ mm·s <sup>-1</sup> , $k=4$ N·mm <sup>-1</sup> et $v_l=60$ km·h <sup>-1</sup> ). . . . .	138
4.27	Schéma d'amélioration du banc d'essais, par l'ajout d'un fil de contact à sa périphérie. . . . .	139
A.1	Captures d'écran des différentes étapes suivies pour mesurer les volumes : (a) visualisation brute, (b) mise à niveau des couleurs sur deux niveaux, (c) masque rose des points en-dessous d'un seuil, (d) suppression du masque extérieur, (e) rendu après interpolation des points noirs et cadrage (f) masques (roses) tracés sur chaque surface de référence, et rectangle (rouge) de mesure de volume tracé après nivellement. . . . .	150
B.1	Test 1 : $F_N=60$ N, $I=60$ A, $v_b=8$ mm·s <sup>-1</sup> , $k=4$ N·mm <sup>-1</sup> et $v_l=30$ km·h <sup>-1</sup> . . . . .	151
B.2	Test 2 : $F_N=60$ N, $I=60$ A, $v_b=16$ mm·s <sup>-1</sup> , $k=12$ N·mm <sup>-1</sup> et $v_l=30$ km·h <sup>-1</sup> . . . . .	152
B.3	Test 3 : $F_N=60$ N, $I=120$ A, $v_b=8$ mm·s <sup>-1</sup> , $k=4$ N·mm <sup>-1</sup> et $v_l=60$ km·h <sup>-1</sup> . . . . .	152
B.4	Test 4 : $F_N=60$ N, $I=120$ A, $v_b=16$ mm·s <sup>-1</sup> , $k=12$ N·mm <sup>-1</sup> et $v_l=60$ km·h <sup>-1</sup> . . . . .	152
B.5	Test 5 : $F_N=90$ N, $I=60$ A, $v_b=8$ mm·s <sup>-1</sup> , $k=12$ N·mm <sup>-1</sup> et $v_l=60$ km·h <sup>-1</sup> . . . . .	153
B.6	Test 6 : $F_N=90$ N, $I=60$ A, $v_b=16$ mm·s <sup>-1</sup> , $k=4$ N·mm <sup>-1</sup> et $v_l=60$ km·h <sup>-1</sup> . . . . .	153
B.7	Test 7 : $F_N=90$ N, $I=120$ A, $v_b=8$ mm·s <sup>-1</sup> , $k=12$ N·mm <sup>-1</sup> et $v_l=30$ km·h <sup>-1</sup> . . . . .	153
B.8	Test 8 : $F_N=120$ N, $I=120$ A, $v_b=16$ mm·s <sup>-1</sup> , $k=4$ N·mm <sup>-1</sup> et $v_l=30$ km·h <sup>-1</sup> . . . . .	154

---

# LISTE DES TABLEAUX

1.1 Valeur de différentes raideurs et amortissements pour deux types de pantographes. . . . .	7
1.2 Rapport de la surface de contact réelle sur la surface de contact apparente à différentes forces pour différents métaux [17]. . . . .	13
1.3 Résistance de constriction pour un contact ponctuel entre du cuivre et différentes nuances et différents rayons. Les résistivités des matériaux sont extraites de différents articles [18, 11]. . . . .	16
1.4 Liste et caractéristiques des bancs d’essais conçus pour étudier la liaison caténaire pantographe. . . . .	22
1.5 Principales caractéristiques des matériaux utilisés par les auteurs [19]. . . . .	29
2.1 Caractéristiques du couplemètre RT2. . . . .	46
2.2 Bornes de $\nu_{\text{rot}}$ du disque et des fréquences émises sur une sortie de l’encodeur à différentes vitesses. . . . .	47
2.3 Caractéristiques des cellules de pesage utilisées pour mesurer $F_N$ et $F_T$ . . . . .	48
2.4 Incertitudes associées au banc d’étalonnage utilisé pour caractériser les systèmes de mesures de température (repris de la thèse de J. Petitgirard [20]). . . . .	56
2.5 Incertitudes associées aux chaînes d’acquisition de la mesure de la température du pion en étalonnage. . . . .	57
2.6 Incertitudes associées au système de mesures de température du disque en étalonnage. . . . .	58
2.7 Récapitulatif des capteurs installés sur le banc. . . . .	59
2.8 Répartition des blocs et des sous-blocs dans les différentes boucles du programme principal. Les valeurs de priorités des boucles sont arbitraires (la valeur de priorité par défaut sur LabVIEW est de 100). . . . .	61
2.9 Mesures et fréquences d’actualisation (ou d’échantillonnage) observées dans les trames de données. . . . .	65
2.10 Valeurs limites du banc d’essais atteintes dans ces travaux et comparaison avec les valeurs retrouvées en ligne sur un train TER. . . . .	69
3.1 Valeurs de volume mesurées sur dix répliques d’un pion identique et différence entre $V$ et $\bar{V}$ . . . . .	87
3.2 Amplitudes et durées des phases de refroidissements et d’échauffements (température $T_1$ ) observées sur la figure 3.21 (b). . . . .	91
3.3 Volumes perdus mesurés et taux d’usure calculés pour trois tests réalisés dans les mêmes conditions (Nuance A, $F_N=90$ N, $I=60$ A, $k=12$ N·mm <sup>-1</sup> , $\nu_l=60$ km·h <sup>-1</sup> et $\nu_b=8$ mm·s <sup>-1</sup> ). . . . .	94
4.1 Propriétés physique connues des nuances étudiées. . . . .	98
4.2 Mesures d’usures réalisées en ligne par la SNCF, sur deux nuances différentes, isolées ou en service. Tests réalisés sur un train circulant sur une ligne alimentée en 1,5 kV continu, avec un courant d’appel se situant entre 360 et 1400 A et une vitesse maximale 160 km·h <sup>-1</sup> . . . . .	98
4.3 Exemple des températures moyennes (°C) mesurées en différentes positions dans la bande (nuance A; $I=700$ A; $F_N=60$ N; [16]). . . . .	99
4.4 Différence de température $\Delta T$ entre la température globale de la bande A et celle de la bande B, pour différentes forces de contact et différents courants (figure 4.3 (b)). . . . .	101

4.5	Diffusivités thermiques des nuances A, B et C à 20 et 70 °C et pentes calculées par régression linéaire. . .	104
4.6	Valeurs des conductivités thermiques fournies par le fabricant et des diffusivités thermiques mesurées au laboratoire sur le banc LFA1000. . . . .	105
4.7	Incertitudes sur la mesure de diffusivité thermique. . . . .	106
4.8	Matrice d'expériences pour un plan complet de 3 facteurs à 3 niveaux. . . . .	108
4.9	Effets des interactions entre les facteurs A et B. . . . .	109
4.10	Matrice d'expériences représentant la transformation (a) d'un plan complet $2^3$ en (b) un plan fractionnaire avec ses alias. . . . .	110
4.11	Écart de température mesurés pour différents courants et extraits de la figure 4.13 (Nuance B, $v_l=30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et $F_N=70 \text{ N}$ ). . . . .	114
4.12	Matrice d'essais de l'étude de l'échauffement du pion. . . . .	117
4.13	Influences des facteurs et des interactions sur les températures $\bar{T}_1$ , $\bar{T}_2$ et $\bar{T}_3$ , la tension $\bar{U}$ et la puissance dissipée $\bar{P}$ , (a) pour le jeu de données complet et (b) pour les essais où $\bar{F}_N > 50 \text{ N}$ . . . . .	122
4.14	Valeurs des différents facteurs pour chaque niveau. . . . .	123
4.15	Matrice d'essais du plan fractionnaire factoriel. . . . .	123
4.16	Alias du plan d'expériences correspondant aux effets des facteurs et des interactions confondus et ne pouvant plus être distingués. . . . .	123
4.17	Premiers résultats d'usure triés par ordre croissant (les essais grisés sont des répétitions). . . . .	126
4.18	(a) Nouvelle matrice d'essais et (b) effets des facteurs et des interactions confondus. . . . .	128
4.19	Taux d'usure calculés pour chaque test, avec en <b>gras</b> les valeurs considérées comme aberrantes. . . . .	128
4.20	Résultats des différentes réponses, moyennées sur les trois séries. . . . .	129
4.21	Analyse de la variance des différentes réponses en fonction des alias [%] (valeurs de la figure 4.24). . . . .	130

---

# NOMENCLATURE

## Abréviations

CuO	Oxyde de cuivre (II)/oxyde cuivrique
Cu	Cuivre
Cu <sub>2</sub> O	Oxyde de cuivre (I)/oxyde cuivreux
C	Carbone
Thc	Thermocouple

## Banc d'essais

$f_a$	Fréquence d'actualisation réelle	Hz
$f_{a,th}$	Fréquence d'actualisation théorique	Hz
$f_e$	Fréquence d'écriture	Hz
$I_{sp}$	Consigne de courant	A
$m_{tot}$	Masse totale du disque, de la piste de roulement et de la bride	kg
$r_{ext}$	Rayon du disque limite externe de balayage	m
$r_{int}$	Rayon du disque limite interne de balayage	m
$r_p$	Rayon du disque où le pion est en appuie	m
$R_s$	Résistance du système, au borne de l'alimentation	$\Omega$
$r_{dis}$	Rayon du disque	m
$R_{c,1}, R_{c,2}, R_{c,3}$	Résistance de contact pion/disque estimée dans différentes configurations	$\Omega$
$R_{p,ar}$	Résistance de contact patin arrière/disque	$\Omega$
$R_{p,av}$	Résistance de contact patin avant/disque	$\Omega$
$R_{p,eq}$	Résistance équivalente de $R_{p,av}$ et $R_{p,ar}$ en parallèle	$\Omega$
$r_{p,sp}$	Consigne de rayon de position du pion sur le disque	mm

$R_{s,0}, R_{s,1} \dots R_{s,2}$	Résistance du système au borne de l'alimentation dans différente configuration	$\Omega$
$T_1, T_2, T_3$	Températures des thermocouples 1, 2 et 3 insérés dans le pion	$^{\circ}\text{C}$
$T_A, T_B \dots T_Y$	Températures du disque (thermocouples insérés)	$^{\circ}\text{C}$
$T_Z$	Température ambiante $T_{\text{amb}}$ mesurée <i>via</i> le module embarquée mesurant les températures du disque	$^{\circ}\text{C}$
$U_{sp}$	Consigne de tension	V
$V_C$	Tension analogique d'entrée du couplemètre	V
$V_{a_x}, V_{a_y}, V_{a_z}$	Tensions analogiques de mesure de $a_x, a_y$ et $a_z$	V
$V_{F_N}$	Tension analogique de sortie du capteur mesurant $F_N$	N
$V_{F_T}$	Tension analogique de sortie du capteur mesurant $F_T$	N
$V_{I_{sp}}$	Tension de sortie de la consigne de courant	mV
$v_{p,sp}$	Consigne de vitesse de balayage	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
$v_{rot,sp}$	Consigne de vitesse de rotation	$\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$
$V_{T_1}, V_{T_2}, V_{T_3}$	Tensions analogiques des températures $T_1, T_2$ et $T_3$	$^{\circ}\text{C}$
$V_{T_A}, V_{T_B} \dots V_{T_Z}$	Tensions analogiques des températures lues par le module embarqué sans fil	V
$V_{U_{sp}}$	Tension de sortie de la consigne de tension	mV
$V_{v_{rot}}$	Tension analogique de mesure de la vitesse de rotation	V
$EM_{\text{ nominale}}$	Étendue de mesure nominale	
$EM_{\text{ service}}$	Étendue de mesure de service	
S	Sensibilité	$\text{V}\cdot\text{V}^{-1}$
<b>Electriques</b>		
$\rho_1, \rho_2$	Résistivités de deux matériaux en contact	$\Omega\cdot\text{mm}^{-1}$
$I$	Courant	A
$R$	Résistance électrique	$\Omega$
$R_c$	Résistance de contact	$\Omega$
$R_f$	Résistance de surface	$\Omega$
$R_s$	Résistance de constriction	$\Omega$
$R_{c,s}$	Résistance de contact stationnaire	$\Omega$
$U$	Tension	V
$V_{CC}$	Tension d'alimentation	V
<b>Ferroviaire</b>		
$d_1, d_2, d_3$	Amortissements des trois étages du pantographe	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$
$F_d$	Force de contact bande/fil, train en mouvement	N
$F_s$	Force de contact bande/fil, train à l'arrêt	N

$k_1, k_2, k_3$	Raideurs des trois étages du pantographe	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
$k_c$	Raideur du fil de contact	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$
$L_p$	Longueur de piquetage	m
$m_1, m_2, m_3$	Masses des trois étages du pantographe	kg
$v_{o+}$	Vitesse de l'onde se propageant dans le fil de contact dans le sens du train	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$v_{o-}$	Vitesse de l'onde se propageant dans le fil de contact dans le sens inverse du train	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

### Générale

$\Delta m$	Masse perdue	kg
$\omega$	Vitesse angulaire	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
$\rho$	Masse volumique	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$a$	Rayon d'un contact	mm
$a_r$	Accélération radiale	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$
$d$	Distance	m
$f$	Fréquence	Hz
$l$	Longueur	m
$L_b$	Amplitude de balayage	mm
$m$	Masse	kg
$P$	Pression	Pa
$V$	Volume	$\text{m}^3$
$v_b$	Vitesse de balayage	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
$v_l$	Vitesse linéaire	$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
$v_{\text{rot}}$	Vitesse de rotation	$\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$

### Incertitudes

$u_1$	Incertitude liée à la chaîne étalon de température	$^{\circ}\text{C}$
$u_2$	Incertitude liée à l'environnement de l'étalon et des thermocouples	$^{\circ}\text{C}$
$u_3$	Incertitude liée à la chaîne d'acquisition des températures du pion	$^{\circ}\text{C}$
$u_4$	Incertitude liée à la chaîne d'acquisition des températures du disque	$^{\circ}\text{C}$
$u_5$	Incertitude liée à la mesure de volume du pion	$\text{mm}^3$
$u_6$	Incertitude liée à la mesure de diffusivité thermique	$\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
$u_{th,d}$	Incertitude de mesure des températures du disque	$^{\circ}\text{C}$
$U_{th,p}$	Incertitude élargie de $u_{th,d}$	$^{\circ}\text{C}$
$U_{th,p}$	Incertitude élargie de $u_{th,p}$	$^{\circ}\text{C}$



$u_{th,p}$	Incertitude de mesure des températures du pion	°C
$u_{x,de}$	Incertitude de la dérive entre deux raccordements	-
$u_{x,et}$	Incertitude d'étalonnage	-
$u_{x,ft}$	Incertitude du flux thermique parasite sur l'étalon	-
$u_{x,hom}$	Incertitude de l'homogénéité du milieu de comparaison	-
$u_{x,rep}$	Incertitude de reproductibilité	-
$u_{x,rep}$	Incertitude la de correction entre deux points d'étalonnage	-
$u_{x,res}$	Incertitude de résolution	-
$u_{x,st}$	Incertitude de la stabilité du milieu de comparaison	-
$u_{x,s}$	Dispersion des résultats	-

### Mécanique

$\mu$	Coefficient de frottement	$N \cdot N^{-1}$
$\mu_0$	Coefficient de frottement statique	$N \cdot N^{-1}$
$a$	Surface de contact apparente	$m^2$
$a_x, a_y, a_z$	Accélérations selon les axes $x$ , $y$ et $z$	$m \cdot s^{-2}$
$C$	Couple	$N \cdot m$
$C_a$	Couple d'accélération	$N \cdot m$
$C_{frot}$	Couple de frottement	$N \cdot m$
$F_N$	Force normale/force de contact	$N$
$F_T$	Force tangentielle	$N$
$F_{ab}$	Force abrasive	$N$
$F_{ad}$	Force adhésive	$N$
$F_s$	Force de frottement statique	$N$
$F_{T,0}$	Force tangentielle statique	$N$
$F_{T,b}$	Force tangentielle au mouvement de balayage	$N$
$I_{\Delta}$	Moment d'inertie	$kg \cdot m^2$
$Tu$	Taux d'usure	$mm^3 \cdot km^{-1}$
$V_p$	Volume perdu	$m^3$

### Statistiques et plan d'expérience

$\mu\%$	Taux de pics du coefficient de frottement $\mu$	%
$\mu_{c98}$	Centile 98 de $\mu$ sur un jeu de données	$N \cdot N^{-1}$
$\sigma$	Ecart type	-
$C_n$	$n^{\text{ème}}$ centile	-
$CV\%$	Coefficient de variation	%
$E_{f,i}$	Effet du facteur $f$ au niveau $i$	-

$E_{f1,i;f2,j;f3,k}$	Effet d'une interaction d'ordre 3	-
$E_{f1,i;f2,j}$	Effet de l'interaction entre le facteur $f1$ au niveau $i$ et le facteur $f2$ au niveau $j$	-
$EI$	Écart interquartile	-
$Q_n$	$n^{\text{ème}}$ quartile	-
$SCE_f$	Somme des carrés des écarts pour le facteur $f$	-
$SCE_r$	Somme des carrés des écarts résiduels	-
$SCE_t$	Somme des carrés des écarts totaux	-
$SCE_{f1,f2,f3}$	Somme des carrés des écarts pour une interaction d'ordre 3	-
$SCE_{f1,f2}$	Somme des carrés des écarts pour une interaction d'ordre 2	-
$T_{1,\%}$	Taux de pics de la température $T_1$	%
$T_{1,c85}$	Centile 85 de $T_1$ sur un jeu de données	°C
$U_{\%}$	Taux de pics de la tension $U$	%
$U_{c98}$	Centile 98 de $U$ sur un jeu de données	%
$y$	Réponse d'un système	-
ddl	Degré de liberté	-

### Thermique

$\alpha$	Diffusivité thermique	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\nabla T$	Gradient de température	$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$
$\Phi_{\text{bande}}$	Flux de chaleur dans la bande	W
$\Phi_{\text{fil}}$	Flux de chaleur dans le fil	W
$\varepsilon_{\text{bande}}$	Emissivité de la bande de captage	$\text{W} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\varepsilon_{\text{fil}}$	Emissivité du fil de contact	$\text{W} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$C_p$	Capacité calorifique	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$h$	Coefficient d'échange convectif	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$P_J$	Perte par effet Joule	W
$Pe_s$	Nombre de Peclet solide	-
$Q_c$	Source de chaleur au contact	J
$Q_f$	Chaleur dissipée par frottement	J
$Q_h$	Puissance échangée par convection	W
$Q_J$	Chaleur dissipée par effet Joule	J
$Q_k$	Flux transféré	W
$Q_s$	Puissance thermique stockée	W
$Q_{\text{arc}}$	Chaleur dissipée par arcs électriques	J
$Q_{\text{bande}}$	Part de $Q_c$ se dissipant dans la bande	J

$Q_{\text{fil}}$	Part de $Q_c$ se dissipant dans le fil de contact	J
$S_h$	Surface d'échange	$\text{m}^2$
$T$	Température	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\infty}$	Température du fluide	$^{\circ}\text{C}$
$k$	Conductivité thermique	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

LE système caténaire pantographe est un système largement employé pour alimenter en électricité les transports non-autonomes par voie aérienne. C'est donc un élément clé dans le fonctionnement des trains, des tramways ou de certains métros. La caténaire, d'une part, est composée du fil de contact en cuivre et des éléments permettant son maintien et sa mise en tension. C'est une infrastructure dont l'installation et l'entretien sont lourds et coûteux. Le pantographe, d'autre part, est constitué d'un bras articulé mettant en pression une bande de captage contre le fil de contact qui permet de capter le courant nécessaire. Le système caténaire-pantographe est sujet à de nombreuses problématiques, aussi bien au niveau de la structure de la caténaire et du pantographe qu'au contact entre ces deux entités, c'est-à-dire le contact entre la bande de captage et le fil de contact. C'est sur cette dernière problématique que porte ces travaux de thèse.

Les problématiques liées au contact bande-fil ont évolué ces dernières années, notamment avec le changement de matériau dont sont composées les bandes de captage. En effet, le matériau était dans un premier temps en cuivre, en cuivre-acier ou en alliage de cuivre. Avec ces matériaux, encore largement utilisés dans le parc ferroviaire français aujourd'hui, le fil de contact en cuivre s'use tout autant que les bandes lorsque le contact est non-lubrifié. Aussi, même si cette usure peut être réduite grâce à une lubrification périodique du fil de contact, la maintenance de la caténaire reste contraignante et onéreuse. Les nouvelles bandes installées depuis plusieurs années sont fabriquées en graphite, qui est un matériau conducteur aux propriétés auto-lubrifiantes et ayant une dureté inférieure à celle du cuivre. La bande de captage devient donc une pièce d'usure à part entière tout en lubrifiant le contact, ce qui minimise l'usure du fil de contact. Le graphite a cependant l'inconvénient d'être un conducteur électrique et thermique moins bon que le cuivre, ce qui accentue l'échauffement par effet Joule, qui est d'une part surfacique au contact bande-fil, et d'autre part volumique, c'est-à-dire interne à la bande de captage. Cet échauffement accélère l'usure de la bande et peut mener à des casses, par exemple par décollement de la bande de son support. Enfin, lorsqu'il y a des instabilités au niveau du contact (vibration du fil, contact instable), la qualité de captage diminue et des arcs électriques apparaissent, accélérant ainsi rapidement l'usure du fil de contact et de la bande de captage. Ces problématiques s'appliquent aussi aux contacts des balais tournants, système d'alimentation utilisé couramment dans les machines électriques.

La premier chapitre de cette thèse introduit plus précisément la liaison caténaire pantographe et la physique de ce contact électrique glissant. Ce sujet est complexe puisqu'il est gouverné par cinq disciplines, à savoir la mécanique, la composition des matériaux, la tribologie, la thermique et l'électrotechnique. Ce chapitre décrit ensuite les travaux antérieurs menés au sein du laboratoire lors de deux thèses CIFRE successives qui ont permis de développer deux modèles. Ces deux travaux de recherche ont été menés avec la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF) et l'Institut FEMTO-ST. Dans la première thèse, T. Bausseron a développé l'outil de modélisation CACATOES (CATénaire en Captage à l'Arrêt par un outil ThermOélectriques de Simulation) qui permet d'obtenir des courbes de température de la bande et du fil, train à l'arrêt [21]. Dans la seconde thèse, N. Delcey a conçu l'outil de modélisation MONICA (MOdélisation Numérique de l'Interface CATénaire) pour déterminer la température de la bande de captage, train en

mouvement [16]. Pour valider son modèle, N. Delcey a mené des essais expérimentaux à l'Université Polytechnique de Milan (POLIMI) sur un banc d'essai, représentant une liaison caténaire pantographe à l'échelle 1 [7]. Au cours de son post-doctorat, Il a ensuite débuté la réalisation du banc dont fait l'objet cette thèse. Cette dernière est donc une continuité des travaux de T. Bausseron et N. Delcey, en se basant sur une démarche expérimentale. Pour cette raison, la suite de ce chapitre se compose d'un état de l'art des bancs d'essais étudiant les contacts bande-fil ainsi que les contacts des balais tournants. Il se termine enfin par une synthèse des résultats expérimentaux et de leur analyse.

Dans le chapitre suivant, le banc d'essais est décrit dans son état final, c'est-à-dire tel qu'il est employé à la toute fin de ces travaux. Le banc a été entièrement conçu et développé au sein du laboratoire, et se compose principalement d'un large disque en cuivre rotatif sur lequel un pion est mis en pression. Le disque, composé de cuivre, représente le fil de contact de la caténaire tandis que le pion est un échantillon de bande de captage. Plusieurs aspects de la liaison caténaire pantographe y sont ainsi représentés :

1. Le mouvement longitudinal du train en mouvement.
2. Le mouvement transversal du fil de contact qui balaie la bande de captage.
3. Le courant circulant dans le fil de contact puis dans la bande.
4. La raideur du pantographe permettant à la bande de captage de rester en contact sur le fil.
5. La force de contact de la bande sur le fil.
6. Les matériaux composant le fil et la bande.
7. La surface de contact bande-fil.

Le banc se compose d'un ensemble d'actionneurs et d'une instrumentation qui sont pilotés grâce à un contrôleur temps réel. La totalité des capteurs utilisés a été caractérisée au sein du laboratoire, et deux systèmes embarqués de mesures de température ont été conçus et développés. L'un permet de mesurer la température du disque grâce à un module embarqué autonome et sans fil tandis que l'autre permet de mesurer la température interne du pion au moyen d'un module filaire isolé.

Le troisième chapitre aborde la méthode et les développements expérimentaux. En effet, de nombreuses évolutions structurelles ont été apportées au banc afin de permettre la réalisation d'essais de longues durées (4 h ou une distance de plus de 100 km) sur une machine robuste et fiable. Ainsi, la surface du disque en cuivre a fait l'objet de multiples réflexions : d'une part l'état de surface du cuivre initiale doit être identique en début de chaque essai et d'autre part les conditions expérimentales doivent être réalistes par rapport au contact fil-bande. Enfin, une méthode de mesure de la perte de volume a été développée, notamment grâce à la mise en place d'un partenariat avec l'équipe de tribologie du département de mécanique appliquée de l'Institut FEMTO-ST.

Le dernier chapitre traite des résultats expérimentaux. Dans un premier temps, les objectifs d'essais sont introduits, puis, toutes les données relatives aux nuances étudiées sont synthétisées. Cette synthèse s'appuie d'une part sur les données expérimentales de N. Delcey et d'autre part, sur les données d'essais en ligne réalisés par la SNCF. Les données des nuances sont complétées, grâce au banc *Laser Flash* disponible au laboratoire, avec une étude de leurs diffusivités thermiques selon les trois axes  $x$ ,  $y$  et  $z$ . Le graphite étant un matériau anisotropique, ses propriétés physiques diffèrent suivant l'axe choisi. De plus, puisque les trois nuances de graphite sont imprégnées en métal, cette étude doit estimer l'hétérogénéité des nuances.

Dans un deuxième temps, la température du pion à différentes hauteurs par rapport au point de contact est étudiée afin d'évaluer son comportement thermique. Le pion est positionnée dans un bloc dont la géométrie est complexe : il est pincé dans des plaques de cuivre sur lesquelles des cosses sont vissées, permettant ainsi de capter le courant provenant du disque. Ces plaques de cuivre sont elles-mêmes serrées dans deux pièces isolantes de Polytétrafluoroéthylène.

Enfin, deux plans d'expériences sont réalisés en utilisant la méthode de Taguchi. Le premier, constitué d'un plan complet avec trois facteurs à trois niveaux, porte sur les causes de l'échauffement du pion. Le deuxième, basé sur un plan fractionnaire de six facteurs à deux niveaux, se concentre sur les sources de l'usure du pion.

Une conclusion et des perspectives terminent ce mémoire de thèse de doctorat.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

---

### 1.1 Introduction

---

#### 1.1.1 Contexte

AU XX<sup>ème</sup> siècle, le troisième rail et la Liaison Pantographe Caténaire (LPC) sont les deux principaux moyens d'alimentation des transports ferroviaires. La LPC s'est imposée dans le monde à partir de 1945, premièrement pour des raisons de sécurité et deuxièmement car elle permet de circuler à des vitesses importantes, comme sur une Ligne à Grande Vitesse (LGV).

**En France**, le réseau ferré national compte 27500 km de lignes exploitées, dont 58 % sont électrifiées [1]. Tandis que sa longueur diminue légèrement chaque année, l'électrification du réseau, elle, ne cesse de croître (voir figure 1.1). De plus, en 2019, 618 TEP (Tonnes Équivalents Pétroles) ont été consommées par énergie électrique contre 126 TEP en diesel, ce qui sous-entend que les voies électrifiées sont largement plus utilisées que les autres. La figure 1.2 synthétise la part d'électrification des différents réseaux présents en France. On peut y voir notamment que ce sont les trains express régionaux et surtout les trains intercity qui circulent encore au diesel ou en alternatif diesel/électrique (bi-mode). **Dans le monde**, plus de 200000 km de lignes ferroviaires sont électrifiées, ce qui représente un peu plus de 17 % du réseau ferroviaire global mondial [22].

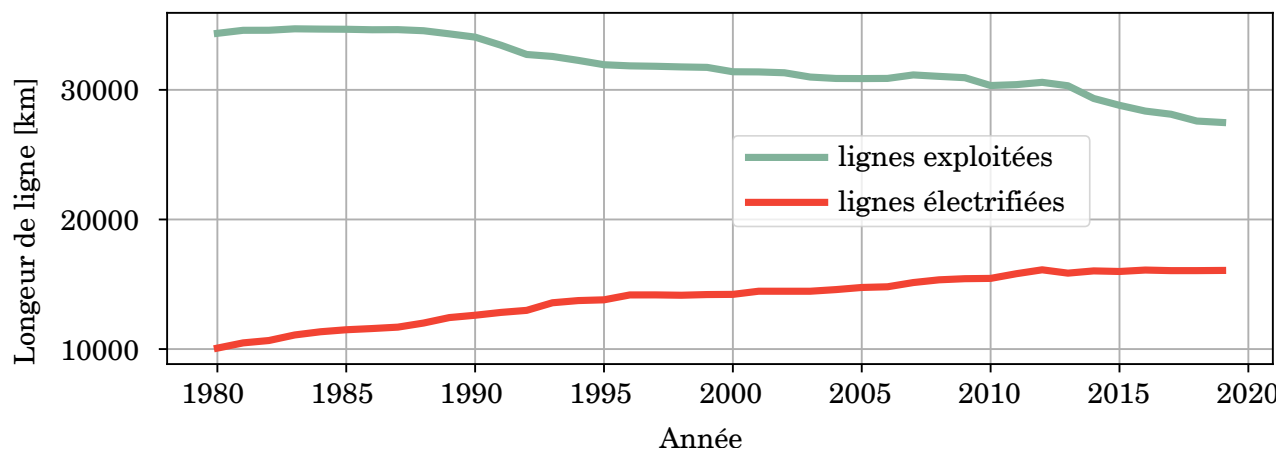


FIGURE 1.1 – Évolution du réseau ferré national français : toutes voies confondues et voies électrifiées [1].

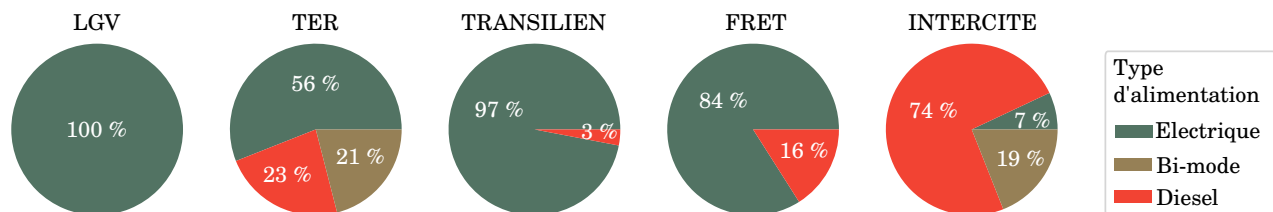


FIGURE 1.2 – Proportion des trains électrifiés, thermiques ou en bi-mode par type de réseau [1].



FIGURE 1.3 – Camions à pantographe sur une voie d'autoroute équipée d'une caténaire. Photo extraite d'une communication de Siemens [2].

**Extension au réseau routier :** la société Siemens propose d'électrifier l'une des voies des autoroutes par l'installation de caténaires. Ainsi, les camions équipés de pantographe pourraient s'alimenter par voie aérienne et recharger leur batterie [2] (voir figure 1.3). Depuis 2021, une voie équipée sur l'autoroute A5, près de Francfort, en Allemagne, permet d'expérimenter ce système durant 3 ans [23].

### 1.1.2 Les liaisons électriques

Il convient avant d'aller plus loin d'introduire les contacts électriques, ceux-ci pouvant être divisés en trois groupes :

- *Les connectiques* - Elles conduisent seulement lorsqu'elles sont connectées. Une connectique est retirée après que l'alimentation soit coupée (Exemple : prise de courant).
- *Les contacts de commutation* - Ils permettent l'ouverture et la fermeture d'un circuit électrique à partir d'une commande. L'exigence dans le transfert de courant pendant un mouvement est faible, mais des problématiques d'arcs électriques sont connues (exemple : interrupteurs, relais, disjoncteur).
- *Les contacts électriques glissants (CEG)* - Ils alimentent un appareil à l'arrêt comme en mouvement. Une exigence de stabilité et de résistance particulièrement élevée est attendue lorsque le contact est en mouvement (exemple, balais tournants ou **liaison pantographe caténaire (LPC)**).

#### Description d'un balai tournant

Un balai tournant (figure 1.4 (a)) permet de faire circuler un courant ou un signal entre une partie dynamique (balais) et une partie statique (collecteur tournant). Il est utilisé dans les génératrices à courant alternatif (éoliennes, alternateurs), les systèmes de mesures pivotants (balise d'aéroport) ou pour alimenter un système rotatif (perceuse, pelle mécanique). Son champ d'application est large tout comme leurs dimensions et leurs contraintes.

#### Description d'une liaison pantographe caténaire

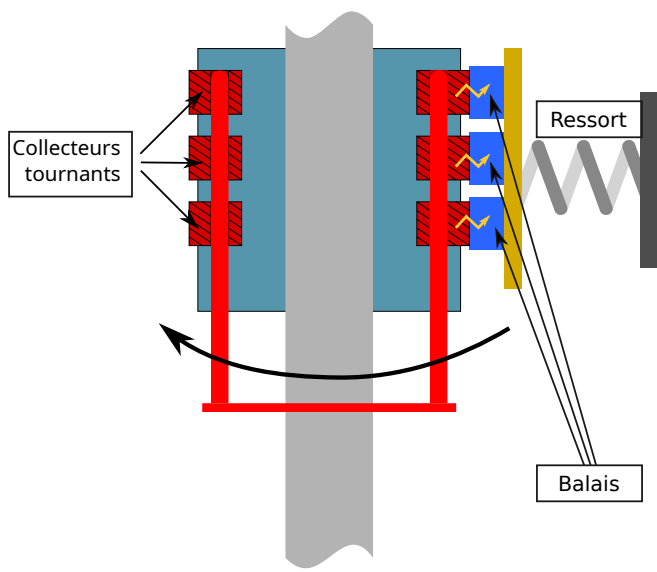


Figure 1.4(a) – Schéma d'un balai tournant.

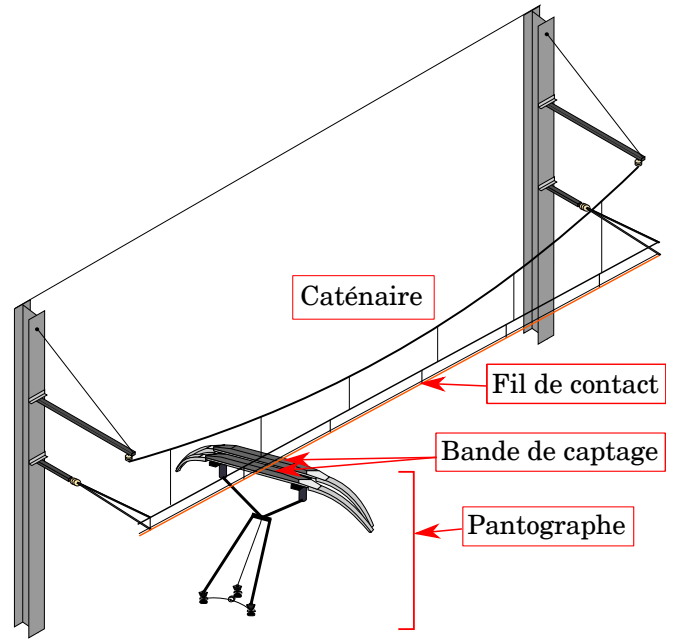


Figure 1.4(b) – Schéma de la liaison caténaire-pantographe[7].

Une liaison pantographe caténaire (figure 1.4 (b)) fait le lien entre le réseau électrique et un véhicule électrique avec peu ou pas d'autonomie, ayant besoin d'être alimenté en déplacement. Il permet ainsi son alimentation et son fonctionnement par voie aérienne. D'un côté, **la caténaire** maintient, tend et isole le **fil de contact** sous tension (qui fait lui-même partie de la caténaire). De l'autre, **le pantographe** est un dispositif articulé qui soutient et met en appui une ou deux **bandes de captage** contre le fil de contact. Comme leur nom l'indique, celles-ci ont pour fonction de capter le courant dont le moyen de locomotion a besoin.



### 1.1.3 La caténaire

Comme décrit précédemment, la caténaire représente l'ensemble des câbles porteurs plus les fils de contact qui y sont suspendus. Différentes caractéristiques la composent :

#### Le fil de contact

C'est un fil plein et nu, le plus souvent en cuivre, qui a une section de 107 à 150 mm<sup>2</sup>. On peut le trouver par paire pour augmenter la surface de contact avec la bande de captage.

#### Sous-station

Les fils de contact sont alimentés par des sous-stations de traction. Celles-ci font alors le lien entre le réseau électrique et le fil de contact. Elles sont réparties sur les lignes pour limiter les chutes de tension provoquées par l'impédance des fils de contact. De plus, elles permettent de modifier la tension ou le type de courant (continu ou alternatif). Dans ce dernier cas, une sous-station peut aussi faire office de pont entre deux réseaux à fréquences désynchronisées (Exemple dans les lignes franco-allemandes entre les tensions 50 Hz et 16 Hz 2/3) [24].

#### Courant alternatif(CA) - Courant continu(CC)

Du fait de la maîtrise des moteurs à courant continu, les trains et caténaires ont été construits pour fonctionner en courant continu, sur un réseau de 1,5 kV. Les premières portions fonctionnant en courant alternatif sont apparues dans les années 1980 puis se sont généralisées. En effet, l'alternatif permet de diminuer la section du fil et d'augmenter la distance entre les sous-stations. Il permet aussi de diminuer l'effet Joule, notion abordée dans la section 1.2.5.

#### Mouvement de zigzag

Comme la figure 1.5 le décrit, une caténaire est désaxée : vue de dessus elle ne forme pas une ligne droite mais un zigzag. Cela permet en particulier d'homogénéiser l'usure et l'échauffement en faisant balayer le fil de contact sur la bande de captage. Cependant, il a été observé que l'usure totale augmentait avec l'amplitude de balayage [25]. En France cette amplitude s'élève généralement à 400 mm mais peut diminuer dans les virages et les tunnels.

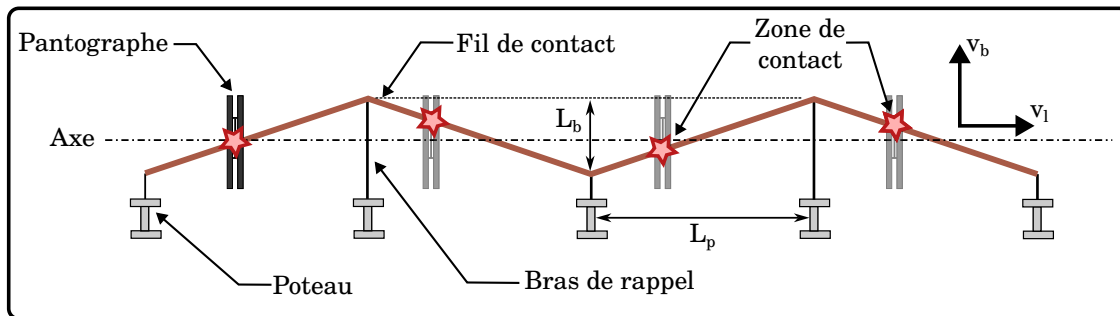


FIGURE 1.5 – Schéma d'une caténaire vue de dessus : mise en lumière de son désaxement.

Le vitesse de balayage  $v_b$  [m·s<sup>-1</sup>], à laquelle le fil de contact se déplace latéralement sur une bande de captage, dépend de la vitesse linéaire du train  $v_l$  [km·h<sup>-1</sup>], de l'amplitude de balayage  $L_b$  [mm] et de la longueur de piquetage  $L_p$  [m] (longueur entre deux changements de sens). Elle est ainsi donnée par la formule suivante :

$$v_b = v_l \cdot \frac{L_b}{L_p} \quad (1.1)$$

Cette vitesse dépend de la conception de la caténaire. En France, sous 25 kVac, le désaxement atteint 200 mm par rapport à l'axe de la voie et le balayage se fait à chaque portée. Sous 1,5 kVcc, le désaxement est au maximum de 220 mm par rapport à l'axe de la voie et le balayage se fait sur 2 ou 8 portées. Par conséquent la vitesse de balayage y est plus lente.

## Géométrie de la caténaire

La structure de la caténaire joue un rôle sur les vibrations et la fluctuation de la force de contact entre le pantographe et le fil de contact [26, 27]. D'autre part, le fil de contact, supporté par les poteaux et un ensemble de câbles porteurs, a sa propre raideur. Cette raideur oscille, ayant une valeur plus importante au niveau d'un poteau et moins importante au milieu d'une portée (distance entre deux poteaux). Lorsque celle-ci est de 40,5 m, la raideur oscille entre 2,15 et 2,75  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$  tandis qu'à 63 m de portée, la raideur oscille entre 1,55 et 2,25  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$  [28].

### 1.1.4 Le pantographe

Le pantographe est constitué d'un ou plusieurs bras articulés qui maintiennent le contact de la bande de captage et du fil de contact, permettant ainsi de capter le courant. Le schéma de principe et le modèle mécanique associé sont représentés sur la figure 1.6. Il existe des bras articulés en forme de losange mais la plupart présente plutôt une configuration en "Z" qui rend le captage de courant plus stable et efficace grâce notamment à l'allègement de la structure. La structure [29] et l'espacement des bandes de captage [30] du pantographe ont une incidence directe sur le contact de la LPC.

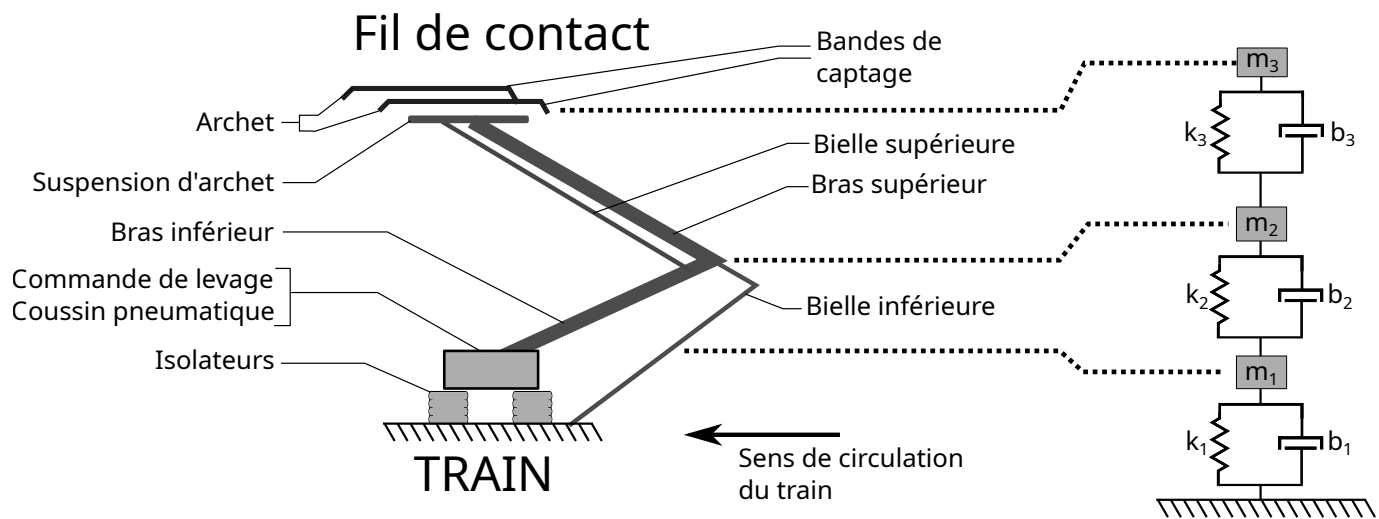


FIGURE 1.6 – Schéma d'un pantographe en "Z" et son modèle masse/ressort/amortisseur à trois étages [3].

### La raideur

Comme le présente la figure 1.6, le pantographe se schématise la plupart du temps comme un modèle masse/ressort/amortisseur à trois étages. L'archet et les bandes de captage, de masse  $m_3$ , sont soutenus par des pistons de raideur  $k_3$  et de coefficient d'amortissement  $d_3$ . La masse  $m_2$  correspond à celle du cadre supérieur, tandis que  $k_2$  et  $d_2$  représentent la raideur et l'amortissement de la flexion du cadre. Enfin, les coussins pneumatiques de raideur  $k_1$  et d'amortissement  $d_1$  supportent le cadre inférieur de masse  $m_1$  [3]. Certaines valeurs, tirées des thèses de J.P Massat [31] et Belkhir.C [32] sont affichées dans le tableau 1.1.

Type Pantographe	$k_1$ ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$d_1$ ( $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$k_2$ ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$d_2$ ( $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$k_3$ ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$d_3$ ( $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ )
CX 25 kV	1	32	5400	5	6045	10
GPU 25 kV	1	140 (descente) 5 (montée)	1200	60	9000	-

TABLEAU 1.1 – Valeur de différentes raideurs et amortissements pour deux types de pantographes.

## Les nuances des bandes

Elles étaient constituées dans un premier temps de métal (cuivre) ou d'alliage (cuivre/acier), ce qui permettait d'avoir un bon contact électrique cuivre/cuivre. Cependant, une lubrification sans laquelle le fil de contact s'usait rapidement est nécessaire. Par conséquent la maintenance de la caténaire est plus onéreuse.

Les nuances en graphite sont ensuite arrivées. Ce matériau a le double avantage d'avoir des propriétés auto-lubrifiantes et d'être moins dur que le cuivre. Il devient alors la pièce d'usure du système et permet de préserver le fil de contact. En revanche le graphite a une conductivité électrique et thermique moins bonne que le cuivre, ce qui provoque un échauffement local au point de contact par effet Joule. Pour remédier à cette problématique les bandes de captage les plus récentes sont en graphite imprégné en cuivre.

Les blocs de bandes de captage sont fabriqués par frittage (chauffe d'un matériaux à la limite de sa fusion) en étant mis sous pression, puis par extrusion. Ensuite, l'imprégnation du cuivre peut être réalisée de différente manière. L'une d'entre elles consiste par exemple à combler les porosités du carbone avec du cuivre après son frittage.

## Géométrie du pantographe

La forme du pantographe est conçue pour avoir un comportement optimal vis-à-vis des vibrations et de la force de contact exercée sur la caténaire (voir figure 1.7). Cette force est appliquée par le pantographe et est soumise en France à la norme SAM E 903 et à la norme NF EN 50367 pour le réseau européen. Ainsi, **la force de contact statique**  $F_s$  [N] appliquée doit être comprise entre 60 et 90 N pour le courant alternatif et entre 70 et 140 N pour le courant continu. En roulage, **la force normale**  $F_N$  [N] appliquée entre une bande de captage et le fil de contact est égale à la somme de  $F_s$  et d'une **force dynamique**  $F_d$  [N]. Celle-ci représente la composante aérodynamique du pantographe, amplifiée par des ailerons mis en place sous l'archet. Ces ailerons sont dimensionnés, par exemple grâce à leur forme ou leur orientation, afin d'améliorer le contact sur une plage de vitesse donnée. Par ailleurs, sur certain pantographe la force de contact est asservi à leur position et à la vitesse du train.

$F_d$  est donc le produit de la vitesse  $v$  [km·h<sup>-1</sup>] au carré et d'une constante. Dans la norme NF EN 50367, cette constante dépend du système d'alimentation (courant continu ou alternatif) ainsi que de la vitesse de fonctionnement du train[33]. La forme de la bande de captage a ainsi un impact important sur le comportement du contact [34, 35].

Par exemple, pour un train roulant à moins de 200 km·h<sup>-1</sup> sur une ligne alimentée en courant continu (1.5 kV), la force normale moyenne doit être dans la plage suivante :

$$0,00112 \cdot v_l^2 + 70 < F_N < 0,00097 \cdot v_l^2 + 140 \quad (1.2)$$

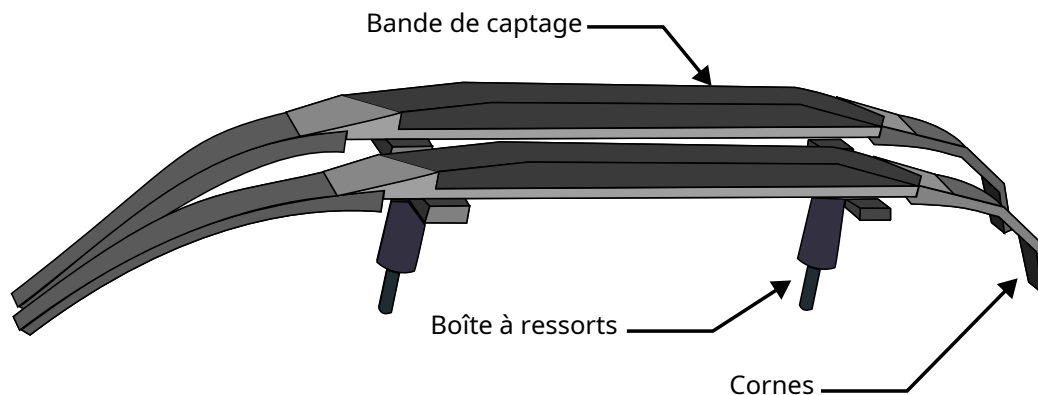


FIGURE 1.7 – Schéma des bandes de captage montées sur leur archet.

## 1.1.5 Problématiques rencontrées

De nombreuses problématiques sont encore observées sur les liaisons pantographe caténaire :

### Sur le fil de contact

Malgré le remplacement du cuivre par du graphite comme nuance de bande de captage, le fil de contact s'use toujours. Comme on peut le voir sur la figure 1.8, deux types d'usure sont observés : une usure mécanique que l'on peut observer par du marque de labourage et une usure électrique qui est marquée par une oxydation en surface (changement de couleur) et des cratères [4].

Le fil de contact peut également se rompre à l'arrêt par fluage à cause d'un échauffement localisé. Ce phénomène a notamment été mis en évidence par T.Bausseron lors d'une précédente thèse [21].

De plus, la caténaire est segmentée en tronçons appelés cantons de pose dont la longueur atteint 1400 m. Par forte chaleur, le fil de contact peut donc se dilater de manière importante. Ainsi, des contrepoids, appelés tirs caténaire, sont placés aux extrémités des cantons de pose et maintiennent la tension de la caténaire. Mais lorsque le fil de contact est trop dilaté, les contrepoids peuvent arrivés en butée, ne remplissant plus leur rôle. Le fil de contact se détend alors et le risque qu'il soit arraché lors du passage d'un train ou qu'un amorçage électrique se produisent entre la caténaire et la toiture du train augmente considérablement.

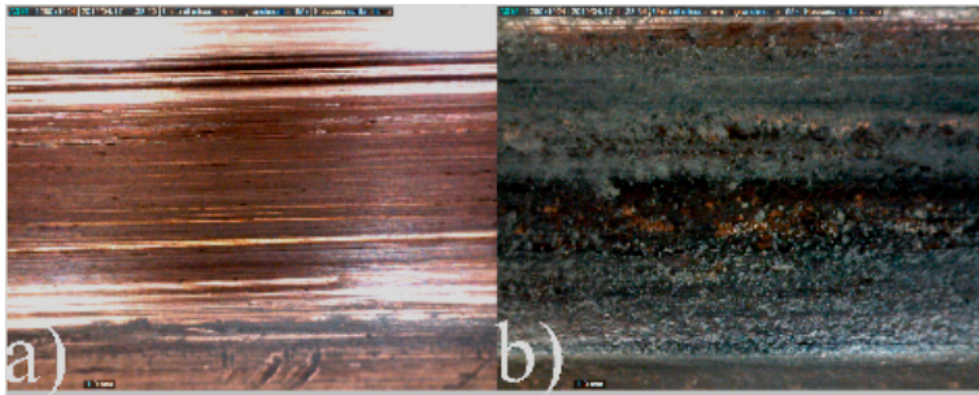


FIGURE 1.8 – Fil de contact en cuivre-argent après test d'usure : (a) section où l'usure mécanique est prédominante et (b) section où une usure due au courant et aux arcs est observée (photo issues de Derosa.S et al [4]).

## Sur la bande de captage

La bande de captage peut s'échauffer, accélérant son usure et pouvant mener à des fissures ou un décollement de son support. En pratique, cela peut arriver lorsqu'il y a un fort appel de courant maintenu dans le temps, par exemple avec un TER circulant sur une ligne en rampe dans un territoire vallonné.

Des perturbations, telles que des rafales de vent [36] peuvent également déstabiliser le pantographe et le fil de contact, générant ainsi des arcs électriques tout en diminuant la qualité de contact.

Enfin, la SNCF est dans un processus constant d'amélioration de la fiabilité de ses bandes de captage afin de réduire la maintenance et les accidents liés à la LPC. L'entreprise manque toutefois de données consistantes permettant d'anticiper l'usure et l'échauffement des bandes de captage en fonction de leur nuance. Elle s'appuie donc sur des essais en ligne coûteux et longs ou sur les données et caractéristiques techniques partagées par les constructeurs. Ces dernières sont cependant souvent confidentielles. C'est pourquoi, l'un des enjeux de cette thèse est de permettre à la SNCF d'anticiper le comportement d'une bande de captage avant même qu'elle ne soit installée sur un train. Pour cela, des essais expérimentaux rapides, et s'appuyant sur un protocole fiable, seront réalisés à différentes valeurs de vitesse, courants, forces ou raideurs de contact. Des mesures d'usure et d'échauffement permettront ainsi de mieux décrire les matériaux.

## 1.2 Physique du contact

Les Contacts Électriques Glissants (CEG) s'inscrivent dans un domaine multi-physique impliquant de nombreuses disciplines. C'est pourquoi les sections qui suivent tentent de décomposer les différents domaines intervenant dans une CEG.

### 1.2.1 Aspect mécanique

La figure 1.9 schématise le modèle mécanique du pantographe en contact avec le fil de contact. Celui-ci a une raideur  $k_c$  ayant une déflexion dans sa hauteur d'une amplitude de 2 à 3 cm. Pour l'encaisser, le pantographe est muni de **trois étages de ressorts et d'amortisseurs** permettant de garder le contact entre le fil et les bandes de captage. De plus, comme il a été décrit précédemment, l'aérodynamisme du pantographe permet aussi de stabiliser le contact lorsque le train est en marche en augmentant la force de contact.

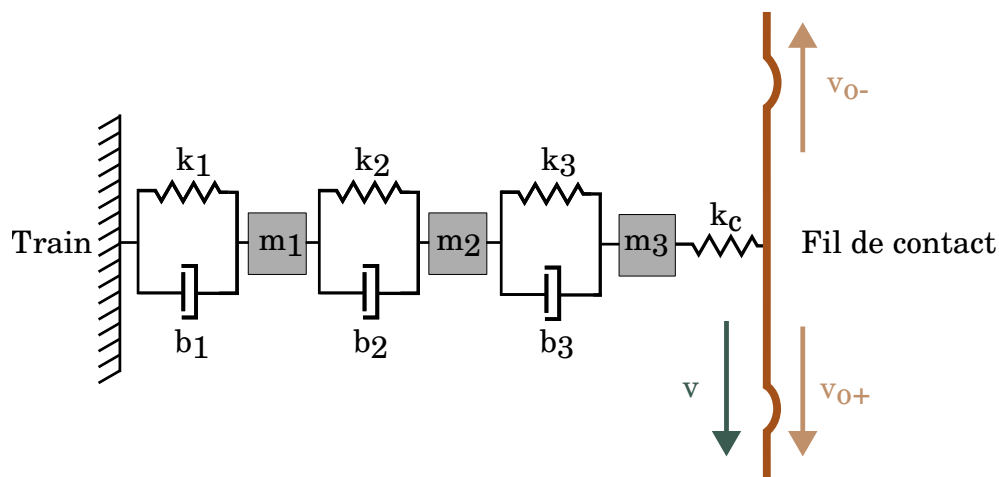


FIGURE 1.9 – Modèle mécanique du pantographe et du fil de contact.

Enfin, le frottement des bandes de captage génère des **vibrations le long du fil de contact**. La vibration allant dans le sens inverse du train à la vitesse  $v_{0-}$  perturbe le contact sur les bandes de captage situées en amont. La vitesse  $v_{0+}$  de l'onde allant dans le même sens que le train limite sa vitesse : au même titre que la vitesse du son, cette vitesse se nomme le mur de la caténaire. A cette vitesse, la bande de captage suit l'onde provoquant une instabilité au niveau du CEG. C'est pourquoi lors du record de vitesse du TGV de 2007, le fil de contact a été sur-tendu pour augmenter la vitesse de propagation des ondes vibratoires et ainsi repousser le mur de la caténaire.

## 1.2.2 Nature de la bande de captage

Les bandes de captage actuelles étant généralement en graphite, il est important de décrire ce matériau. Le graphite est une forme cristalline du carbone et se compose d'un empilement de feuillets, matériau bidimensionnel cristallin, appelé graphène. La figure 1.10 montre le schéma de la structure d'un de ses feuillets. Dans ces feuillets, les atomes de carbone sont en forme d'hexagone. On rappelle ici que la configuration électronique du carbone est  $1s^2 2s^2 2p^2$  ce qui lui permet de former 4 liaisons covalentes avec les électrons  $2s$ ,  $2p_x$ ,  $2p_y$  et  $2p_z$ . Les électrons  $2s$ ,  $2p_x$  et  $2p_y$  sont ainsi fortement liés par trois liaisons covalentes hybrides  $sp^2$  de type  $\sigma$  formant des angles de  $120^\circ$  sur une structure plane [37]. Le dernier électron  $2p_z$  forme une liaison non hybridée covalente de type  $\pi$ , qui est une liaison conjuguée se faisant avec l'un des 3 voisins. Cette liaison peut donc se déplacer et se délocaliser, offrant la possibilité aux électrons d'être mobiles et donnant au graphène ses excellentes propriétés de conduction thermique et électrique [38].

Les feuillets, quant à eux, sont faiblement liés par des liaisons de type Van der Waals. Cela donne au graphite une aptitude au clivage : les feuillets peuvent facilement glisser les uns par rapport aux autres pour ainsi former des surfaces planes. Le graphite s'utilise alors sous forme de carbone désordonné très fin qui se répand sur la piste d'usure. Ainsi, en formant un tribofilm (ou troisième corps), le graphite permet de réduire l'usure et le coefficient de frottement, ce qui lui confère des propriétés d'auto-lubrification [39].

Avec cette structure, le graphite a des propriétés hautement anisotropiques. Par exemple, il a une bonne conductivité thermique et électrique intra-feuillets, ce qui n'est pas le cas inter-feuillets. Pour augmenter la conductivité électrique globale, les bandes de captage sont souvent imprégnées en cuivre.

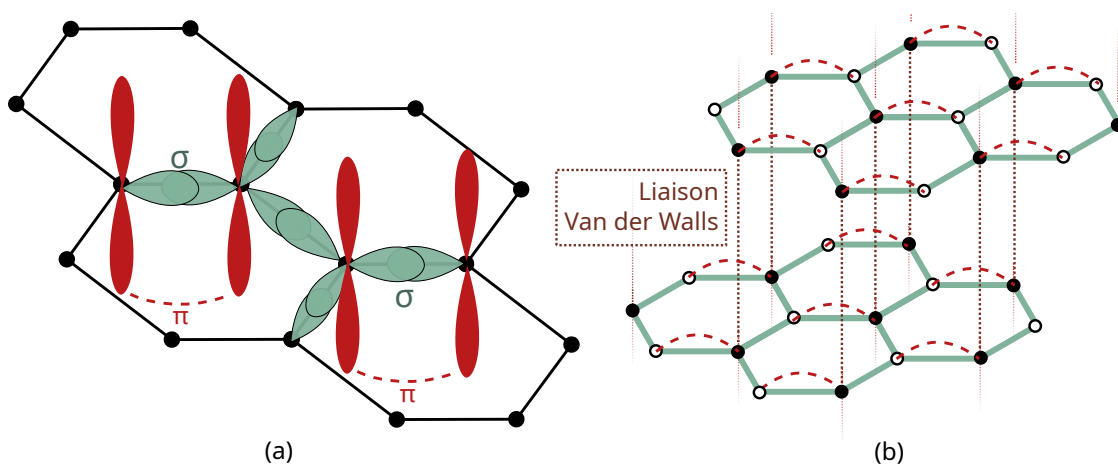


FIGURE 1.10 – Structure du graphite : (a) schéma d'une couche de graphène et de ses liaisons covalentes  $\pi$  et  $\sigma$ , (b) schéma de couches de graphène liées par liaisons Van der Waals, formant le graphite.

## 1.2.3 Aspect tribologique : frottement et contact

La tribologie est la science qui étudie le contact entre les matériaux, à l'arrêt comme en mouvement. Comme on le verra, le contact d'une liaison caténaire pantographe est tributaire des propriétés de surface des matériaux.

### Le frottement

Il existe plusieurs types de frottement. Le graphite étant un lubrifiant sec, les contacts cuivre-graphite font partie de la catégorie des **frottements secs**. Comme présenté ci-dessous, ces frottements se distinguent sous deux états décrits par la loi de Coulomb.

**Frottement sec statique :** Ce type de frottement concerne deux objets considérés immobiles l'un par rapport à l'autre. Lorsqu'une force tangentielle  $F_{T,st}$  [N] est appliquée à l'un des objets pour le mettre en mouvement, une force de frottement statique  $F_s$  [N] opposée maintient l'objet immobile : il y a alors adhérence. Ce n'est que lorsque la force  $F_{T,0}$  atteint une valeur critique que l'objet se met à glisser. Mathématiquement, la force de frottement statique maximale est égale au coefficient de frottement statique  $\mu_0$  [ $N \cdot N^{-1}$ ] multiplié par la force de contact entre les deux

objets  $F_N$  [N]. L'objet reste donc immobile tant que la relation suivante est respectée :

$$F_{T,st} \leq \mu_0 \cdot F_N \quad (1.3)$$

$F_{T,st}$  dépend donc seulement de  $\mu_0$ . Ce coefficient de frottement statique quant à lui est relatif aux propriétés des matériaux et à leur état de surface.

**Frottement sec dynamique :** Lorsqu'un objet glisse sur la surface d'un autre objet, une force de frottement dynamique égale à  $F_T$  [N] opposée à la direction de la vitesse de glissement apparaît. Tout comme la force de frottement statique, la force de frottement dynamique ne dépend que de la force de contact  $F_N$  et du coefficient de frottement dynamique  $\mu$  [ $N \cdot N^{-1}$ ] :

$$F_T = \mu \cdot F_N \quad (1.4)$$

Bowden et Talor [40] et Suh [41] suggèrent que  $F_N$  soit la combinaison des forces provoquées par les usures par abrasion et par adhésion :

$$F_T = F_{ab} + F_{ad} \quad (1.5)$$

où  $F_{ab}$  est la force abrasive [N] et  $F_{ad}$  est la force adhésive [N]. Comme le coefficient de frottement statique, le coefficient de frottement dynamique dépend des deux matériaux et de leur état de surface. En général dans un frottement sec,  $\mu_0$  est supérieur à  $\mu$ ;  $\mu$  étant souvent compris entre 0,3 et 0,6.

**Limite de la Loi de Coulomb :** Cette loi est empirique, sa force résidant dans la simplicité de description d'un phénomène très complexe. Par exemple, dans notre cas d'étude, elle ne tient pas compte du tribofilm entre les deux surfaces, ni de la "lubrification" que peut occasionner le courant, notion qui sera développée plus tard.

**Cas particulier, le collé glissé :** Lorsque le glissement d'un objet sur un autre est saccadé, un phénomène nommé collé glissé apparaît. Dans ce cas, l'objet glisse très rapidement lorsque la force tangentielle  $F_{T,st}$  [N] est atteinte puis s'arrête peu de temps après, puis glisse à nouveau quand  $F_{T,st}$  est atteinte, etc. Ce phénomène peut arriver dans diverses conditions, comme dans notre cas d'étude par exemple lorsque [42] :

1. La température de contact est suffisamment importante pour atteindre le point de fusion d'un des deux matériaux.
2. La contrainte de cisaillement élevée engendre une augmentation de la température. Dans ce cas un des matériaux peut subir un *thermal softening*.

### La surface de contact

La surface de contact est un paramètre difficile à estimer et est directement liée à la qualité du contact. La figure 1.11 décrit la différence entre l'aire de contact réelle et l'aire de contact apparente. Dans une LPC cette dernière a été mesurée à l'arrêt par T.Bausseron [21] et s'étend sur une surface de 2 cm par 0.5 cm, soit 1 cm<sup>2</sup>.

Au niveau macroscopique, on peut observer des aspérités en contact les unes avec les autres qui forment une aire appelée aire de contact réelle. Celle-ci représente une faible proportion de l'aire de contact apparente. Une partie de cette surface est portante mais non conductrice. Une plus petite proportion de cette aire forme des points de contacts à résistances électriques élevées. L'aire de contact réelle dépend de plusieurs facteurs. Premièrement, chaque matériau a des propriétés d'élasticité (module de Young) et de déformation (coefficient de Poisson) différentes. Ensuite, la force de contact appliquée, combinée à ces propriétés, va contraindre les matériaux et augmenter le nombre et la surface des aspérités. Le tableau 1.2 permet de comprendre cette relation en donnant le rapport de la surface de contact réelle sur la surface de contact apparente pour différentes forces de contact et pour deux métaux. Par exemple, on observe que à 10 N, ce rapport est cent fois moindre qu'à 1000 N. Enfin, la rugosité des deux surfaces est déterminante. Elle peut par exemple faire varier le coefficient de frottement.

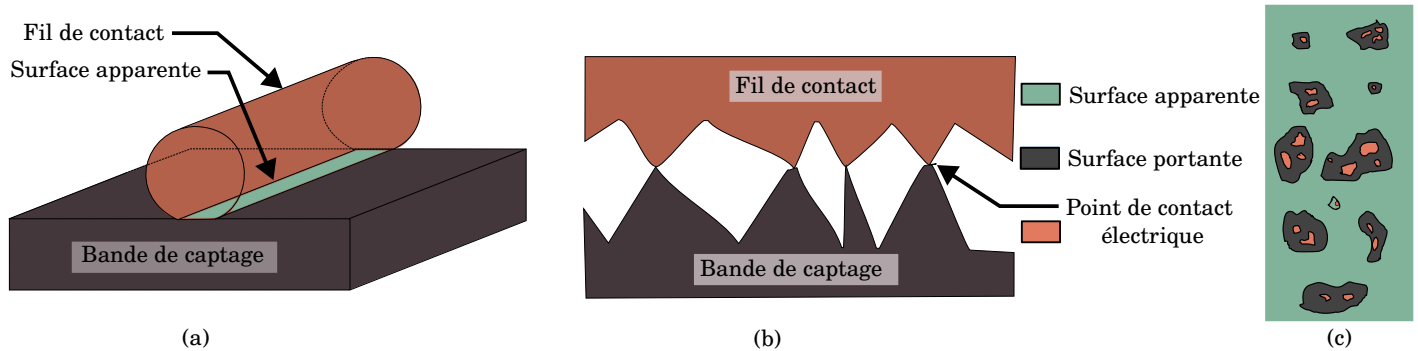


FIGURE 1.11 – Schéma du contact entre le pantographe et le fil de contact : (a) vue macroscopique et contact apparent, (b) vue microscopique, (c) différence entre contact apparent et contact réel.

	Surface de contact réelle/ Surface de contact apparente		
Métal/Force de contact	10 N	100 N	1000 N
Aluminium recuit	0,01 %	0,1 %	1,0 %
Cuivre recuit	0,008 %	0,08 %	0,8 %

TABLEAU 1.2 – Rapport de la surface de contact réelle sur la surface de contact apparente à différentes forces pour différents métaux [17].

## 1.2.4 Aspect tribologique : les différents types d'usure

De nombreux types d'usure interviennent lorsque deux solides frottent l'un contre l'autre. Ils peuvent être couplés, et dépendent largement de l'état de surface des contacts, des propriétés mécaniques des matériaux, de la lubrification ou non du contact, etc. Cette section, ainsi que la figure 1.12, cherche à identifier les principaux mécanismes d'usure qui interviennent dans le contact fil-bande.

### Usure abrasive

Dans ce cas, des particules dures, provenant d'autres usures et se trouvant entre les surfaces, pénètrent dans le matériau le plus tendre. Ainsi cette usure fait intervenir la plupart du temps trois corps [43]. Elle peut être observée par des micro-labourages, des polissages ou des arrachements de particules [44].

### Usure adhésive

Lorsque deux aspérités entrent en contact et qu'une chaleur suffisante est générée, une microsoudure instantanée peut se former entre elles. Un détachement ou un transfert de matière d'une surface à l'autre peut alors avoir lieu [45]. Les traces d'usure par adhésion sont plus chaotiques que celles laissées par l'abrasion. Des arrachements ou des petites stries sont par exemple caractéristiques d'une adhésion. Alors que l'usure par adhésion est importante dans des couples métaux/métaux [46], elle est faible dès lors qu'un des matériaux est un graphite ou un composite graphite/métal [47].

### Délamination

La délamination consiste en une déformation plastique ou un craquèlement des aspérités du matériau le plus tendre. Dans le premier cas, les aspérités sont écrasées jusqu'à ce que la surface soit lisse. Dans le deuxième cas, les aspérités se fissurent jusqu'à être arrachées sous forme de poussière [48].

### Fatigue

La surface étant soumise à des contraintes répétées et à de fortes amplitudes, des micro-fissures naissent au fur et à mesure à différents endroits. Des particules se détachent alors de la surface. Soit elles sont évacuées, soit elles créent des débris qui subissent une délamination ou génèrent une usure par abrasion. Certains auteurs décrivent la fatigue



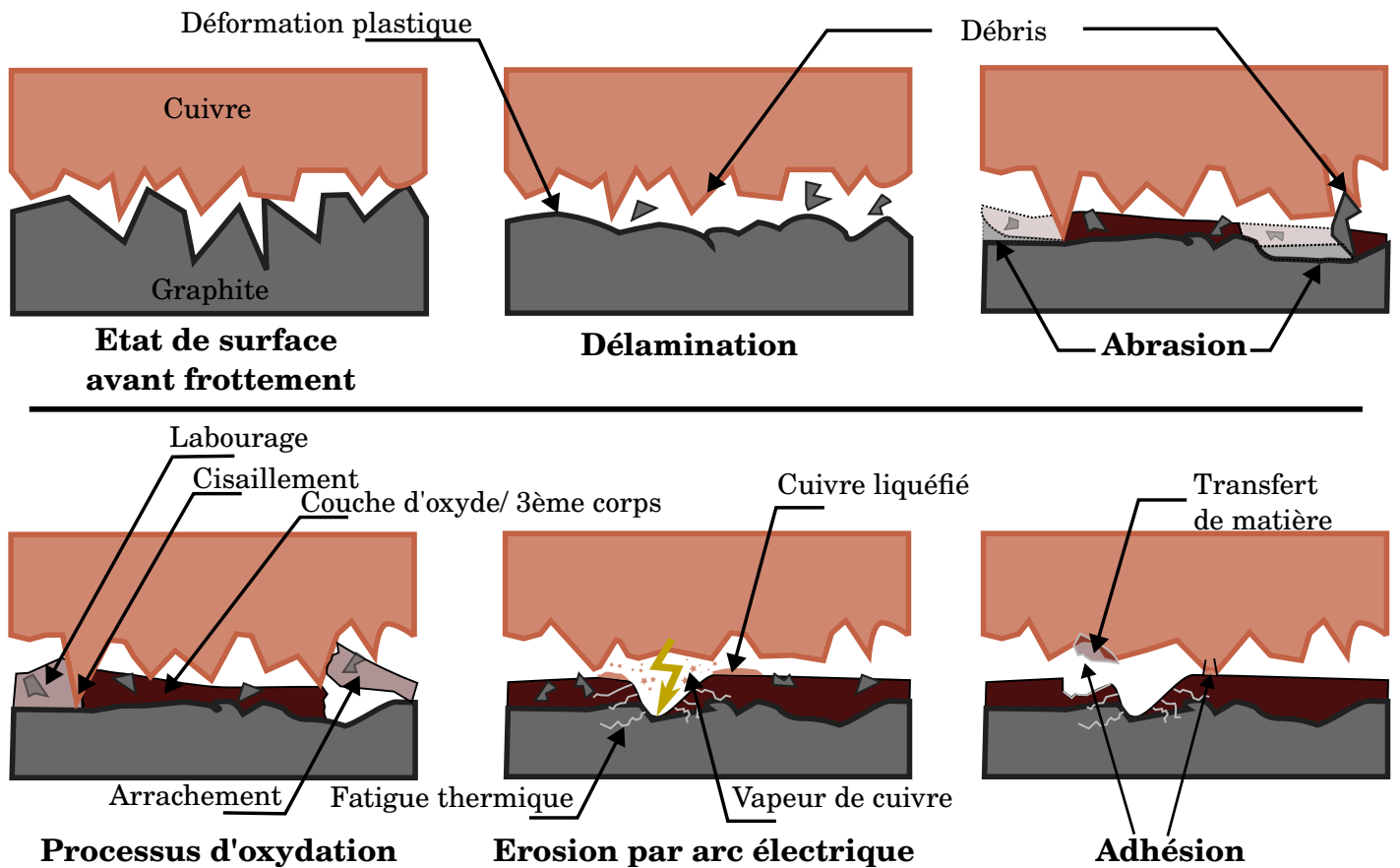


FIGURE 1.12 – Schémas des principaux types d'usure intervenant dans une LPC.

comme étant un facteur majeur dans le processus d'usure des bandes de captage [49], d'autant plus que le graphite est connu pour s'effriter et se casser facilement face aux fissures [50].

On distingue deux types de fatigue, l'une étant mécanique et l'autre thermique.

### Fatigue mécanique

Dans ce cas, ce sont les contraintes répétées sur une zone qui fragilisent le matériau. C'est une fatigue qui se retrouve plutôt dans des systèmes de transmission d'effort, type engrenage, ou dans des systèmes de guidage comme par exemple les rails [51].

### Fatigue thermique

Les flux thermiques importants et locaux peuvent créer un gradient de température, ce qui entraîne une dilatation et une contraction et créant ainsi un faïençage de la surface [52]. Cela arrive par exemple lors de décharges électriques importantes [53, 54].

### Usure par oxydation

Le cuivre réagit naturellement lorsqu'il est en contact avec de l'oxygène en deux oxydes distincts : d'une part l'oxyde de cuivre (I)  $\text{Cu}_2\text{O}$  ou oxyde cuivreux et d'autre part l'oxyde de cuivre (II)  $\text{CuO}$  ou oxyde cuivrique. Ils sont les produits de deux réactions :



L'oxyde cuivreux (1.6) prend la forme d'une poudre rougeâtre alors que l'oxyde cuivrique (1.7) est une poudre de couleur noire [55]. Ces oxydes jouent un rôle de lubrifiant à l'interface [56]. Le processus d'oxydation suit deux étapes :

(1) l'épaisseur d'oxyde croît, particulièrement lorsque le cuivre est en contact direct avec l'air, (2) des contacts ponctuels viennent ensuite cisailer cette couche d'oxyde, produisant une nouvelle quantité d'oxyde. Ce processus continue jusqu'à ce que la couche d'oxyde atteigne une épaisseur critique et soit arrachée par abrasion ou par adhésion [57]. Un transfert de matériau d'une surface à l'autre, principalement par adhésion, est alors observé [58].

### Troisième corps

Ces mécanismes d'usure mènent à la formation d'une interface connue sous le nom de tribofilm ou troisième corps [59]. Celui-ci est composé essentiellement de plaques écrasées, de débris coincés entre les aspérités, de débris libres entre les deux surfaces et surtout d'une couche d'oxyde décrite précédemment [60, 61]. Ce troisième corps modifie le comportement du contact [62], pouvant être un lubrifiant solide [63] tout comme un ensemble de particules qui réduisent la qualité du contact électrique et endommagent les surfaces par abrasion [64]. Ces propriétés dépendent de la vitesse de glissement et de la force de contact [65]. Il a également été montré que, comme la couche d'oxydation, le troisième corps suit un équilibre, alternant entre une croissance puis un décollement/arrachement lorsqu'il atteint une épaisseur critique [66].

### 1.2.5 Aspect électrique

Comme il vient d'être énoncé, le contact entre les deux matériaux est imparfait et peut être instable. Lorsque le contact est soumis à un courant électrique, deux phénomènes ayant une importance capitale dans la durabilité et la stabilité de contact apparaissent : l'effet Joule et les arcs électriques.

#### Effet Joule

Tout matériau, sauf exception, dans lequel un courant électrique circule voit à ses bornes une tension électrique et subit un échauffement interne provoqué par sa résistance électrique : c'est l'effet Joule. La puissance  $P_J$  dissipée par effet Joule peut alors s'écrire :

$$P_J = R \cdot I^2 \quad (1.8)$$

avec  $P_J$  les pertes par effet Joule [W],  $R$  la résistance électrique [ $\Omega$ ] et  $I$  le courant électrique [A].

Du fait du contact imparfait entre la caténaire et le pantographe, une résistance de contact relativement importante génère un échauffement de ce type.

#### Résistance de contact stationnaire

Comme évoqué précédemment, pour un contact entre deux aspérités, Holm.R [67] décrit la résistance de constriction étant égale à :

$$R_s = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \quad (1.9)$$

avec  $R_s$  la résistance de constriction [ $\Omega$ ],  $\rho_1$  et  $\rho_2$  les résistivités des deux matériaux [ $\Omega \cdot \text{mm}^{-1}$ ], et  $a$  le rayon du contact [mm]. Le tableau 1.3 donne des valeurs théoriques de résistances de constriction pour différentes nuances en contact avec du cuivre. On observe notamment que la résistance est plus importante lorsque la proportion de cuivre est plus faible jusqu'à atteindre un maximum pour un graphite pur.  $R_s$  augmente aussi lorsque la surface de contact diminue.

$R_s$  s'accompagne d'une résistance électrique de surface  $R_f$ , due à une couche d'oxyde et des impuretés [17]. La résistance de contact stationnaire totale est alors :

$$R_{c,s} = R_s + R_f \quad (1.10)$$

avec  $R_f$  la résistance électrique de surface des matériaux [ $\Omega$ ] et  $R_{c,s}$  la résistance de contact stationnaire [ $\Omega$ ].

#### Résistance de contact dynamique

Lorsque le contact est dynamique, la résistance de contact  $R_c$  évolue à cause de différents facteurs :

1. La force de contact fluctue, ce qui modifie la surface de contact réelle [8]
2. Les rugosités des matériaux se modifient jusqu'à atteindre un régime permanent [68, 10]

Nuance	100 % C	74 % C, 26 % Cu	30 % C, 70 % Cu	100 % Cu
Rayon $a$ ( $\mu\text{m}$ )	Résistance de constriction ( $\Omega$ )			
0,01	300	21	1,7	0,84
0,1	30	2,1	0,17	$8,4 \cdot 10^{-2}$
1	3,0	0,21	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$
10	0,30	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$

TABLEAU 1.3 – Résistance de constriction pour un contact ponctuel entre du cuivre et différentes nuances et différents rayons. Les résistivités des matériaux sont extraites de différents articles [18, 11].

3. Un tribofilme et une couche d'oxyde peuvent se former [69, 39]
4. En courant alternatif, la résistance de contact fluctue à la fréquence du réseau [70]

En faisant frotter des échantillons de différentes nuances de graphite imprégné en cuivre sur du cuivre, Grandin.M [5] a mesuré la résistance électrique de contact. Sur la figure 1.13, présentant certains de ses résultats, on observe que d'une part la résistance électrique de contact diminue très rapidement avec le taux d'imprégnation en cuivre et que d'autre part la résistance électrique fluctue pour un même essai.

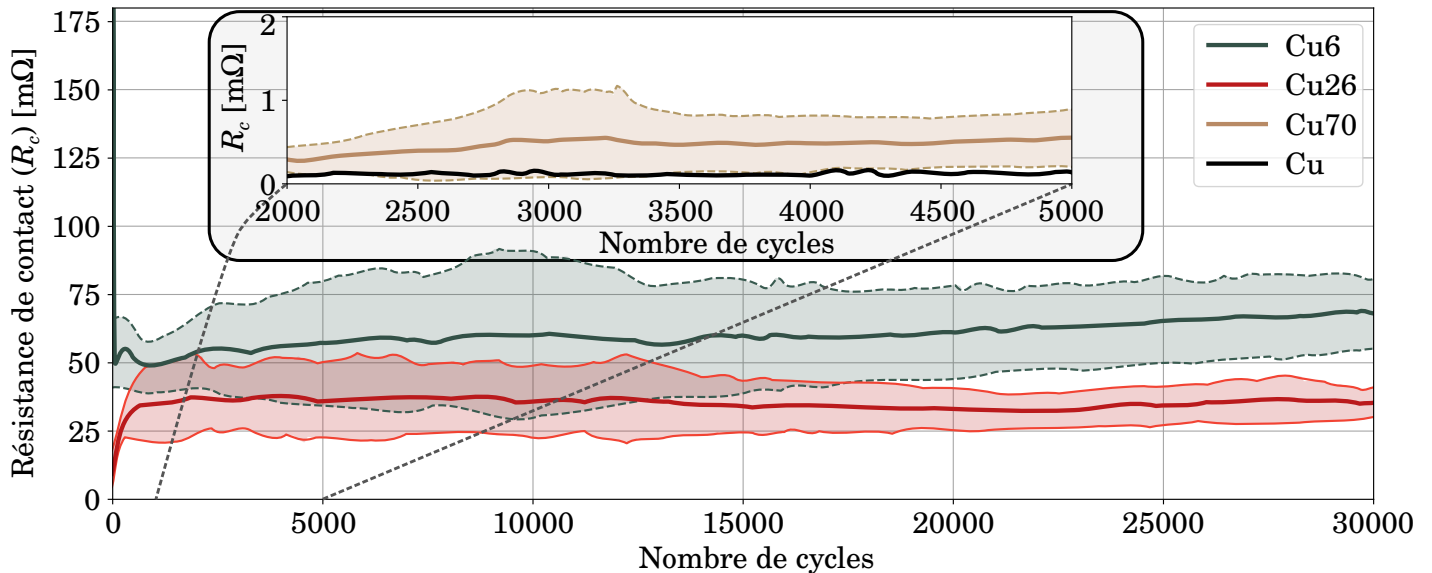


FIGURE 1.13 – Résistance de contact électrique avec différents matériaux frottant contre du cuivre, inspiré de la thèse de Grandin [5]. Cu70, Cu26, Cu6 équivalent à des nuances de graphite imprégné en cuivre à respectivement 70 %, 26 % et 6 %. Cu équivalait à du cuivre pur.

### Étincelles

Une étincelle apparaît lorsque le contact est momentanément perdu. Elle s'observe par un flash ponctuel et peut être accompagnée d'un claquement lorsque l'énergie dégagée est importante (exemple : la foudre). Lorsque le contact n'est pas reformé et que la tension et le courant sont suffisamment élevés, l'étincelle se transforme en arc.

### Arcs électriques

Une fois l'air ionisé, un tunnel de plasma permet la formation d'un canal conducteur qui entraîne les charges d'une surface à l'autre. Un arc électrique a pour propriété d'avoir ses racines fixes. Si les deux électrodes s'éloignent, l'arc s'étend jusqu'à sa rupture. Les arcs électriques sont donc instables dans une LPC. La température du plasma allant de 6000 K à 30000 K, un arc provoque de lourds dégâts même s'il est très bref [71].

## 1.2.6 Aspect thermique

Deux aspects thermiques interviennent dans la liaison caténaire pantographe. Il est important de prendre en compte d'une part les transferts de chaleur et d'autre part les sources de chaleur.

### Sources de chaleur

Trois principales sources de chaleur sont connues dans le contact fil/bande.

**Échauffement par frottement** Pour deux objets en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre, et dès lors qu'il y a un frottement (coefficient de frottement non nul), il y a une perte d'énergie qui se dissipe sous forme de chaleur. Cette quantité de chaleur s'exprime de la manière suivante :

$$Q_f = F_T \cdot v_l + F_{T_b} \cdot v_b \quad (1.11)$$

avec  $Q_f$  la chaleur dissipée par frottement [W],  $F_T$  et  $F_{T_b}$  les forces tangentielles au mouvement linéaire du fil et au mouvement de balayage de la bande [N],  $v_l$  et  $v_b$  les vitesses de déplacement du fil et de son balayage sur la bande [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

La vitesse de balayage  $v_b$  étant très petite par rapport à la vitesse linéaire  $v$ , la chaleur dissipée s'écrit :

$$Q_f = F_T \cdot v_l = F_N \cdot \mu \cdot v_l \quad (1.12)$$

avec  $F_N$  la force de contact [N] et  $\mu$  le coefficient de frottement [ $\text{N}\cdot\text{N}^{-1}$ ].

**Échauffement par effet Joule** Comme énoncé dans la section 1.2.5, un échauffement est dissipé par le passage du courant dans les matériaux et le contact. Les résistances électriques des matériaux étant négligeables par rapport à celles du contact, on a (en reprenant l'équation 1.8) :

$$Q_J = R_c \cdot I^2 \quad (1.13)$$

avec  $Q_J$  la chaleur dissipée par effet Joule [W],  $R_c$  la résistance de contact [ $\Omega$ ] et  $I$  le courant électrique [A].

**Arcs électriques et étincelles** Le processus de formation des arcs électriques et des étincelles est décrit dans la section précédente. Plusieurs paramètres déterminent la puissance  $Q_{\text{arc}}$  [W] d'un arc électrique :

- La distance entre les deux matériaux
- la résistance électrique du gaz
- le courant électrique circulant

La puissance délivrée par un arc électrique ou une étincelle découle aussi de l'effet Joule, la résistance électrique étant celle de l'air ionisé. Les particularités des arcs et des étincelles résident dans le fait qu'ils sont souvent très brefs, extrêmement instables et variables, et donc difficiles à mesurer.

### Partage de la chaleur

Trois sources de chaleur sont donc à l'origine de l'échauffement du contact  $Q_c$  [W] qui affecte le fil de contact et la bande de captage :

$$Q_c = Q_f + Q_J + Q_{\text{arc}} \quad (1.14)$$

En considérant le contact parfait, c'est à dire sans perte de chaleur dans le milieu ambiant mais seulement dans les deux corps, l'échauffement  $Q_c$  se partage entre la bande ( $Q_{\text{bande}}$ ) et le fil de contact ( $Q_{\text{fil}}$ ) :

$$Q_c = Q_{\text{bande}} + Q_{\text{fil}} \quad (1.15)$$

Exprimons maintenant les deux flux  $\Phi_{\text{bande}}$  et  $\Phi_{\text{fil}}$  [W] allant respectivement dans la bande et le fil. En **régime statique**, d'après la thèse de T.Bausseron [21], les flux s'expriment en régime permanent de la manière suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{\text{bande}} = -Q_c \cdot \frac{\varepsilon_{\text{bande}}}{\varepsilon_{\text{bande}} + \varepsilon_{\text{fil}}} \\ \Phi_{\text{fil}} = Q_c \cdot \frac{\varepsilon_{\text{fil}}}{\varepsilon_{\text{bande}} + \varepsilon_{\text{fil}}} \end{cases} \quad (1.16)$$

avec  $\varepsilon_{\text{fil}}$  et  $\varepsilon_{\text{bande}}$  les émissivités du fil et de la bande de captage [ $\text{W} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]. En **régime dynamique** le problème est plus complexe. D'après différentes études [72, 73, 74, 75, 76, 77], il dépend principalement de :

- la vitesse linéaire du fil par rapport à la bande
- la conductivité thermique des deux corps
- la diffusivité thermique des deux corps
- la longueur du contact dans le sens du fil
- la résistance thermique à l'interface du contact
- la rugosité des surfaces en contact
- la force de contact

Pour estimer la répartition des flux de chaleur produits à l'interface dans les deux corps, on peut utiliser la notion de coefficient de partage. Celui-ci se calcule par le rapport entre la chaleur allant dans un solide sur la chaleur totale produite. Dans une étude récente [78], ce coefficient est calculé entre un objet fixe d'une surface d'1 mm<sup>2</sup> en contact avec un disque de rayon 100 mm tournant à différentes vitesses (voir fig.1.14). La conductivité thermique du cuivre étant nettement supérieure à celle du graphite, et la vitesse du train allant de 8 à 40 m·s<sup>-1</sup>, il est très probable que le coefficient de partage de la bande se situe en dessous de 0,3. Le flux de chaleur dans le fil de contact est donc plus important que celui dans la bande de captage.

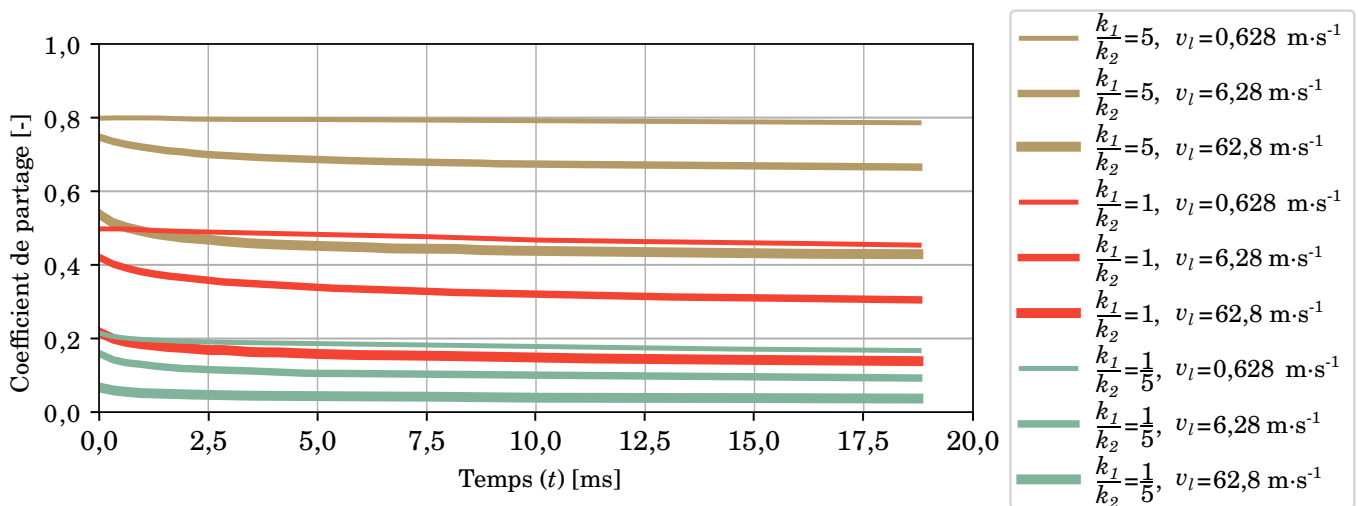


FIGURE 1.14 – Évolution temporelle du coefficient de partage, pour un objet fixe en pression sur un disque en rotation, à différentes vitesses et à différents rapports de conductivité ( $k_1$  étant la conductivité du corps fixe et  $k_2$  celle du disque en mouvement).

### Transfert de chaleur

Les sources de chaleur ayant été listées, il est maintenant important de comprendre les échanges thermiques au niveau de la bande de captage. Mise en appui contre le fil de contact avant le début d'un trajet, celle-ci est à température ambiante. Par **conduction**, la chaleur produite va se diffuser et être **stockée** dans la bande de captage qui sera par ailleurs refroidie par **convection**. Le **régime transitoire** débute alors et la température augmente jusqu'à atteindre un équilibre, appelé **régime permanent** stationnaire (température quasi-constante) ou régime permanent périodique (fluctuation périodique temporelle). Cet équilibre se joue entre les sources de chaleur, la convection, la conduction, la capacité de stockage de la bande et le **rayonnement thermique**. Ce dernier est provoqué par le rayonnement solaire, il ne sera pas traité et détaillé dans cette étude.

### Stockage d'énergie thermique $Q_s$

C'est la faculté d'un matériau à accumuler, conserver ou restituer de la chaleur. La puissance thermique stockée peut se mettre sous la forme :

$$Q_s = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.17)$$

avec  $Q_s$  la puissance thermique stockée [W],  $\rho$  la masse volumique [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $C_p$  la capacité calorifique [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  $\frac{\partial T}{\partial t}$  la variation temporelle de la température [ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

### Conductivité $k$

C'est l'aptitude d'un matériau à transférer la chaleur sans déplacement macroscopique lorsqu'il y a un gradient thermique. Décrit par la loi de Fourier, un transfert de chaleur de la zone chaude vers la zone froide crée un flux thermique conductif. La chaleur transférée s'écrit alors :

$$Q_k = -k \cdot S_c \cdot \nabla T \quad (1.18)$$

$Q_k$  étant le flux transféré [W],  $k$  la conductivité du matériau [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  $S_c$  la section [ $\text{m}^2$ ] dans laquelle il y a le gradient de température  $\nabla T$  [ $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$ ].

Dans le cas du graphite, deux propriétés sont à prendre en compte :

1. Comme décrit précédemment, le graphite est un matériau anisotrope alors que le cuivre est isotrope. Ce dernier a donc une conductivité uniforme en x, y et z alors que le graphite possède trois conductivités différentes,  $k_x$ ,  $k_y$  et  $k_z$ , selon les 3 axes.
2. Le graphite a des conductivités thermiquement dépendantes. En effet, il a été montré qu'elles diminuent avec la température [79, 80].

### Convection $h$

dès lors qu'il y a un gradient de température entre un solide et un fluide l'entourant, il y a une convection naturelle qui provoque un échange de chaleur entre le fluide et le solide. Lorsque le fluide est mis en mouvement artificiellement, ce qui est le cas pour un train en mouvement, la convection est dite forcée. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$Q_h = h \cdot S \cdot (T - T_{\infty}) \quad (1.19)$$

avec  $Q_h$  la puissance échangée par convection [W],  $h$  le coefficient d'échange [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  $S_h$  la surface d'échange avec le fluide [ $\text{m}^2$ ] et  $T$  et  $T_{\infty}$  les températures respectives du solide et du fluide [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Dans son mémoire de stage, S.Magny a étudié la convection autour d'une bande de captage [6]. Il a pu ainsi montrer que pour chaque face le coefficient d'échange est différent. Ainsi, pour un train roulant à  $140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $h$  prend des valeurs allant de 100 à  $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  selon la face observée (voir figure 1.15).

## 1.2.6 Conclusion

Cinq disciplines, la mécanique; la composition des matériaux; la tribologie; la thermique et l'électrotechnique; gouvernent donc principalement une liaison caténaire pantographe. Liées les unes aux autres, elles interagissent constamment. L'un des grands enjeux dans l'étude de la LPC est de comprendre toutes les interactions afin de prendre en compte tous les domaines physiques. De nombreuses analyses [81, 82, 83] et modélisations [84, 85] ont été développées dans cette optique. C'est ce qu'on fait T.Bausseron et N.Delcey au sein de l'institut FEMTO-ST en modélisant la LPC sous forme d'un système thermo-électrique.

---

## 1.3 Travaux antérieurs

---

Deux travaux de thèse ont conduit à la construction de modèles thermoélectriques d'un contact statique, pour un train immobile et d'un contact dynamique dans le cas d'un train roulant. Les apports et conclusions sont ici présentés succinctement.

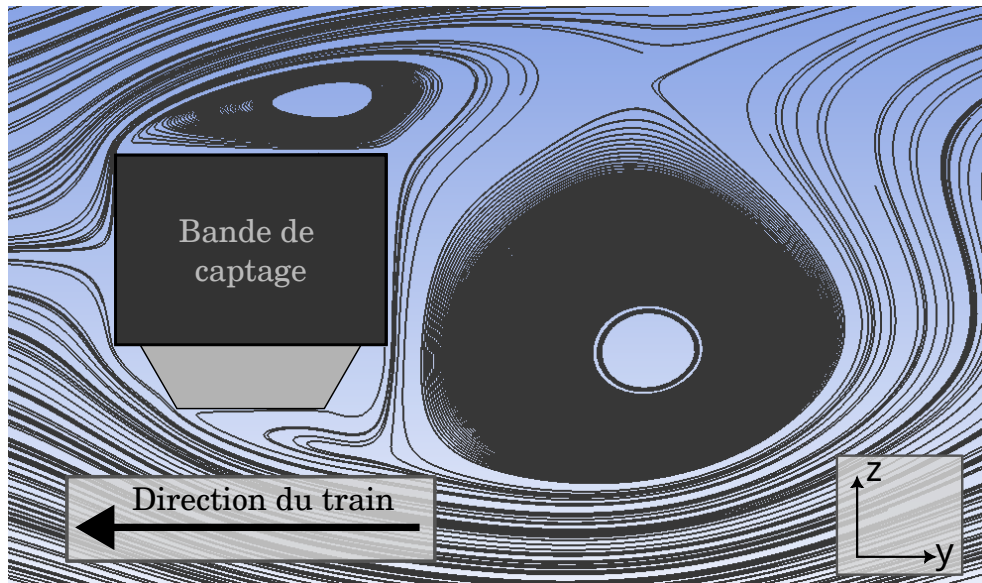


FIGURE 1.15 – Écoulement d’air autour d’une bande de captage pour un train roulant à  $140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , travaux tirés de du mémoire de stage de Magny.S [6].

### 1.3.1 Contact statique

T.Bausseron a réalisé dans sa thèse un outil informatique de simulation qui repose sur la modélisation thermoélectrique transitoire 2,5 D du fil de contact et 2 D de la bande de captage [21]. Ses travaux font suite aux problèmes de sur-échauffement du fil de contact rencontrés lorsque le train est à l’arrêt en captant le courant, pouvant amener le fil de contact à se rompre. Ces problématiques coïncident avec l’arrivée des bandes de captage en carbone. Les résultats numériques ont été comparés avec des résultats expérimentaux réalisés sur un banc d’essai spécifique à la LPC statique, situé dans les locaux de l’Agence d’Essais Ferroviaires à Vitry-sur-Seine. Pour ce contact statique, T.Bausseron a pu montrer que les paramètres les plus influents sur l’échauffement du fil étaient la résistance thermique et électrique de contact et la surface de contact [86].

### 1.3.2 Contact en mouvement

La thèse de N.Delcey porte sur la modélisation de l’échauffement d’une bande de captage dans le cas d’un train en mouvement. Pour cela des modèles 1 D, 2 D et 2,5 D ont été construits et validés par des résultats expérimentaux.

#### Modélisation

La MODélisation Numérique de l’Interface CATénaire (MONICA) a rencontré des difficultés de résolution numérique qui ont mené à des optimisations. Un changement de référentiel mathématique permet de créer un maillage raffiné autour du point de contact et qui se déplace avec le mouvement de balayage. De plus, la méthode ADI (*Alternating Direction Implicit*) est utilisée afin de faciliter la résolution et diminue le temps de calcul.

#### Essais expérimentaux

Les essais expérimentaux ont été menés sur un banc d’essai à échelle 1 :1 situé à l’école polytechnique de Milan (POLIMI). Ce banc sera décrit dans la section suivante. Pour ces essais, N.Delcey a inséré 19 thermocouples de type K répartis dans la longueur, la largeur et l’épaisseur d’une bande de captage. Les essais ont été faits avec différentes bandes, variant en épaisseur, en nuance et à différents courants, vitesses et forces de contact.

#### Résultats

Il a été mis en évidence que l’erreur entre les essais en utilisant MONICA et les résultats des essais expérimentaux est inférieure à  $\pm 6 \%$  (cf. figure 1.16).

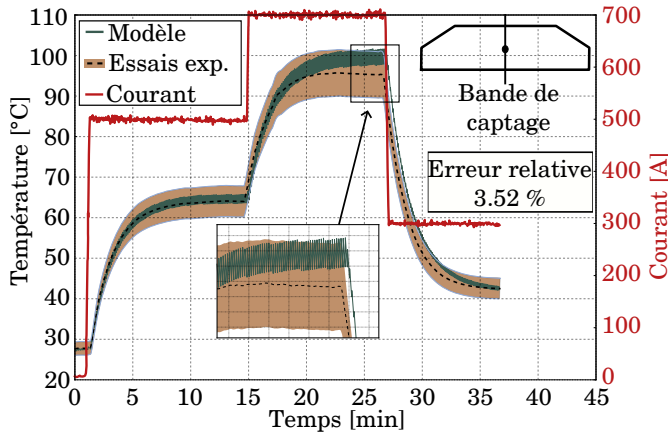


FIGURE 1.16 – Profil de température au centre de la bande de captage [7].

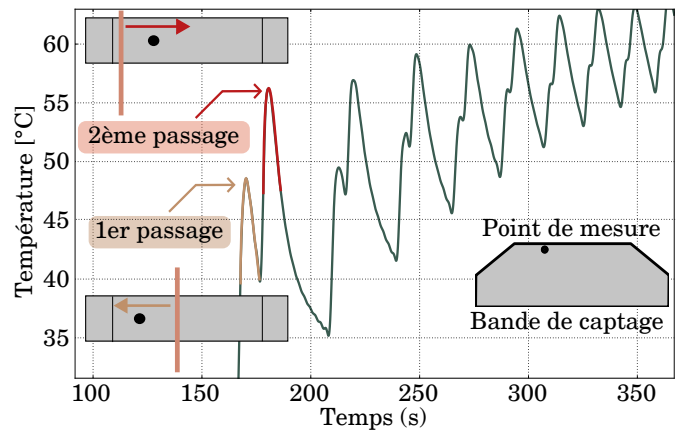


FIGURE 1.17 – Effet du point de rebroussement sur le profil de température [7].

D'autre part, N.Delcey a montré l'importance du nombre de Peclet solide lors du balayage. Ce nombre adimensionnel se traduit de la manière suivante :

$$Pe_s = \frac{v_b \cdot L_b}{\alpha} \quad (1.20)$$

$Pe_s$  étant le nombre de Peclet solide [-],  $v_b$  la vitesse de balayage [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $L_b$  l'amplitude de balayage [m] et  $\alpha$  la diffusivité thermique [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ].

On peut noter que le nombre de Peclet est utilisé pour déterminer le coefficient de partage énoncé précédemment. Dans ce cas, il intervient d'autant plus lorsqu'il y a un effet de rebroussement, schématisé par la figure 1.17. Dans un aller-retour du fil de contact sur la bande de captage, et pour une zone comprise entre les deux extrémités de celle-ci, deux pics d'échauffement peuvent être observés. Plus la zone étudiée est proche de l'extrémité de la bande, plus l'échauffement sera important et le temps de refroidissement entre le premier et le deuxième passage sera court.

### Perspectives

Les résultats et conclusions de la thèse de N.Delcey ont mis en perspective la construction et le développement d'un banc d'essai permettant d'affiner les résultats du modèle MONICA et de mieux comprendre certains phénomènes et propriétés d'une LPC. Ainsi, une année de post-doctorat a été financée à N. Delcey pour débiter la réalisation de ce banc. Cette thèse s'inscrit dans cette continuité afin de finaliser le banc décrit dans le prochain chapitre, dans le but de tester différents types de bandes de captage.

## 1.4 Bancs d'essais représentatifs de la liaison pantographe caténaire

Dans le domaine des contacts électriques glissants, les bancs d'essais cherchent souvent à être représentatifs d'un système de balais tournants ou d'une liaison pantographe caténaire. Cette thèse portant sur l'étude expérimentale du second système, il est fondamental de connaître les autres dispositifs majeurs se focalisant sur ce sujet. Les bancs d'essais dédiés aux balais tournants ont donc volontairement été écartés de cette synthèse car considérés comme moins pertinents.

Les systèmes décrits par la suite sont généralement composés d'une partie rotative sur laquelle se trouve le fil de contact. La bande de captage (ou un échantillon) est alors mise en appui sur cette partie par le biais d'un vérin ou d'une masse. Les descriptions des bancs s'appuieront par la suite sur les informations données dans le tableau 1.4. Celui-ci liste les propriétés, les domaines d'études et les spécificités de cinq bancs d'essais choisis parmi les plus récents et les plus pertinents. Certains ayant des structures similaires, ces bancs ont été répartis en trois catégories distinctes. Comme les auteurs font souvent des études de surface, les méthodes d'observation sont spécifiées en faisant appel aux acronymes suivants :

— *Scanning Electron Microscopy* (SEM) ou microscope électronique à balayage



- *Energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDXS) ou spectroscopie de rayon X à dispersion d'énergie
- *X-ray photoelectron spectrometry* (XPS) ou spectrométrie de photoélectrons induits par rayons X

	Banc d'essai pion-disque [8]	Banc d'essai pion-disque [10, 9]	Bande sur anneau [70, 87]	Bande sur anneau [88, 89]	Banc d'essai échelle 1 [7, 90, 91, 92]
<b>Vitesse</b>	28 m·s <sup>-1</sup>	20 m·s <sup>-1</sup>	8,4 m·s <sup>-1</sup>	110 m·s <sup>-1</sup>	60 m·s <sup>-1</sup>
<b>Force de contact</b>	70 N	70 N	80 N	10 – 300 N	60 – 110 N
<b>Courant/ Tension</b>	300 A AC	100 A	200 A AC	400 A AC 100-3000 V	1400 A DC 500 A AC 16 <sub>2/3</sub> Hz 350 A AC 50 Hz
<b>Balayage</b>	Aucun	Aucun	Oui	Oui (0.3-3Hz)	Oui
<b>Détection d'arc</b>	Photodiode	Aucune	Aucune	Capteur à effet Hall	Historique de tension de contact
<b>Mesure température</b>	Aucune	Aucune	Caméra infra-rouge	Caméra infra-rouge	Thermocouple type K
<b>Mesure d'usure</b>	Aucune	Masse perdue	Aucune	Volume perdue distance	Volume perdue distance
<b>Mesure de frottement</b>	Aucune	Oui (méthode non précisée)	Aucune	Capteurs de force	Capteurs de force
<b>Mesure de perte de masse</b>	Aucune	Avant/après test	Aucune	Avant/après test	Avant/ après test
<b>Observation de surface</b>	SEM, XPS profileur 3D profiler	SEM, EDXS, dureté et rugosité	SEM, EDXS	Appareil photo SEM, EDXS	Aucune
<b>Type de bande</b>	Carbone pur	Cuivre pur, composite graphite-cuivre, graphite-cuivre à revêtement,	Carbone pur	Carbone pur	Carbone, Carbone imprégné Cu (20-30 %)
<b>Type de fil</b>	QCr0.5 alliage chrome-cuivre	QCr0.5 alliage chrome cuivre	Alliage magnesium-cuivre	Alliage cuivre-argent	Cuivre pur
<b>Particularité</b>	Fluctuation de la force de contact	Étude du comportement du frottement Etude du courant	Mesure de T°(C) précise	Angle de la bande ajustable	Tests échelle 1 Différents types de courant imposés

TABLEAU 1.4 – Liste et caractéristiques des bancs d'essais conçus pour étudier la liaison caténaire pantographe.

### 1.4.1 Bancs d'essai à structure pion-disque

Dans cette catégorie, la première colonne du tableau 1.4 décrit les caractéristiques des essais menés par Zhang.Y et al. [8] tandis que la deuxième colonne exploite les résultats des travaux produits par Yang.Z et al. [10]. Schématisées par la figure 1.18, ces deux machines ont pour similarité d'avoir un disque en cuivre en rotation sur lequel deux pions identiques en graphite sont mis en appui. Un courant électrique est alors injecté par l'intermédiaire de l'un des pions, traverse le disque pour être ensuite évacué par le pion opposé.

Dans la première étude, la particularité est d'utiliser une photo-diode pour évaluer l'amplitude et la quantité d'arcs électriques au cours d'un essai. L'ajout d'une caméra à haute vitesse (10.000 fps) permet de filmer un arc électrique à très haute vitesse. La force de contact est asservie pour fluctuer autour de 70 N avec une fréquence et une amplitude précises. L'influence de ces dernières a été étudiée et sera décrite dans la section suivante.

Le deuxième article a pour spécificité d'étudier trois nuances d'échantillons différents en se focalisant sur l'usure, le coefficient de frottement et les performances de circulation du courant. Ces dernières sont évaluées par la stabilité et l'efficacité de circulation du courant. L'efficacité est calculée par la moyenne du courant mesuré divisée par le courant de consigne tandis que la stabilité correspond à la fluctuation du courant pendant l'essai. Elle est calculée de la façon suivante :

$$CV_I = \left(1 - \frac{\sigma}{\bar{I}_i}\right) \quad (1.21)$$

où  $CV_{I,\%}$  est le coefficient de variation du courant [-],  $\sigma$  est l'écart type du courant [A] et  $\bar{I}_i$  est la moyenne du courant

au cours de l'essai [A].

Plus le coefficient de variation est petit, plus le captage du courant est stable (valeurs proches de la moyenne). A l'inverse, un  $CV_{I,\%}$  proche de 100 % signifie que le captage du courant est instable.

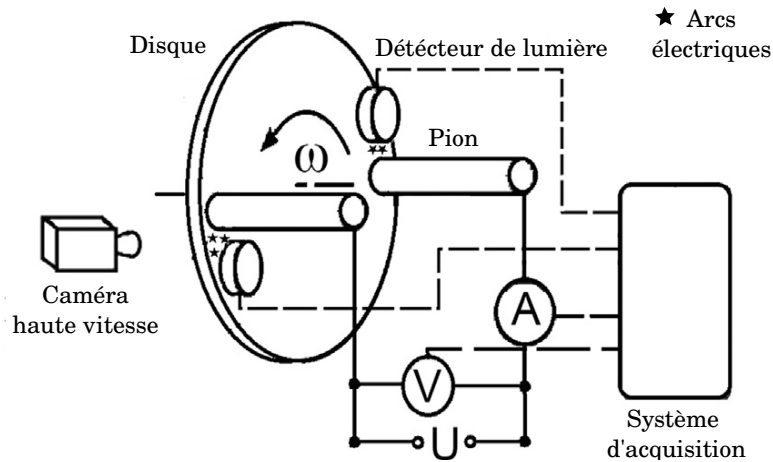


FIGURE 1.18 – Configuration du banc d'essai de l'Université de génie électrique, Xi'an, Chine, traduit d'un article de Yang.Z et al. [8, 9, 10].

## 1.4.2 Bancs d'essais à structure bande de captage-anneau

Les caractéristiques des essais menés sur ce type de banc se trouvent dans la troisième et quatrième colonnes du tableau 1.4. Tirée d'un article de Wu.G et al. [87], la figure 1.19 (a) schématise ce type de machine. Dans le premier cas, deux fils de contact en cuivre sont fixés à l'extrémité de deux roues tournantes, similairement à la chaîne d'un vélo mise en mouvement par le plateau et le pignon. Pour le deuxième banc d'essai (figure 1.19 (b)) [88], c'est un seul fil de contact en cuivre qui est fixé au périmètre d'une roue en rotation. Mise en appui sur le ou les fils, une bande de captage suit un mouvement de balayage perpendiculaire à l'axe du fil. Le courant est alors injecté dans le fil puis récupéré par la bande de captage.

Le premier banc d'essai est dédié à l'étude de l'échauffement du contact en utilisant une caméra infra-rouge [70, 87]. Plutôt que de quantifier l'usure, les auteurs cherchent à décrire les différents processus et morphologies d'usure, en employant par exemple les techniques de SEM, d'EDXS ou plus simplement une caméra numérique pour analyser les états de surface.

Le deuxième montage expérimental permet d'atteindre une vitesse de  $110 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $400 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Cependant, les auteurs ont fait des essais à une vitesse maximale de  $55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . L'une des particularités de ce banc est de pouvoir modifier l'angle de la bande de captage par rapport au fil de contact (voir figure 1.19 (b)). En allant de  $0^\circ$  à  $4^\circ$  on peut voir l'influence de l'inclinaison de la bande sur l'échauffement, l'usure ou le coefficient de frottement [88]. Dans une autre configuration, le banc d'essai est équipé d'un capteur de tension et d'un capteur de courant à effet Hall. Chen.G.X. et al. [89] mesurent ainsi l'énergie de décharge par arc par la formule suivante :

$$E = \frac{\int U \cdot I \cdot dt}{d} \quad (1.22)$$

Avec  $E$  l'énergie de décharge par arc [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$ ],  $U$  la tension d'arc [V],  $I$  le courant électrique [A],  $d$  la distance parcourue [km] et  $t$  le temps d'essai [s]. Ils mesurent aussi la température à l'aide d'une caméra infrarouge et calculent le taux d'usure de la bande via la mesure du volume perdu [ $\text{mm}^3$ ] divisé par la distance parcourue [km].

## 1.4.3 Banc d'essai échelle à échelle réelle

Proche du type de la structure anneau-bande, un banc d'essai appelé CCTB (*Current Collection Test Bench*) se trouvant à l'école polytechnique de Milan, a la particularité d'être à l'échelle 1 :1 par rapport à une vraie liaison pantographe caténaire [90] (voir figure 1.20). Un fil de contact en cuivre est maintenu par plusieurs attaches le long

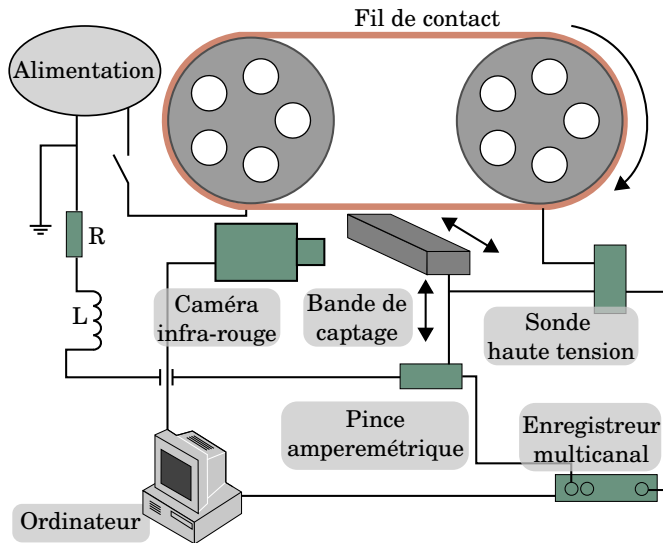


Figure 1.19(a) – Synoptique du banc d'essais de l'Université de génie électrique de Chengdu, Chine, repris d'un article de Wu.G et al. [87].

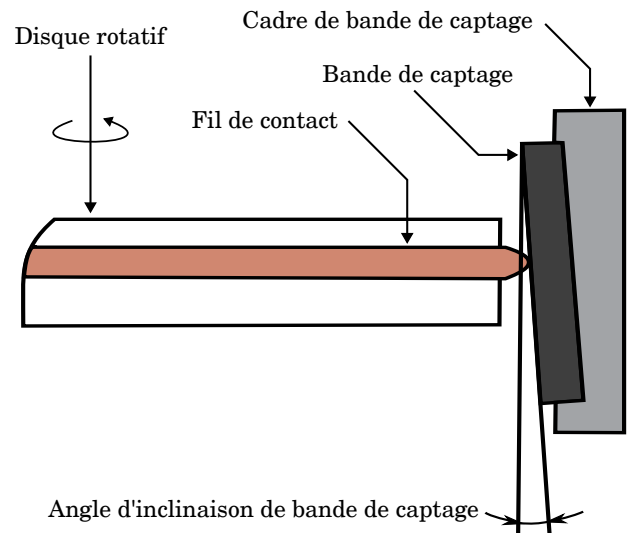


Figure 1.19(b) – Synoptique du banc d'essai de l'institut de recherche en tribologie de Jiatong, Chine, inspiré d'un article de Chen.G et al.[88].

d'une roue rotative dont le diamètre fait plus de 4 m de diamètre. Comme vu dans les configurations précédemment décrites, une bande de captage est mise en appui, suit un mouvement alternatif de balayage et reçoit un courant provenant du fil. Un système de ventilation permet de refroidir la bande de la même manière que sur un train en mouvement. Quatre capteurs de force permettent de mesurer la force de contact et la force tangentielle. Une autre particularité est d'utiliser un accéléromètre mis au centre de la bande pour estimer la stabilité de contact. Cela apporte aussi une information complémentaire pour mesurer le taux d'arc électrique au cours d'un essai. Enfin, le type de tension est modulable, pouvant être en courant continu, courant alternatif 50 Hz ou courant alternatif 16<sub>2/3</sub> Hz.

Comme mentionné dans la section 1.3.2, c'est sur ce banc de test que N. Delcey a pu mener une campagne d'essais. En insérant des thermocouples de type K le long d'une bande de captage, il a ainsi pu mesurer l'échauffement sur différentes bandes, à différentes forces de contact, vitesses et profils de courant [7].

#### 1.4.4 Autres bancs d'essais : génération d'arcs et tribomètre vibratoire

##### Génération d'arcs électriques

Le banc d'essai représenté figure 1.21 (a) permet d'étudier spécifiquement les conditions de détérioration par arcs électriques [53]. La cathode, fabriquée en cuivre, est attachée à une structure fixe, tandis que l'anode, un composite graphite-cuivre provenant de bande de captage, repose sur un plateau mobile. Un test se déroule de la manière suivante :

1. La résistance de contact électrique est mesurée, au moment où les électrodes sont en contact ( $R_c \approx 10,8 \text{ m}\Omega$ ).
2. Le plateau mobile commence une descente à une vitesse de  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .
3. Pendant ce mouvement, lors de la rupture de contact, un arc électrique apparaît.
4. Pour étudier cet arc, une caméra infrarouge capture la distribution de température et un oscilloscope enregistre la forme d'onde de la tension aux bornes de l'alimentation.
5. A la fin des essais, la surface de la bande est étudiée par SEM et à partir de photos à haute-définition.

Les auteurs admettent cependant un défaut de représentativité dans leur étude. En effet, dans les conditions réelles du contact fil-bande, un arc électrique est étiré avec le balayage et le déplacement du fil sur la bande, ce qui déplace sa zone de frappe ou stoppe le processus d'arc. Sur ce banc d'essai, l'arc détériore une même zone durant tout l'essai, sans se déplacer.

##### Tribomètre d'un contact électrique vibrant

Comme montré sur la figure 1.21 (b), deux cylindres horizontaux et plans, celui supérieur étant en cuivre et celui inférieur en composite graphite-cuivre, sont utilisés pour étudier les contacts électriques glissants. Ces cylindres font

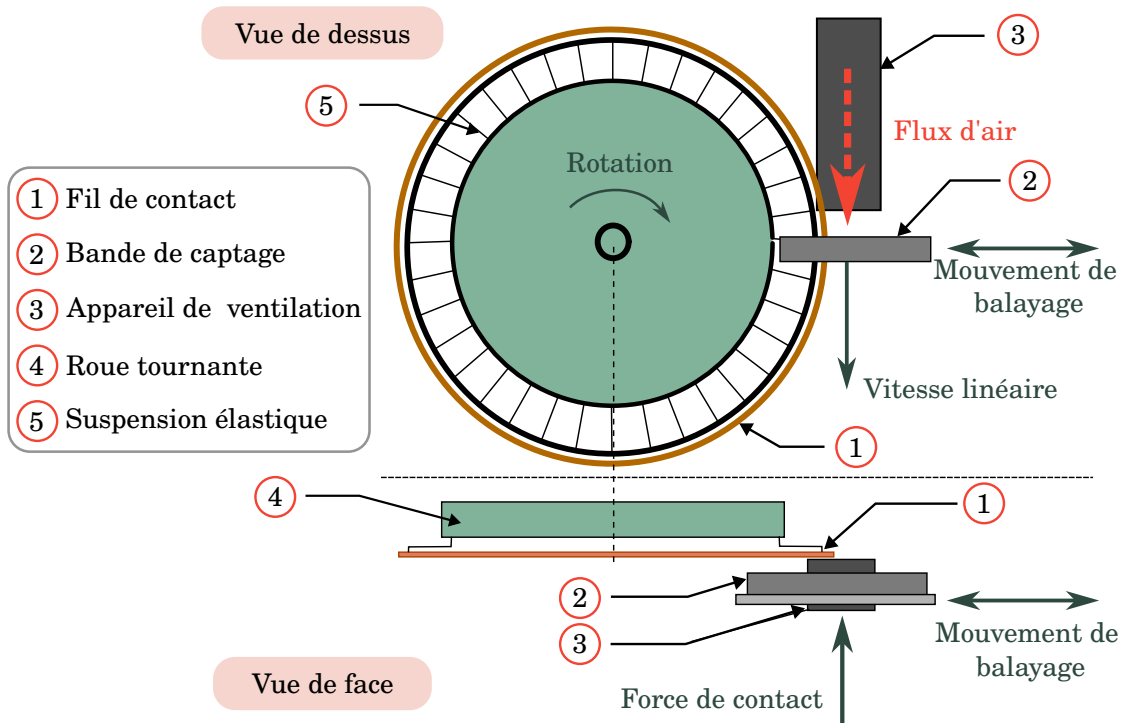


FIGURE 1.20 – Schéma du banc d'essais de POLIMI, utilisé pendant les travaux de N. Delcey.

20 mm de hauteur et 10 mm de diamètre. Ils sont mis en contact par un ressort appliquant une force de contact de 10 N avec un courant électrique de 5 A circulant du cylindre supérieur au cylindre inférieur. Ce dernier est mis en vibration par un vibreur avec une amplitude de 5 mm et une fréquence de 3 Hz. Pour mesurer la tension et le courant, la méthode de la sonde à quatre points est utilisée. Cela permet de calculer plus précisément la résistance de contact sans prendre en compte celle des fils et des différents contacts parasites [11]. La figure 1.13 donne un exemple de mesures obtenues sur des nuances qui diffèrent selon leur taux d'imprégnation en cuivre.

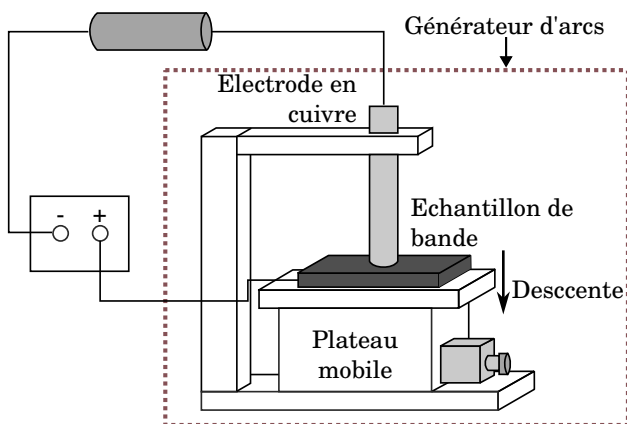


Figure 1.21(a) – Schéma du générateur d'arc, provenant d'un article de Wu.G et al. [53].

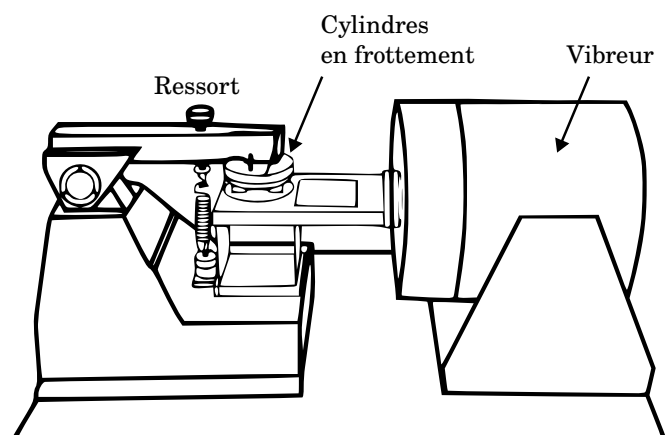


Figure 1.21(b) – Schéma de la configuration expérimentale du tribomètre, extrait d'un article de Granding.M [11].

#### 1.4.4 Conclusion

En général, les bancs d'essais sont dédiés à l'étude de différents paramètres qui permettent de mieux comprendre le contact électrique glissant d'une liaison pantographe caténaire. Ils ont chacun leurs spécificités, structures et défauts de représentativité. Les résultats d'un banc d'essais à un autre sont donc difficilement comparables car les matériaux utilisés ou les fréquences de résonances mécaniques affectant le contact sont largement différents. D'autre part, la

surface de contact apparente est rarement précisée. Or, celle-ci est très importante puisqu'elle conditionne la pression de contact, la densité de courant, la résistance de contact ainsi que le coefficient de frottement. Enfin, la direction de l'architecture atomique du graphite, les propriétés des matériaux utilisés et leur processus de fabrication sont aussi rarement mentionnés.

Tout cela empêche une comparaison directe des résultats expérimentaux des différents auteurs. Par conséquent, dans la prochaine section, seules les tendances seront étudiées et synthétisées. Un accent sera mis sur l'impact des différents facteurs influençant l'usure et l'échauffement des bandes de captage.

## 1.5 Synthèse des résultats

Afin de synthétiser les résultats expérimentaux, la liaison pantographe caténaire est ici décrite comme un système à entrées/sorties (voir figure 1.22). Des propriétés physiques et des phénomènes intermédiaires sont aussi pris en compte, ceux-ci dépendant des entrées, mais interagissant également les uns avec les autres. Ainsi, certains de ces facteurs ont un impact direct ou indirect sur l'usure et la qualité de captage. Les entrées du système sont ainsi réparties en cinq groupes :

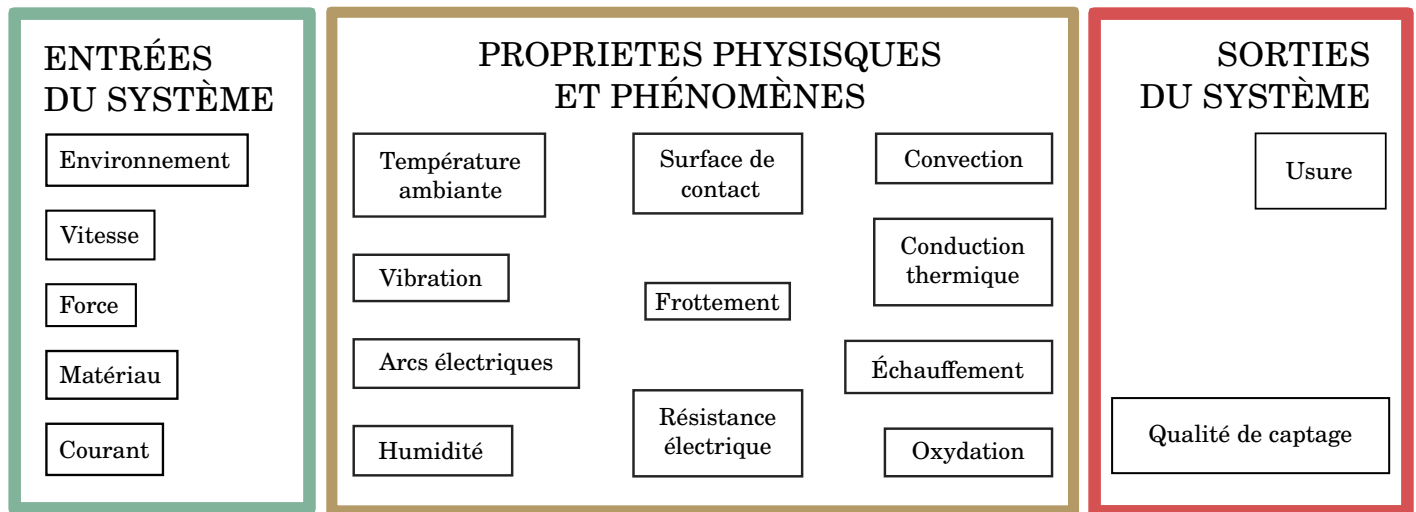


FIGURE 1.22 – Visualisation d'une liaison pantographe caténaire comme système à entrées/sorties avec des propriétés physiques et des phénomènes intermédiaires.

### L'environnement

Regroupant l'ensemble des conditions météorologiques (température ambiante, humidité relative), l'environnement est difficile à étudier et à contrôler. Il est néanmoins important à prendre en compte puisque, comme on le verra par la suite, il impacte directement l'oxydation ou l'apparition des arcs électriques.

### Matériaux

Ce groupe est composé d'une part de la bande de captage et d'autre part du fil de contact, ce dernier étant presque exclusivement en cuivre ou en cuivre allié. En revanche, on trouve dans les bandes de captage une variété de nuances beaucoup plus abondante. Même si les trains, qui utilisent de l'acier ou du cuivre pour capter le courant, circulent encore aujourd'hui, ce sont des nuances de graphite ou divers nuances dérivées qui composent de plus en plus les bandes du parc ferroviaire français. En effet, le cuivre est un excellent conducteur électrique et thermique mais pose des problématiques de lubrification et d'usure du fil de contact [93]. *A contrario*, le graphite est un conducteur thermique et électrique médiocre mais a des propriétés d'auto-lubrification et une dureté qui permettent de préserver le fil de contact [94]. Cela fait de la bande de captage une pièce d'usure et engendre un contact moins conducteur (équation 1.9) et générant plus d'échauffement.

Les nuances de la bande de captage définissent aussi la géométrie du contact et sa surface au niveau macroscopique : sa rugosité ainsi que ses propriétés mécaniques influencent la surface réelle.

### **La force de contact**

Elle induit la pression de la bande sur le fil et aide à stabiliser le contact fil-bande. Cela permet d'avoir une surface de contact réelle suffisante pour minimiser la résistance électrique de contact, mais aussi d'éviter les arcs électriques par perte de contact. Cependant, une force trop importante augmente le coefficient de frottement et l'usure mécanique [17].

### **La vitesse**

Elle augmente les vibrations et les pertes de contact, conduisant à un rythme d'apparition des arcs plus soutenu. La vitesse implique aussi un phénomène de refroidissement par convection.

### **Le courant**

Son intensité dépend de l'énergie nécessaire au système de transport pour fonctionner : sa valeur est importante lors des forts appels de puissance, par exemple lorsque le train accélère ou se trouve dans des pentes à forts dénivelés. Le courant peut induire un échauffement important par effet Joule et impacte l'amplitude et la fréquence des arcs, l'usure et le coefficient de frottement. Enfin, le courant intervient dans la formation du troisième corps [18].

## 1.5.1 Environnement

Comme énoncé précédemment, les composantes de l'environnement sont difficiles à étudier. Les auteurs se sont néanmoins intéressés à deux d'entre elles : la température ambiante et la composition de l'air.

### Température ambiante

Une étude menée par Liu.X et al [12] montre que le taux d'usure et le coefficient de frottement sont plus importants à 100 °C qu'à température ambiante. En effet, la température altère la plasticité du graphite et est un catalyseur dans l'oxydation du cuivre. C'est pour cette raison qu'un matériau très riche en cuivre est moins résistant à des températures élevées. Aussi, le film protecteur se formant à la surface des matériaux est plus fragile à haute température, ce qui entraîne une usure par oxydation.

Liu.R et al. [19] ont aussi réalisé des essais avec une fluctuation de la température ambiante. En étudiant la composition de la surface après essai, ils ont mesuré un taux d'oxygène plus important à température ambiante élevée. Cela met en lumière l'effet catalyseur de la température sur l'oxydation mentionnée précédemment. Ils ont aussi mesuré une augmentation du taux d'usure avec la température ambiante.

### Composition de l'air

Une étude expérimentale faite par Hu.Z.L et al. [18] a montré que le taux d'usure d'un balai en électrophotographie est au plus de deux fois plus important lorsque l'humidité ambiante est à 10 % que lorsqu'elle est à 50 %. Dans le premier cas, seuls des grains de graphite sont observables en surface alors qu'à 50 % d'humidité ambiante, une couche protectrice d'oxyde est visible. La formation d'oxyde cuivreux est ainsi facilitée par la présence de vapeur d'eau dans l'air, qui agit comme un catalyseur. De plus, le courant permet de dissocier une molécule d'H<sub>2</sub>O en ions OH<sup>-</sup> et H<sup>+</sup>, augmentant ainsi la formation d'oxyde Cu<sub>2</sub>O à partir de cuivre et de dioxygène.

Qian.G et al. [95] sont arrivés aux mêmes conclusions en réalisant des tests en condition atmosphérique standard et sous vide. Le volume perdu est alors cinq fois plus important sous vide. Pour les mêmes raisons mentionnées ci-dessus, comme aucune couche protectrice d'oxyde ne peut se former, le taux d'usure et le coefficient de frottement augmentent. A la fin de leurs tests, les auteurs ont réalisé des mesures de rugosité sur les faces ayant frotté et ont montré que les faces testées sous vide sont deux fois plus rugueuses.

Il en résulte qu'en l'absence d'oxygène ou de vapeur d'eau, une adhésion importante et une abrasion intense se produisent [96].

## 1.5.2 Matériaux

En raison des nombreux processus de fabrication et des diverses compositions chimiques, une large palette de nuances de matériaux composant les bandes de captage est disponible sur le marché. De plus, il a été montré que les travaux portant sur ce sujet ont augmenté de 30 % durant les deux dernières années [97]. Dans les deux prochains paragraphes, l'intérêt sera porté sur :

- La température de frittage, c'est à dire la température de cuisson du graphite lors de la fabrication des bandes.
- Le taux d'imprégnation du carbone en cuivre.

Néanmoins d'autres caractéristiques pourraient être prises en considération, comme le type de métal utilisé pour imprégner, l'épaisseur des bandes, l'ajout de résine dans la composition, le traitement de surface, etc..

### Température de frittage

L'opération de frittage consiste à chauffer des poudres jusqu'à leur donner une rigidité et une cohésion suffisante sans atteindre la fusion complète. Dans des essais expérimentaux, deux nuances de graphite-cuivre enrichies en résine et cuites à des températures de frittage de 450 °C et 910 °C ont été comparées par Liu.R et al. [19]. En mesurant les propriétés électriques, mécaniques et structurelles des matériaux, les auteurs ont pu voir des différences : le matériau cuit à 450 °C, a une dureté et une résistivité plus importantes, mais est 120 % moins poreux. En effet, lors du frittage à 910 °C, une plus grande quantité de gaz se dégage du matériau, donnant ainsi lieu à une meilleure liaison cuivre-graphite.

Les deux nuances sont soumises à des tests d'usure à une température ambiante standard et dans une enceinte chauffée à 100 °C. Celle ayant cuit à 910 °C montre une meilleure résistance à l'abrasion grâce à ses liaisons cuivre-graphite renforcées. En revanche, dans un environnement à 100 °C, ses performances d'usure chutent à cause d'une usure par oxydation plus importante causée par sa porosité.

Processus de fabrication	Température de frittage [°C]	Métal [%]	Autre [%]	Dureté [HR10-392]	Résistivité [ $\mu\Omega\cdot\text{mm}$ ]	Porosité	Résistance flexion [Mpa]
Poudre sèche mixée Compression (150 Mpa) Frittage 6 heures	450	62	1.5 Sn 4 MoS2 4,5 Résine	64,3	901	8	23,8
	910			45,6	765	17,5	32,4

TABLEAU 1.5 – Principales caractéristiques des matériaux utilisés par les auteurs [19].

### Teneur en cuivre

Le principal métal utilisé pour enrichir le graphite est le cuivre. Pour mieux appréhender la relation entre l'usure et la teneur en cuivre, trois ensembles de résultats issus de trois auteurs différents seront synthétisés [11, 10, 12].

La figure 1.23 (a) regroupe les différentes mesures d'usure obtenues en fonction de la teneur en cuivre. A partir de ces résultats et des discussions des auteurs, la figure 1.23 (b) tente de donner une tendance d'usure en fonction de la teneur en cuivre. (1) En absence de cuivre, un matériau en graphite abouti à une résistance électrique de contact importante et par conséquent à un échauffement au niveau du contact [12]. (2) L'effet d'un faible taux de cuivre n'est pas encore clairement établi : de 0 % à 50 % de cuivre, Liu.X et al. [12] ont observé une augmentation du taux d'usure expliquée par un affaiblissement de la structure du matériau et de la liaison fragile entre le cuivre et le graphite. A l'opposé, Grandin.M et al [11] ont mis en évidence une baisse du taux d'usure entre un graphite imprégné à 6 % de cuivre et un autre imprégné à 26 %, sans cependant pouvoir expliquer ces résultats. Ces mêmes auteurs ont également montré qu'en augmentant la teneur en cuivre du matériau, la résistance électrique de contact chute rapidement (voir tableau 1.3 et figure 1.13). (3) Une matrice de cuivre commence à se former avec une teneur de cuivre plus importante, ce qui renforce le matériau et diminue le phénomène d'usure jusqu'à atteindre un *optimum* (4) où le taux d'usure est minimal. (5) En étant trop imprégné en cuivre, le matériau ne dépose plus assez de graphite sur la surface et voit ses propriétés auto-lubrifiantes diminuées. Le film protecteur d'oxyde de cuivre  $\text{Cu}_2\text{O}$  s'use alors plus facilement et la surface tend à être plus rugueuse, amenant à une perte d'efficacité et de stabilité du captage du courant mais aussi à une usure par oxydation plus importante [12]. Les résultats de Yang.Z et al. [10] et Moustafa.S.F et al. [98, 99] confirment ces tendances et montrent que le taux d'usure augmente lorsque la teneur en cuivre est proche de 100 %. (6) Enfin, pour un matériau en cuivre pur, le taux d'usure est maximal en raison de l'absence de lubrification du contact. En effet, Yang Z. a pu dans ce cas mesurer un coefficient de frottement très élevé et observer une surface de contact rugueuse. Le contact est alors de mauvaise qualité, avec une efficacité et une stabilité de captage du courant très médiocres.

La teneur en cuivre a donc une influence directe sur les performances du matériau. Deux études ont montré qu'un *optimum* où le taux d'usure était minimal pouvait être atteint à un certain taux d'imprégnation en cuivre. Cependant, certains points restent à éclaircir :

- Le point optimal varie d'un auteur à l'autre.
- L'effet et la réaction de l'oxyde cuivreux  $\text{Cu}_2\text{O}$  face au frottement et à l'usure ne sont pas encore clairement définis.
- Les auteurs n'obtiennent pas les mêmes tendances d'usure lorsque la teneur en cuivre est faible.

### 1.5.3 Force de contact

Dans un contact glissant **non-électrique**, il est prouvé que l'usure par abrasion et par adhésion ainsi que l'échauffement par friction, vont augmenter avec la force de contact [54]. En effet, Holm.R [67] a exprimé la perte de masse  $\Delta m$  [ $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$ ] par usure mécanique par l'expression suivante :

$$\Delta m = f \cdot F_N \cdot a \cdot v_l \quad (1.23)$$



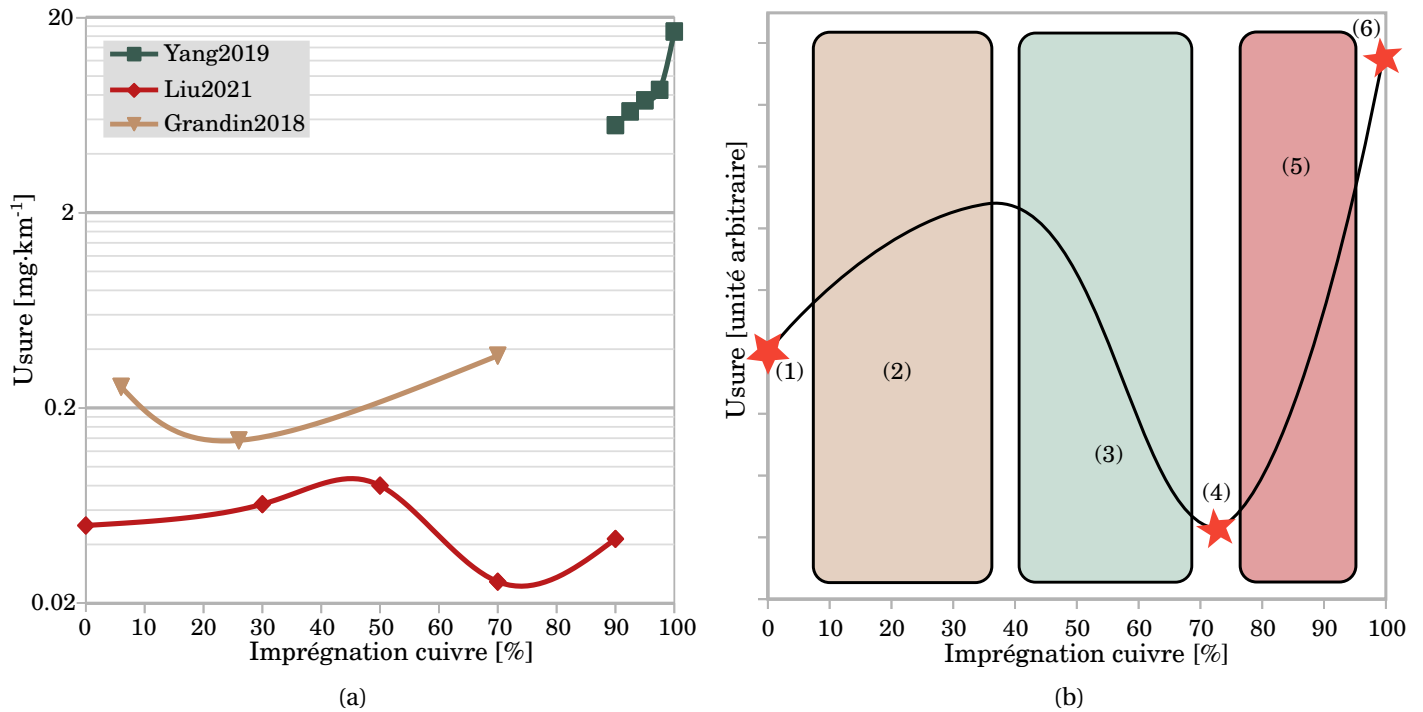


FIGURE 1.23 – (a) Mesures d'usure en fonction du taux d'imprégnation en cuivre dans des nuances de graphite. Résultats de trois auteurs [11, 10, 12]. (b) Tendence de l'usure en fonction de la teneur en cuivre dans le graphite. (1) Graphite pur à résistance électrique importante, (2) structure du matériau affaiblie par la présence d'un faible taux de cuivre, (3) apparition d'une matrice de cuivre, (4) point optimal, (5) sensibilité à l'oxydation car trop de cuivre, (6) perte des propriétés auto-lubrifiantes du graphite.

où  $f$  est un facteur d'usure [ $\text{s}^2\cdot\text{m}^{-4}$ ],  $F_N$  est la force de contact [N],  $a$  est la surface de contact apparente [ $\text{m}^2$ ] et  $v_l$  est la vitesse de glissement [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Cette équation montre que lorsque une étude expérimentale est réalisée, la force de contact devrait être donnée avec la surface de contact apparente, ce qui n'est pas le cas dans la majorité des articles. En effet, cela permet d'une part le calcul théorique de la perte de masse (si le facteur d'usure du matériau est connu) et d'autre part le calcul de la pression exercée entre les deux objets :

$$P = \frac{F_N}{a} \quad (1.24)$$

avec  $P$  la pression entre deux objets [Pa].

Dans un contact **électrique** glissant, la plupart des résultats montre qu'augmenter la force de contact  $F_n$  permet de diminuer l'usure [100, 88, 101, 102, 16, 4, 103], l'échauffement [88, 89, 100, 16] et le coefficient de friction [104, 105, 100, 102]. Comme il a déjà été indiqué dans le tableau 1.2, une force  $F_n$  suffisante est nécessaire pour avoir une bonne surface de contact réelle et une résistance électrique de contact minimale [4], ce qui permet de limiter l'échauffement par effet Joule. Wang, W et al. [106] ont pu observer cette tendance en calculant la perte de puissance au contact et en mesurant la résistance électrique de contact à différentes forces de contact.

Une force de contact élevée permet aussi de limiter la perte de contact et ainsi de diminuer la fréquence d'apparition des arcs électriques [92] et leur amplitude [88, 89], ce qui réduit l'usure liée aux arcs.

Pour mieux comprendre la relation entre usure totale, usure électrique et usure mécanique, Braunovic, M [107] décrit l'usure d'un balai en fonction de la pression par une courbe en U (voir figure 1.24 (a)). Dans un premier temps, à faible pression, l'usure électrique est prédominante tandis que l'usure mécanique est minime. L'usure totale diminue donc abruptement avec l'usure électrique lorsque la pression augmente, et ce jusqu'à atteindre un *optimum*. Au-delà de ce point, l'usure totale augmente. En effet, l'usure mécanique est proportionnelle à la pression exercée tandis que l'usure électrique décroît selon une exponentielle inversée et suit à un certain point une asymptote. Ce comportement, ainsi que l'*optimum*, dépend largement de la machine et du contact électrique étudiés. Des tendances similaires ont été

décrites par Poljanec.D et al. [104] pour trois matériaux différents (carbone dur, électrographite, graphite à polymère) et par Wang.Y.A et al. [108]. Cependant, Zhao.H et al. [109] ont obtenu des résultats expérimentaux opposés (voir figure 1.24 (b)) sans commenter la forme en U inversée de leurs courbes mais en mentionnant néanmoins l'existence d'un *optimum*. Il est important de préciser qu'il existe une force de contact optimale permettant de minimiser l'usure du fil de contact [4, 110]. Cette force n'étant pas la même que celle minimisant l'usure de la bande de captage, il est nécessaire de trouver un équilibre entre ces deux paramètres.

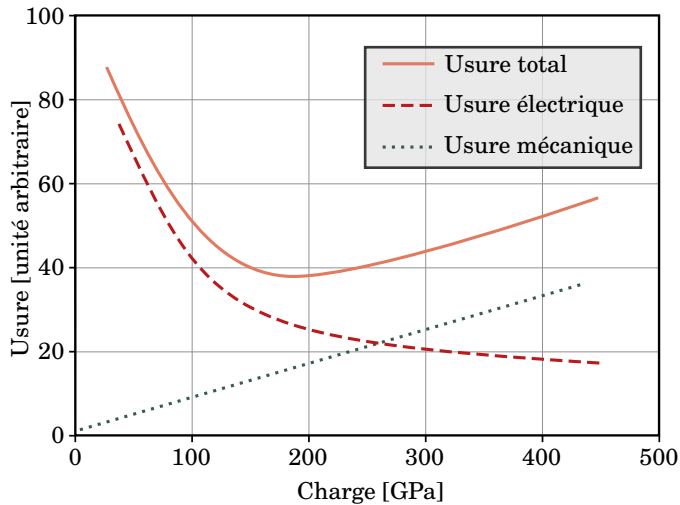


Figure 1.24(a) – Tendance typique de l'usure des balais en fonction de la pression dans une machine à balais tournants. Inspiré d'un livre de Braunovic.M [107].

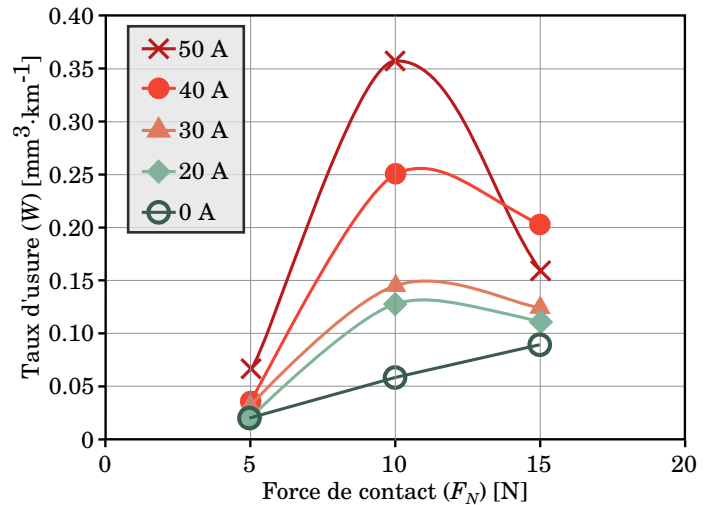


Figure 1.24(b) – Taux d'usure d'un pion en graphite en fonction de la force de contact, repris d'un article de Zhao.H et al. [109].

### Paramètres liés à la force de contact

- **Fluctuation périodique** : Zhang.Y et al. [8, 111] ont observé qu'une fluctuation périodique de la force influence la stabilité et l'efficacité du captage du courant, ainsi que le taux d'arcs électriques. Dans leurs travaux, les auteurs ont fait varier la force de contact sous forme sinusoïdale en modulant la fréquence  $f$  et l'amplitude  $B$ . Ils ont ainsi pu montrer que le taux d'arcs augmentait avec ces deux facteurs.
- **La raideur du contact** a été l'objet d'étude dans un article Ding.T et al. [112]. Leurs travaux ont montré que la raideur a un effet considérable sur le coefficient de frottement et sur le taux d'usure. Ce dernier augmente aux valeurs extrêmes de la raideur : légèrement pour un contact trop souple, brusquement quand il est trop dur, atteignant un maximum lorsqu'il devient complètement rigide. Aux valeurs extrêmes, les vibrations sont donc plus importantes ce qui provoque de nombreux arcs électriques.

Enfin, l'impact de la raideur est différent en fonction de la vitesse de glissement et du courant. Il a été montré qu'il existe une valeur optimale où le taux d'usure est minime.

- **Surface de contact** : en imposant une inclinaison entre la bande de captage et le fil, Chen.G et al. [88] changent la surface de contact apparente et par conséquent la pression entre le fil et la bande. Ainsi, une augmentation de la pression permet de diminuer le coefficient de frottement et la température de contact. Elle réduit aussi le taux d'usure et l'énergie d'arcs accumulée, particulièrement à faible force de contact (30 N).

### 1.5.4 Vitesse de glissement et de balayage

L'impact de la vitesse de glissement sur le comportement d'un contact électrique glissant dépend du système étudié. En effet, le contact d'un balai tournant et de la liaison pantographe caténaire ont des vitesses de glissement différentes (3 à 15 m·s<sup>-1</sup> dans le premier cas, 13 à 100 m·s<sup>-1</sup> dans le second) et des comportements mécaniques distincts. De plus, la convection est beaucoup plus importante dans une LPC que dans un balai tournant. Par conséquent, le comportement d'un contact électrique glissant en fonction de la vitesse sera seulement analysé dans le cas d'une liaison caténaire pantographe.

Pour ce type de liaison, la vitesse donne lieu à des arcs électriques plus fréquents [92] et plus violents [89]. Cela conduit à un échauffement [89] et à une élévation du taux d'usure [89, 92, 103, 71]. Dans une étude de Zhang.Y et al. [8], mentionnée dans la section précédente, l'augmentation du taux d'arcs avec la vitesse est aussi un état de fait. Cet effet est plus important avec la fluctuation de la force de contact, donnant lieu à des pertes de contacts plus accentuées et plus fréquentes.

Par ailleurs, il est important de prendre en compte la convection dans une LPC, puisque cela permet de limiter l'échauffement de la bande de captage. Ainsi, en faisant refroidir le contact à différentes valeurs, Ding.T et al [14] ont montré que le taux d'usure de la bande diminuait légèrement avec la température.

### Vitesse de balayage

Derosa.S et al [13] ont étudié l'influence de la vitesse de balayage  $v_b$  sur le taux d'usure ( $Tu$ ) d'une bande de captage (voir figure 1.25). Ils ont ainsi montré que lorsque cette vitesse est lente, une accumulation de chaleur menant à une usure plus importante est observée. Ainsi, une vitesse de glissement de  $330 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  au-dessus de laquelle le taux d'usure augmente significativement a été estimée.

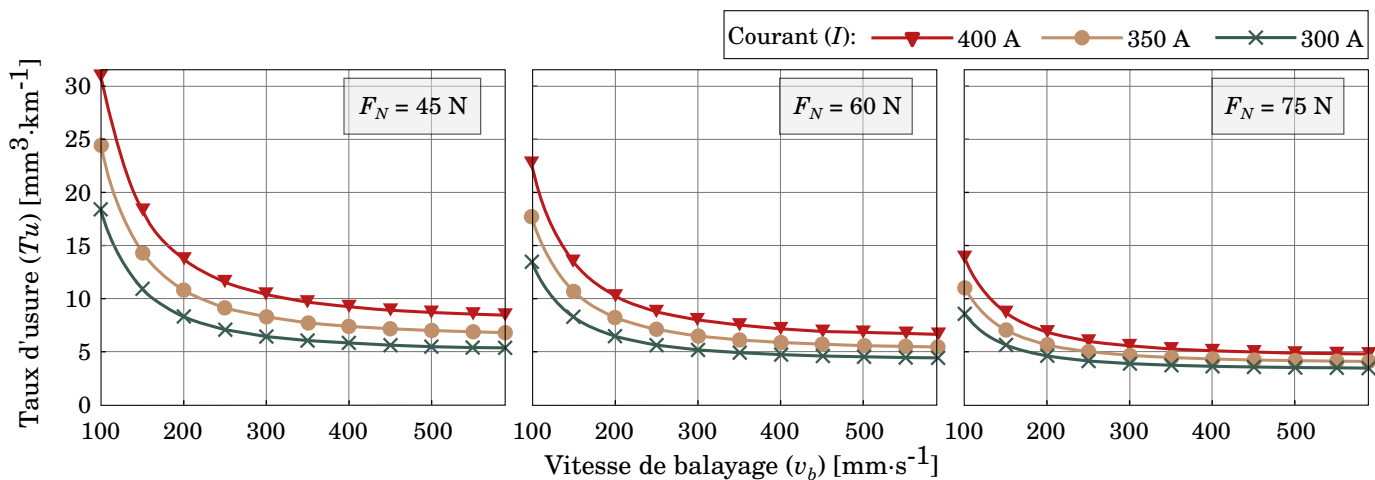


FIGURE 1.25 – Résultats de taux d'usure en fonction de la vitesse de balayage, obtenus via un modèle basé sur des résultats expérimentaux du CCTB. Courbes reprises d'un article de Derosa.S et al. [13].

## 1.5.5 Courant

Il est connu que le courant a pour effet d'augmenter la température de contact [88, 89, 100, 102, 104, 14, 113, 114], le coefficient de frottement [101, 108, 113, 115] et le taux d'usure [54, 113, 116, 117]. Ses effets peuvent être résumés en trois points :

1. **Catalyseur d'oxydation** de la surface de contact - impacte le coefficient de frottement, le taux d'usure et la température de contact.
2. **Effet Joule** - produit un échauffement au contact dû à la résistance électrique importante et au passage du courant.
3. **Étincelles et arcs électriques** - a lieu lors d'une perte de contact et augmente l'échauffement et le taux d'usure.

Plusieurs auteurs ont pu voir que ses trois effets n'ont pas les mêmes propriétés suivant le **sens de circulation du courant**. Enfin, le processus d'**usure** est directement ou indirectement impacté par les trois points listés ci-dessus.

### Catalyseur d'oxydation

Lorsqu'il y a circulation du courant, le coefficient de frottement chute quasiment instantanément par rapport à une configuration sans courant [102, 118]. En effet, le courant agit selon deux effets comme un catalyseur de l'oxydation [18, 119]. Premier effet, le courant apporte des électrons qui facilitent et accélèrent le processus d'oxydation. Second effet, la chaleur produite par effet Joule et les arcs électriques sont eux-mêmes catalyseur de l'oxydation (résultats mentionnés dans la section 1.5.1).

En chauffant l'échantillon pendant l'essai, Ding.T et al. [14] ont pu conclure que c'est l'échauffement lui-même plutôt que le courant qui fait chuter le coefficient de frottement (voir figure 1.26).

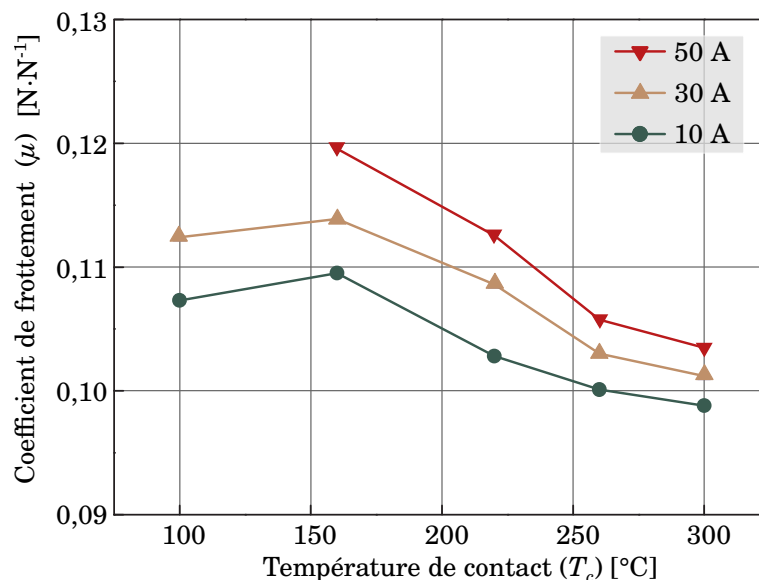


FIGURE 1.26 – Effets de la température et du courant sur le coefficient de frottement, inspiré d'un article de Ding.T et al. [14].

### Échauffement par effet Joule

La puissance dissipée par effet Joule est donnée par l'équation 1.8. Alors que le courant circulant dans un contact stable (i.e. sans perte de contact) augmente, l'effet Joule devient rapidement la source principale d'échauffement. Lorsque cet échauffement est trop important, le matériau peut se ramollir localement et se dégrader en débris, en écailles décollées ou par labourage [14].

### Arcs électriques et étincelles

Les arcs électriques et étincelles sont principalement observés dans un contact instable (induit par la raideur du

contact [112], la force de contact [88, 100, 102, 113] et la vitesse de glissement [8, 89, 92, 120]). L'impact d'un arc électrique peut être décrit sous différentes étapes ou scénarios suivants :

1. Un arc électrique provoque un échauffement très localisé et ponctuel pouvant atteindre plusieurs milliers de Kelvin (3500 - 4000 K [121]).
2. A très haute température, le matériau peut fondre ou se gazéifier : le cuivre imprégné fondu (1357 K) peut générer des ions de cuivre qui accélèrent le processus d'oxydation. De même, le cuivre peut se gazéifier (2848 K) tout comme le graphite (4073 K) [53].
3. Le cuivre fondu peut se solidifier directement entre les surfaces. Il y a alors de l'usure par adhésion ainsi que certains débris coincés qui peuvent labourer les surfaces et les rendre plus rugueuses.
4. Le cuivre liquéfié peut se solidifier à la surface pour former une couche métallique [122].
5. Après un arc électrique, il est possible d'observer des fissures à la surface. En cause, l'hétérogénéité de la conduction thermique du matériau et le gradient de température conduisent à une fatigue thermique entre le carbone et le cuivre. Les fissures s'étendent par pression et par fatigue pour finir par être gommées [122].

### Sens de circulation du courant

Cette propriété a une incidence sur le comportement du contact. En effet, Senouci.A et al. [56], appuyés par d'autres résultats de collègues [123, 124, 125], ont pu observer que le coefficient de friction et la résistance de contact ne sont pas les mêmes lorsque le pôle des électrodes est inversé. Par exemple, la résistance de contact double et le coefficient de frottement diminue légèrement lorsque le cuivre est la cathode (pôle négatif). Dans ce cas, la croissance de la couche d'oxyde de cuivre est inhibée et le troisième corps est un mélange de graphite et d'oxyde de cuivre. Par contre, quand le cuivre devient anode (pôle positif), le troisième corps est composé uniquement d'une fine couche d'oxyde de cuivre qui est moins lubrifiant. Ces résultats s'expliquent par la résistivité électrique du graphite ainsi que ses propriétés auto-lubrifiantes. D'autres auteurs sont arrivés plus récemment aux mêmes conclusions [93, 100].

Dans une liaison caténaire pantographe, Midya.S et al. [126, 127] ont également pu observer une incidence sur le processus de déroulement des arcs électriques en fonction du sens du courant. En indiquant que la racine de la cathode d'un arc a besoin de moins d'énergie pour se déplacer que celle de l'anode, un arc électrique peut se maintenir plus longtemps lorsque le pantographe est la cathode. En effet, la vitesse de balayage relativement lente permet à l'arc de garder sa racine plus longtemps. Lorsque c'est le fil de contact qui est la cathode, l'arc a plus de difficulté pour se maintenir et provoque une ouverture du circuit plus fréquente.

### Taux d'usure et courant

De multiples corrélations ont été établies entre la température de contact, les arcs électriques et l'usure d'une bande de captage. Chen.G.X et al. [89] ont clairement établi que le taux d'usure est corrélé linéairement avec la température de contact (voir figure 1.27 (a)). Sur le même banc d'essai (décrit dans la sous-section 1.4.2) Mei.G [128] a observé une relation linéaire entre la température de contact et les décharges d'arcs (voir figure 1.27 (b)) mais aussi entre l'usure et les décharges d'arcs. Cette dernière tendance est aussi confirmée par Kubo.S et Kato.K [129] et Kubota.Y [115]. Enfin, en échauffant directement l'échantillon à différentes températures, Ding.T et al. [14] ont fait des tests avec et sans courant. Comme décrit sur la figure 1.28 (a) ils ont mis en évidence que l'usure augmente avec la température, modérément dans un contact sans courant et plus abruptement lorsqu'il y a circulation de courant. Pour une température de contact constante et pour différents courants, la figure 1.28 (b) montre que la température a un impact superficiel sur l'usure par rapport au courant. Par conséquent l'usure est un processus qui découle de l'oxydation et de l'échauffement par effet Joule. Cependant, lorsque le courant augmente, la principale cause d'usure est induite par les arcs électriques [92, 114, 130, 131, 132].

La figure 1.29 présente une vue d'ensemble des processus d'usure causés par le courant. Comme expliqué dans cette section, celui-ci a trois effets qui ont des impacts directs et indirects sur le taux d'usure. Premièrement, **les arcs électriques** apparaissent lorsque le courant est élevé, usant directement les matériaux. Deuxièmement, à cause de la chaleur générée par **effet Joule** et de la circulation d'électrons, le courant devient un **catalyseur de l'oxydation**. D'une situation à une autre, ce catalyseur peut avoir une répercussion positive ou bien négative sur l'usure puisque l'oxydation modifie les propriétés du troisième corps et le coefficient de frottement. Dans le cas d'une liaison caténaire pantographe, compte tenu de ces effets, la circulation d'un courant augmentera toujours le taux d'usure des matériaux.

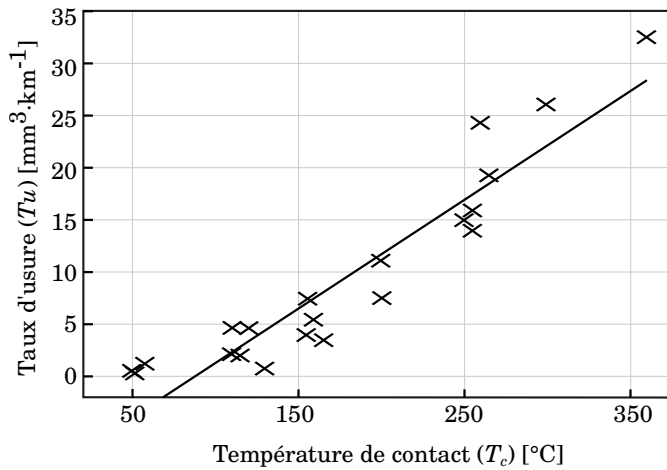


Figure 1.27(a) – Corrélation entre la température de contact et le taux d'usure, reprise d'un article de Chen.G.X [89].

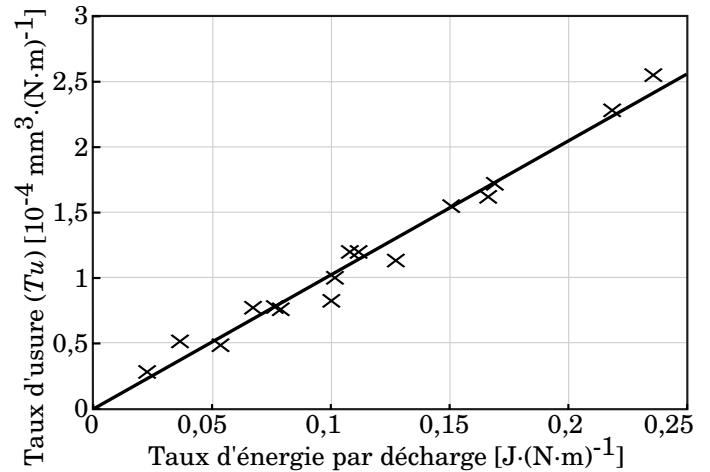


Figure 1.27(b) – Taux d'usure en fonction du taux d'énergie dissipé par arcs électriques, extrait de l'article de Mei.G [128].

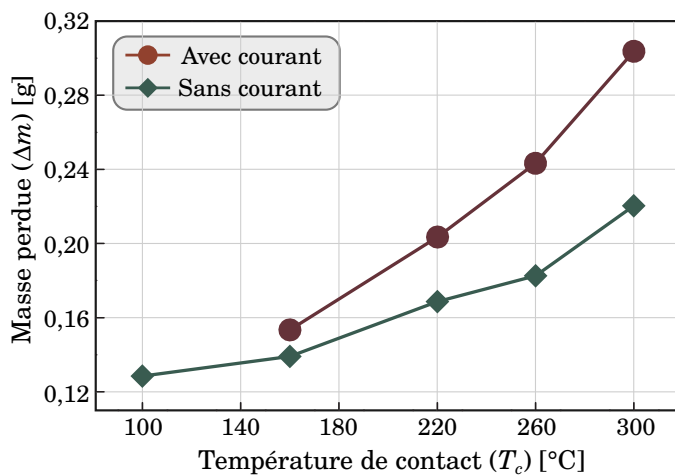


Figure 1.28(a) – Masse de carbone perdue à différentes températures de contact, pour des tests réalisés avec et sans courant. Inspiré d'un article de Ding.T et al. [14].

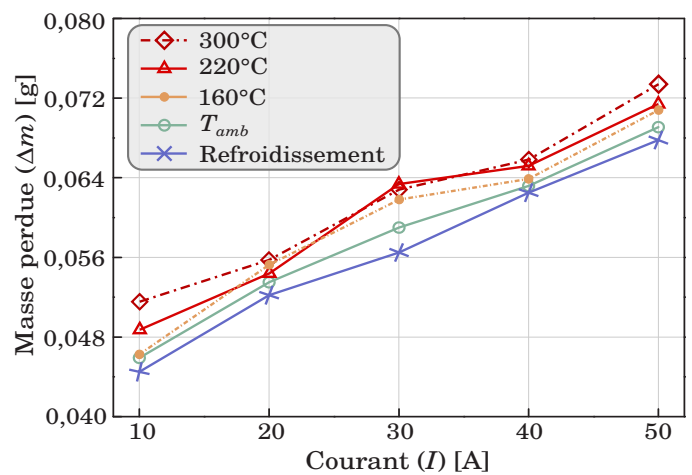


Figure 1.28(b) – Masse de carbone perdue en fonction du courant et pour une surface du disque fixée à différentes températures. Inspiré d'un article de Ding.T et al. [14].

## 1.6 Conclusion

Le début de ce chapitre décrit succinctement les liaisons électriques et plus spécifiquement les contacts électriques glissants, la liaison pantographe-caténaire et son utilisation en France et dans le monde. Il a été montré que les problématiques rencontrées par la SNCF sur ce système sont encore nombreuses. Entre autre, l'opacité du comportement des bandes de captage face à l'usure et à l'échauffement rend la maintenance plus onéreuse et les incidents plus fréquents. Par conséquent, l'un des enjeux de cette thèse est de mieux étudier le comportement des différentes nuances via des essais expérimentaux.

L'objet de cette thèse étant l'usure et l'échauffement du contact de la LPC, la physique de celui-là a été dans un deuxième temps détaillée. Pour cela, la physique du contact a été décomposée par disciplines concernées. Il a pu ainsi être mis en évidence que de nombreux phénomènes interagissent et sont intriqués. Cela complexifie largement l'étude systémique sous forme analytique ou sous forme de modèle.

De nombreux travaux ont néanmoins tenté d'analyser ou de modéliser une LPC. Précédemment à cette thèse, N.Delcey a notamment créé un modèle électro-thermique en s'appuyant sur des résultats expérimentaux réalisés à l'Université Polimi de Milan en collaboration avec l'institut FEMTO-ST. Afin d'alimenter et d'affiner ce modèle, il a mis en lumière la nécessité de créer un banc modulable et flexible permettant de faire des essais rapides, tout en étant représentatif de la LPC.

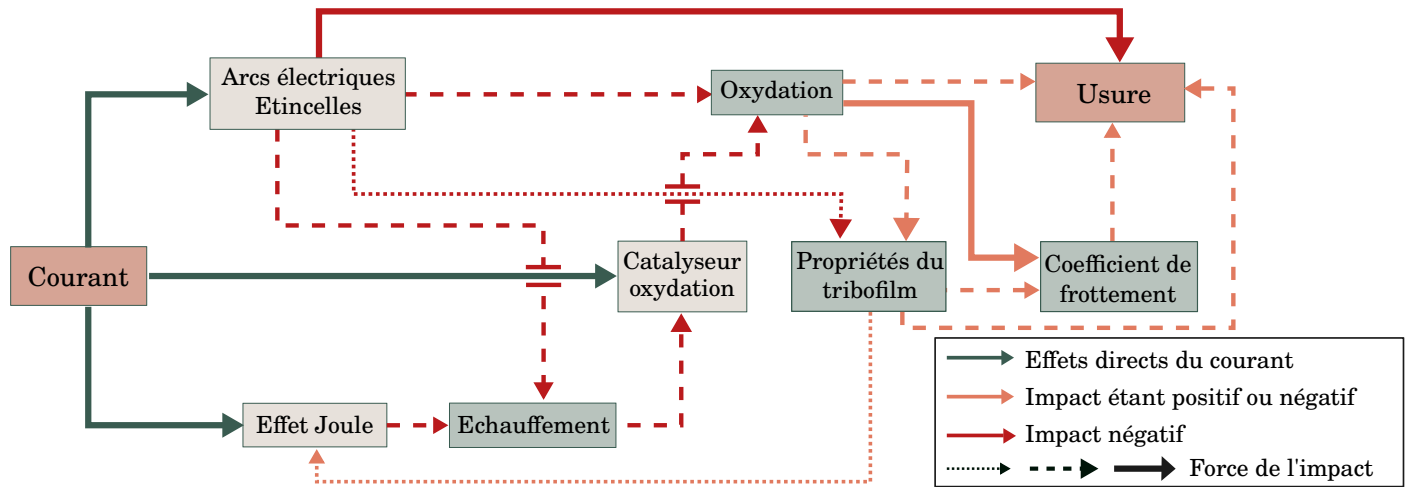


FIGURE 1.29 – Impacts du courant sur un contact électrique glissant.

Plusieurs bancs faisant l'étude de ce contact existent déjà dans le monde en ayant chacun leurs spécificités et leur façon de représenter une LPC. Ils sont en général constitués d'une bande de captage en appui contre un disque ou un fil. Au contact de ces deux entités, un mouvement linéaire et un mouvement de balayage sont mis en œuvre tandis qu'un courant alternatif ou continu circule dans le contact. Les auteurs s'appuient pour la plupart sur des observations de surfaces type SEM, EDXS, photo ou profilo-3D. Certains font également des mesures de l'usure, majoritairement en relevant la masse ou le volume perdu avant et après essai. D'autres encore mesurent le coefficient de frottement grâce à la force normale et la force tangentielle, ou la température par capteur infra-rouge ou thermocouple. Les résultats expérimentaux inter-bancs sont difficiles à comparer. D'une part car les configurations sont différentes et certaines informations manquent (nature du matériau, surface de contact, distance parcourue, etc.), D'autre part, parce que les différentes structures ne permettent pas d'avoir une reproductibilité, et cela même en testant une nuance avec des entrées fixées aux mêmes valeurs. Enfin, les auteurs mesurent l'usure soit en masse perdue, soit en volume perdu, sans donner les données permettant de normaliser les résultats.

La figure 1.30 fait un bilan des différents éléments composant les entrées de la liaison pantographe caténaire. Ce bilan se base sur une étude bibliographique faite dans la dernière section de ce chapitre et met en relief l'état d'avancement des travaux portant sur ce sujet. Tout d'abord, les conditions environnementales jouent un rôle significatif dans l'usure, en ayant une incidence importante sur le processus d'oxydation du cuivre. D'une part la température en est catalyseur, d'autre part la présence d'oxygène et d'humidité est nécessaire pour sa formation. Ensuite, les rôles de la force de contact et de la vitesse sont plus difficiles à synthétiser. Pour ces deux entrées, la structure des bancs et la géométrie du contact ont une incidence majeure sur les résultats. Il est alors plus difficile de dégager des tendances similaires et de donner des explications claires. Cependant, il est avéré qu'une vitesse de glissement importante mène à des vibrations tandis qu'une force de contact trop faible conduit à de multiples décollements. Dans ces deux cas, la stabilité du contact sera moins bonne et des arcs électriques vont apparaître et dégrader les matériaux. Au sein de ces deux entrées, il a été montré que la vitesse de balayage, la fluctuation de la force de contact, la raideur du contact ainsi que sa surface jouent un rôle dans l'usure des matériaux et leur échauffement.

1. La vitesse de balayage intervient dans l'accumulation de chaleur par effet Joule : une faible vitesse de balayage mène à un échauffement plus important et donc à plus d'usure.
2. L'usure par arcs électriques augmente lorsque la force de contact fluctue, et ce d'autant plus avec des amplitudes importantes.
3. Un point optimal de raideur permettant de limiter l'usure est observé. Celle-ci devient très importante lorsque le contact devient trop souple ou trop rigide.
4. Une surface de contact moins importante augmente la pression entre la bande et le fil et permet de réduire le taux d'arcs et l'usure.

Cependant, pour chaque point abordé ci-dessus, une seule étude a pu être trouvée, ce qui ne permet pas de croiser différents résultats et analyses. Enfin, l'entrée la plus délicate et la moins bien explorée est le type de matériaux utilisée

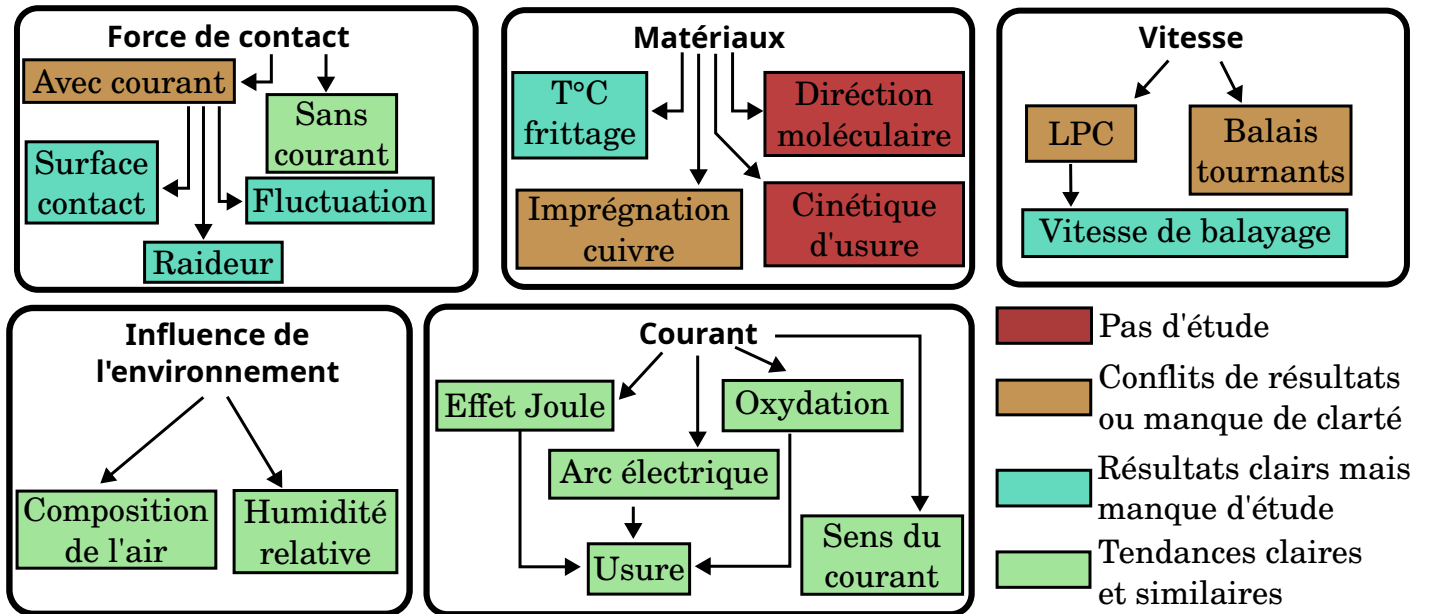


FIGURE 1.30 – Bilan des nombreuses composantes, ainsi que leurs niveaux d'avancement, consacrés à l'étude de l'usure et de l'échauffement des bandes de captage dans une liaison pantographe-caténaire.

dans le bande. En effet, les propriétés de ceux-ci sont souvent opaques et manquent de précisions. Il a été néanmoins observé que chaque nuance a un comportement différent face à l'usure par frottement, par oxydation ou par arcs électriques. Par exemple, la température de frittage a une incidence sur la résistance à l'abrasion et la résistance à l'oxydation. Quant au taux d'imprégnation en cuivre, un taux optimal permet de minimiser l'usure du matériau, mais celui-ci n'est pas spécifié. Comme il est rare de trouver la même nuance d'une étude à l'autre, lorsque c'est le cas, cela se fait sur le même banc, les tendances décrites ci-dessus perdent alors en crédibilité. De plus, de multiples sujets n'ont pas encore été abordés comme le comportement en fonction de la direction moléculaire du graphite, l'impact des différents processus de fabrication ou la cinétique d'usure. Dans ce dernier cas, les auteurs mesurent souvent une usure totale via la masse ou le volume perdu au cours d'un essai. En définissant un taux d'usure en  $\text{mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  ou  $\text{g}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ , ils font l'hypothèse que l'usure est linéaire, ce qui n'est pas démontré.

Dans ce contexte, le banc d'essai présenté dans ce mémoire a donc été construit pour trois raisons principales :

1. Permettre à la SNCF de mieux choisir ses bandes de captage et d'anticiper leur usure et échauffement.
2. Améliorer le modèle MONICA, notamment en étant plus précis sur les propriétés du contact et des nuances.
3. Mieux comprendre les contacts électriques glissants et éclaircir certains points encore méconnus de la communauté scientifique.





---

---

## CHAPITRE 2

---

### DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS

**A**FIN de répondre aux problématiques évoquées en conclusion du chapitre précédent, les travaux de cette thèse reposent principalement sur la conception et l'utilisation d'un banc d'essais. Son premier objectif est d'étudier expérimentalement un contact cuivre-carbone en étant représentatif d'une liaison caténaire pantographe. Le banc a ainsi pour vocations :

1. D'étudier des paramètres du contact tels que la résistance électrique ou le frottement.
2. De mieux comprendre l'évolution dynamique de la température de contact et de la température interne des matériaux.
3. D'enrichir et d'affiner le modèle thermo-électrique MONICA évoqué dans le chapitre précédent.
4. D'obtenir une loi d'usure prenant en compte les principales propriétés d'une liaison caténaire pantographe.
5. De tester des nuances de bandes de captage utilisées par la SNCF.

Le banc d'essais a été développé et conçu dans les locaux du département ENERGIE de l'institut FEMTO-ST. Pendant son année de post-doctorat, N. Delcey a commencé par dessiner le banc et mettre en place sa structure, ses actionneurs, son armoire d'instrumentation ainsi que celle de puissance et une partie de ses capteurs. L'évolution chronologique du banc d'essais et les problématiques techniques et scientifiques rencontrées seront développées dans le chapitre suivant.

Ce chapitre a pour but de présenter et de détailler le banc d'essais tel qu'il est à la fin de cette thèse. Le fonctionnement de la machine, dont la figure 2.1 donne un synoptique basique, repose sur un disque en cuivre mis en rotation sur lequel un pion, échantillon de bande de captage, est mis en appui. Ce dernier suit un mouvement de balayage normal à la vitesse du disque. Enfin, un courant circule dans le disque pour être récupéré par l'échantillon.

Comme schématisé sur la figure 2.2, le banc se veut représentatif d'une LPC en reprenant un certain nombre de paramètres composant ce système :

1. **[Vitesse linéaire]** - Le déplacement de la bande de captage par rapport au fil de contact est reproduit par la rotation du disque en cuivre. La vitesse linéaire de déplacement entre le pion et le disque est maintenue constante par la variation de la vitesse de rotation du disque en fonction de la position du pion. La vitesse maximale atteinte pour nos études est de  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  alors que celles atteintes par un TER et un TGV sont de  $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et  $320 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .
2. **[Vitesse et amplitude de balayage]** - De la même manière qu'un déplacement transversal est observé entre le fil de contact et une bande de captage, un vérin met en mouvement transversal le pion par rapport au disque en cuivre. La vitesse de balayage varie entre  $8$  et  $16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  et le pion se déplace sur une amplitude de  $200 \text{ mm}$ .

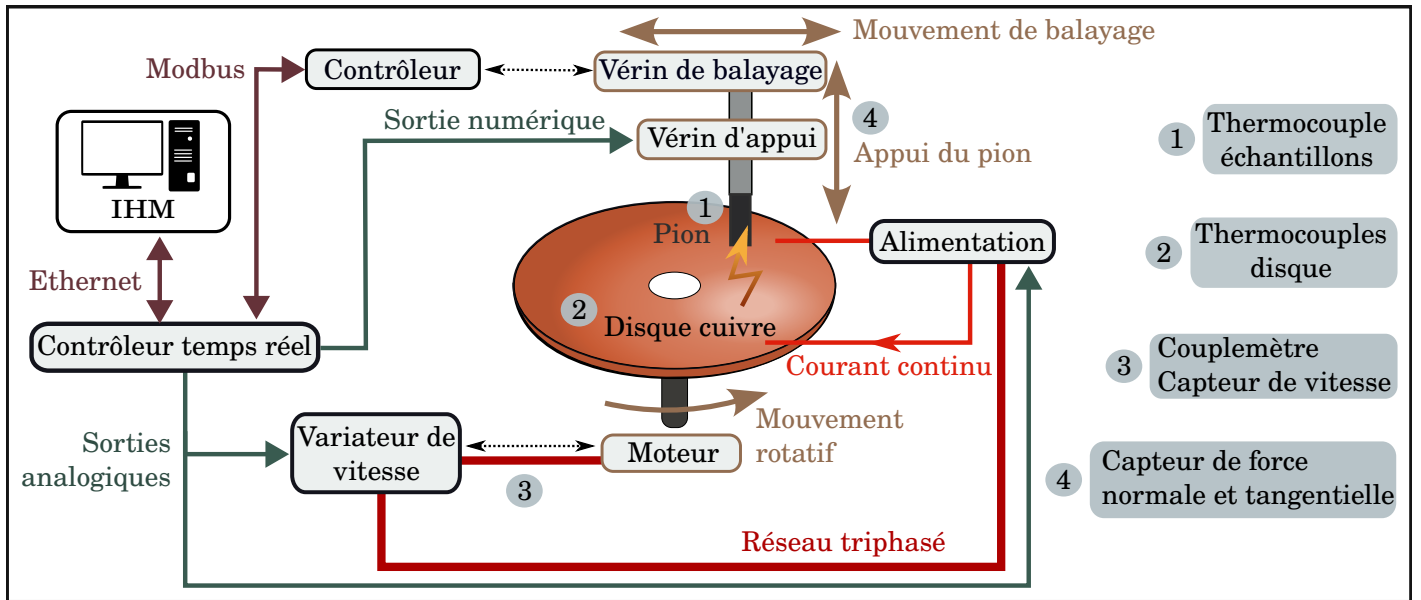


FIGURE 2.1 – Synoptique du banc d'essais.

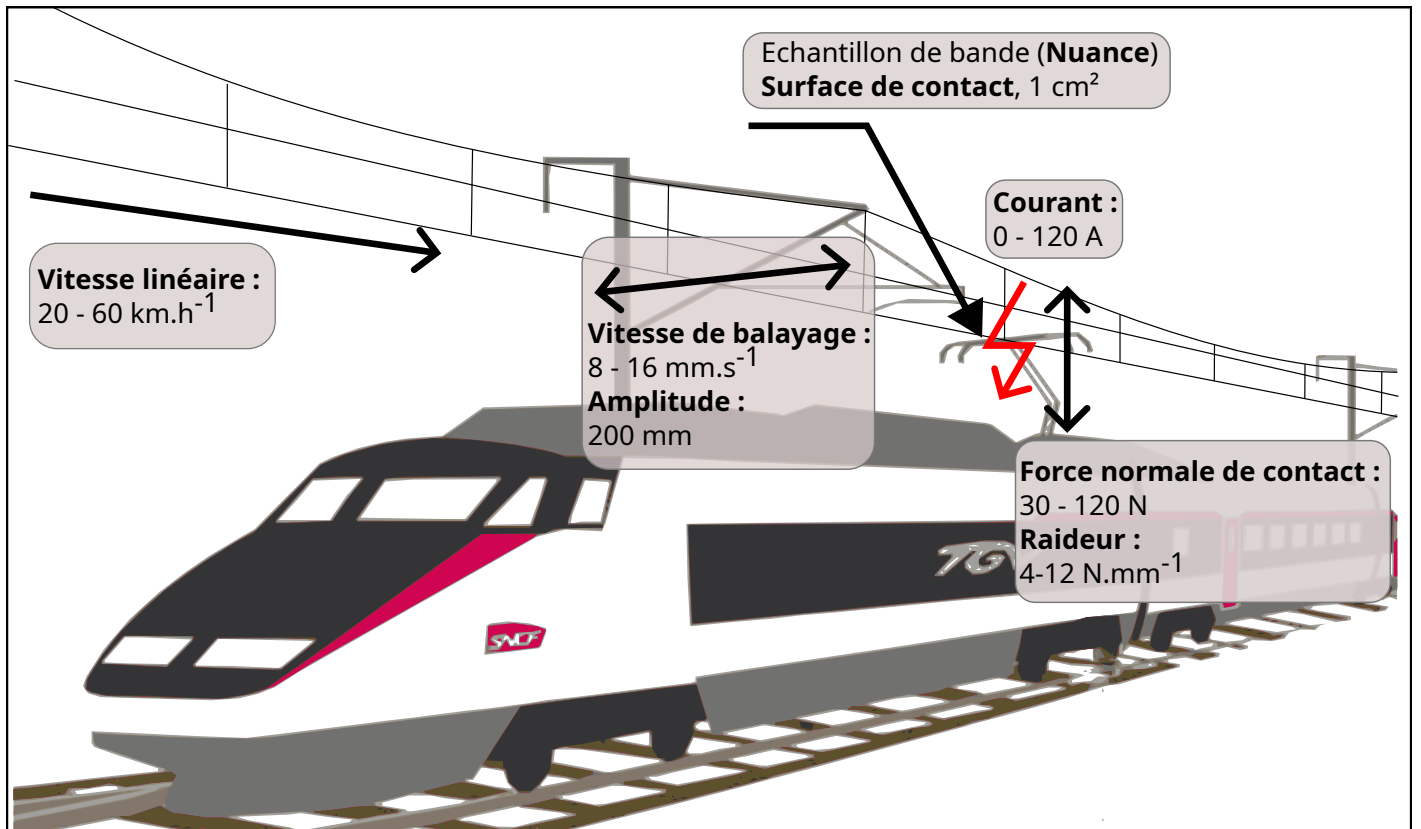


FIGURE 2.2 – Schéma d'un train et de sa caténaire présentant les paramètres du contact pantographe caténaire reproduits sur le banc d'essais.

3. **[Force normale de contact]** - Un second vérin met en appui le pion sur le disque en cuivre avec une force normale fixée entre 30 et 120 N.
4. **[Raideur de contact]** - Un ressort est inséré entre le vérin d'appui et le pion pour que le contact ne soit pas rigide et ait une raideur d'une valeur de 4, 8 ou 12 N.mm<sup>-1</sup>.
5. **[Courant injecté]** - Une alimentation injecte un courant continu dans le disque en cuivre afin d'être récupéré par le pion. Le courant maximal disponible pendant les tests est de 120 A.
6. **[Nuance]** - Le pion frottant sur le disque en cuivre étant un échantillon de bande de captage, sa nuance se définit par la composition (type de métal et pourcentage d'imprégnation, résine) et le processus de fabrication (température de frittage, pression d'extrusion, temps de mélange) de cette même bande.
7. **[Aire de contact]** - Comme montré dans les travaux de T. Bausseron [21], l'aire de contact apparente entre une bande de captage et le fil de contact a été estimée à 1 cm<sup>2</sup>. A l'instar d'une LPC, la longueur du contact (parallèle au fil) est plus importante que sa largeur (normale au fil), la géométrie du contact pion/disque est un rectangle de 20 mm dans le sens du mouvement linéaire et 5 mm dans le sens transversal.

Ainsi, comme le montre la figure 2.3, le banc d'essais constitue un système à sept entrées. Parmi elles, la raideur, la nuance et la surface de contact sont fixées en début d'essai et ne peuvent pas fluctuer pendant cet essai. Sept sorties sont ensuite mesurées :

1. Le coefficient de frottement, étant le rapport des mesures de force transversale  $F_t$  sur la force normale  $F_N$ .
2. L'échauffement au contact, obtenu à partir des thermocouples insérés dans le pion pendant un essai.
3. L'usure, déterminée par la perte de masse ou par la perte de volume du pion à travers un essai.
4. L'état de surface, caractérisé chimiquement ou par topographie de la surface du pion après essai.
5. Les courbes de tension et de courant, mesurées aux bornes du dispositif au cours d'un essai.
6. La résistance de contact pion/disque.
7. Les vibrations, mesurées pendant un essai par un accéléromètre placé au-dessus du pion.

La machine est dans un premier temps décrite à travers ses actionneurs puis dans un deuxième temps à travers son instrumentation. Enfin, le système de contrôle-commande est succinctement décrit.

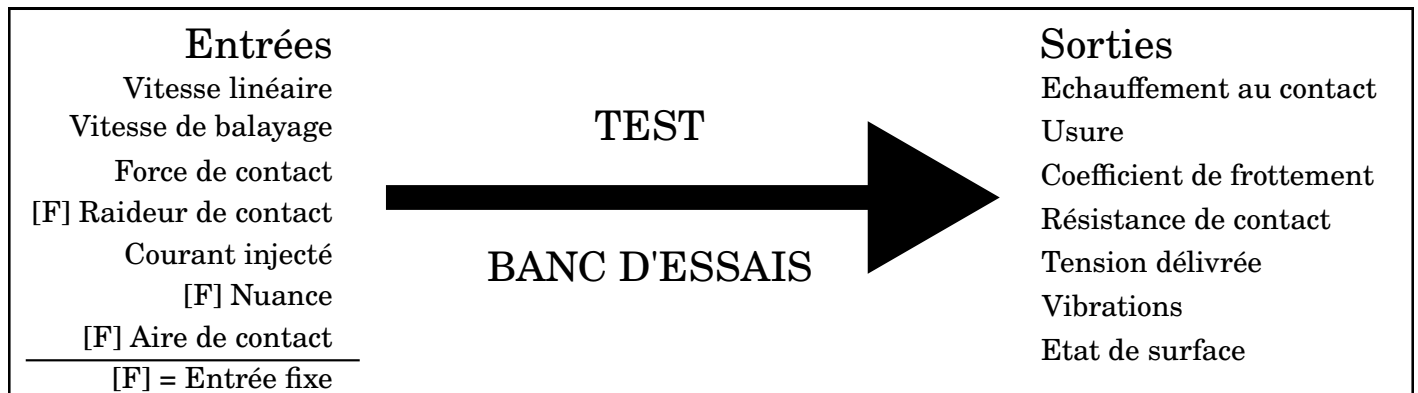


FIGURE 2.3 – Entrées et sorties du banc d'essais.

## 2.1 Actionneurs

### 2.1.1 Moteur

Cet actionneur a pour vocation de mettre en rotation le disque en cuivre jouant le rôle de caténaire. Ce dernier a un rayon interne de 125 mm et un rayon externe de 500 mm pour une épaisseur de 12 mm. En comptant les pièces mécaniques qui y sont fixées, l'assemblage mis en rotation a une masse d'environ 110 kg. Comme schématisé sur la figure 2.4, une transmission mécanique et un moteur électrique permettent de mettre en rotation le disque en cuivre.

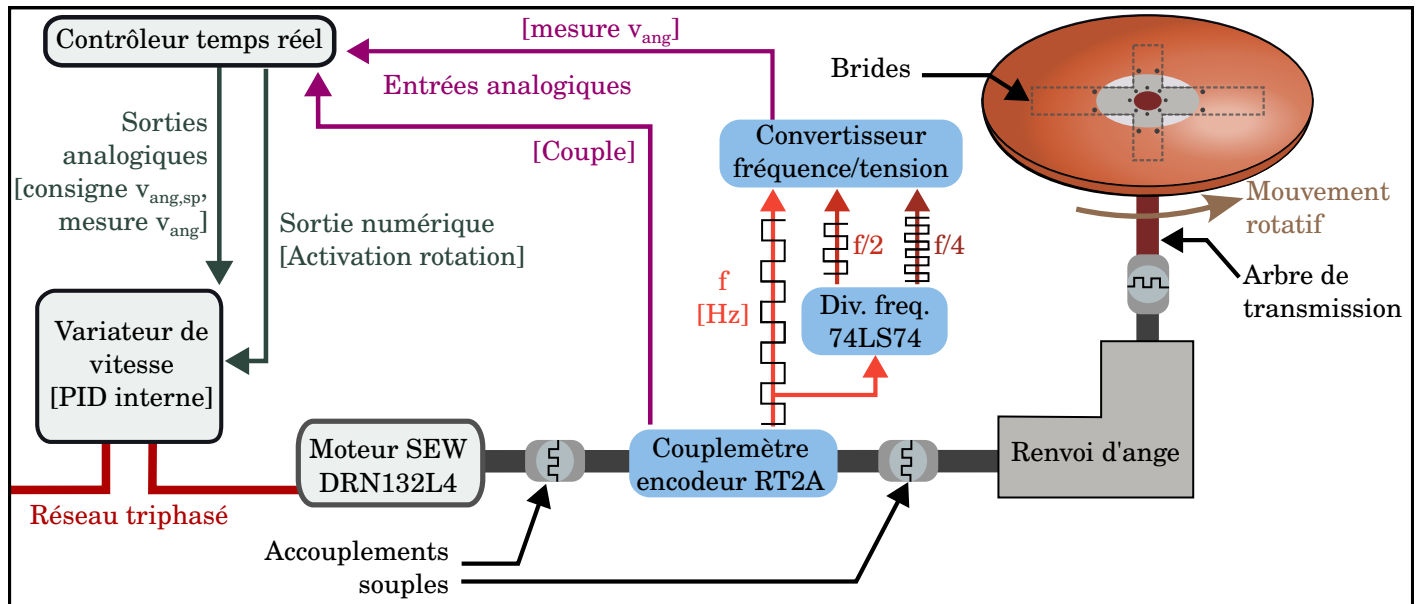


FIGURE 2.4 – Schéma du système gérant la rotation du disque en cuivre.

#### Transmission

Un moteur électrique asynchrone triphasé de la marque SEW permet la rotation du disque en cuivre. Sa vitesse de rotation nominale est de  $1500 \text{ tr.min}^{-1}$  pour une puissance de 9,1 kW. Du moteur jusqu'au disque, plusieurs éléments sont présents le long de la chaîne de transmission : un couplemètre/encodeur RT2A, un renvoi d'angle de  $90^\circ$  de rapport 1 : 1 et un arbre de transmission. Ce dernier est vissé à une bride, elle-même vissée au disque en cuivre afin de l'entraîner. Les différents éléments de la chaîne de transmission sont reliés par des accouplements souples.

#### Contrôle

Un variateur de vitesse ATV320 (Schneider) permet de piloter le moteur. Il intègre notamment un système de commande de type PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) qui permet d'asservir le moteur et de maintenir la vitesse du disque au plus proche de la consigne envoyée. Pour cela, le variateur reçoit deux entrées analogiques du contrôleur temps réel : une première branchée sur la borne AI1 pour la mesure de vitesse de rotation  $v_{rot}$  et une deuxième sur la borne AI2. pour la consigne  $v_{rot,sp}$ . Une entrée numérique câblée sur la borne DI2 permet d'engager la rotation du disque dans le sens voulu. Enfin un bouton d'arrêt d'urgence est branché entre les bornes STO et P24, permettant de mettre manuellement le moteur en roue libre. AI1, AI2 et DI1 sont des voies différentielles avec la borne COM.

### 2.1.2 Vérin d'appui

Comme schématisé sur la figure 2.5, un vérin linéaire de la marque SKF (CAHB-10 series) est utilisé pour mettre en appui le pion contre le disque en cuivre. Sa force d'appui peut aller jusqu'à 500 N, la vitesse de montée et de descente varie entre 13 et  $16 \text{ mm.s}^{-1}$ . Entre lui et le pion se trouvent deux éléments :

1. L'extrémité du vérin est encastrée dans une chambre qui accueille un ressort de compression et dans laquelle vient coulisser un arbre.

2. Une cellule de pesage traction-compression en acier, de la marque AEP, se trouve entre le pion et l'arbre. Elle permet de mesurer la force normale  $F_N$ , avec une étendue de mesure (EM) allant jusqu'à 250 N.

Le vérin seul, complètement rentré, a une longueur de 170 mm et les éléments entre le pion et le bout du vérin mis bout à bout ont une longueur de 360 mm. Il y a une course de 50 mm pour que le pion soit en contact avec le disque depuis sa position initiale et la longueur du bras de mise en pression. La distance qui est mesurée depuis le sommet du vérin jusqu'à la surface du pion qui frotte a une valeur totale de 580 mm.

Pour contrôler cet ensemble, un contrôleur temps réel pilote le vérin linéaire en tout ou rien par le biais d'une sortie numérique. La force normale est établie grâce à la mesure du capteur de force faite par voie analogique.

L'ensemble de mise en appui est maintenu perpendiculaire au plan de la surface du disque en ayant deux points d'ancrage : l'un au niveau du capteur de force, vissé sur le chariot du vérin de translation et le deuxième au dessus du vérin linéaire, fixé sur un rail de guidage (description plus détaillée sur la figure 2.6).

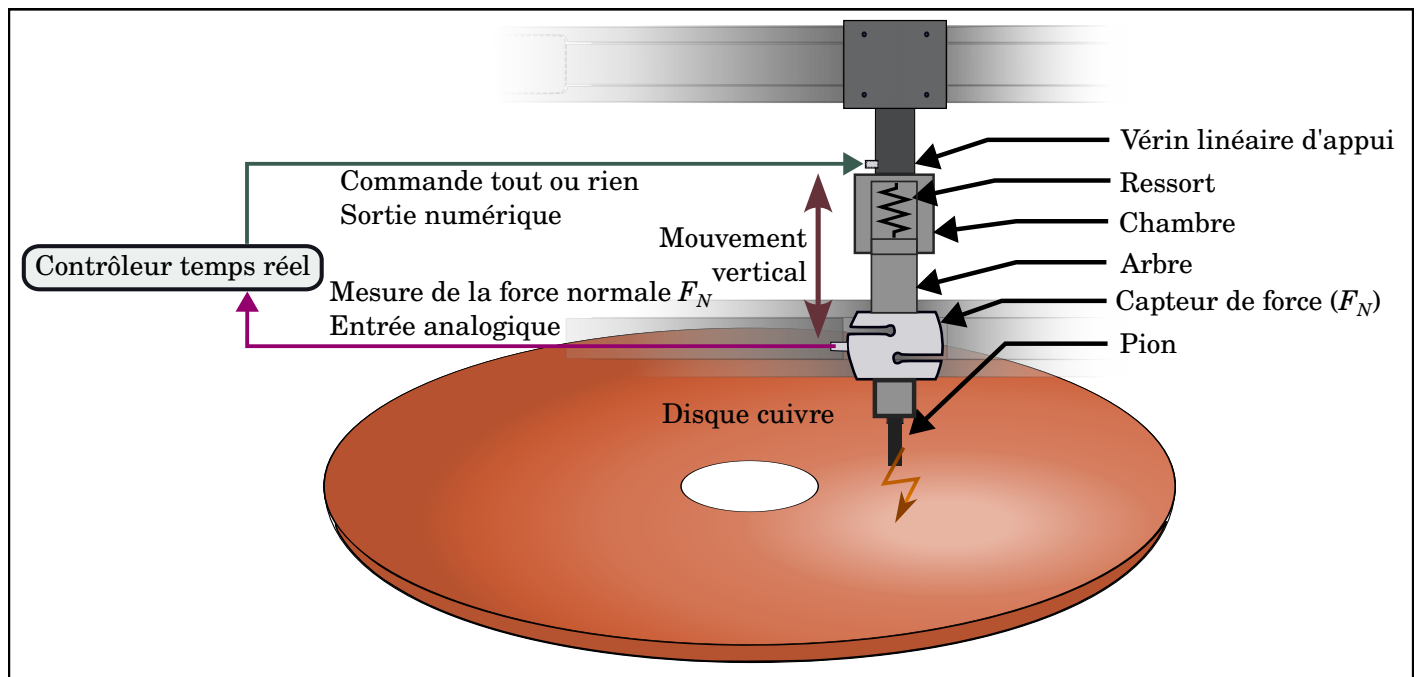


FIGURE 2.5 – Schéma du système permettant la mise en pression du pion sur le cuivre.

### 2.1.3 Vérin de translation

Cet ensemble est schématisé dans la figure 2.6. On abordera d'abord la géométrie pour décrire ensuite brièvement le pilotage de cet actionneur.

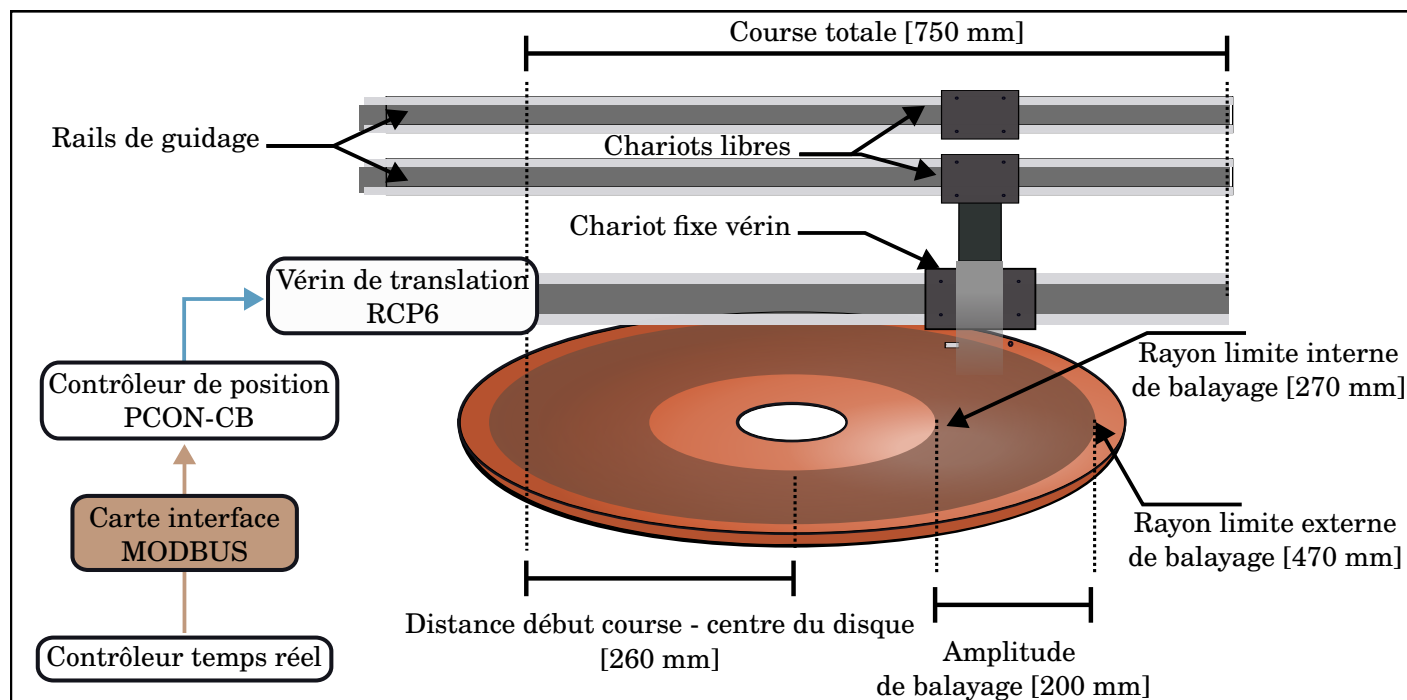


FIGURE 2.6 – Schéma du système gérant le balayage du pion sur le cuivre.

#### Géométrie

Comme décrit précédemment, l'ensemble de mise en appui du pion est fixé au chariot d'un rail de guidage et au chariot du vérin de translation (marque IAI, modèle RCP6). Ce dernier permet à cet ensemble de suivre un mouvement de balayage. Tandis que le chariot peut se déplacer à une vitesse de  $1200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , le rail de guidage de cet actionneur permet d'avoir une course totale de 750 mm.

Le pion se déplace sur une amplitude de 200 mm. Du point de vue du disque, il se déplace du rayon limite interne de 270 mm jusqu'au rayon externe de 470 mm. Puisqu'il y a une distance de 260 mm entre le point d'origine du vérin de translation et le centre du disque, le pion se déplace de 530 mm à 730 mm sur la course du vérin.

#### Contrôle

Cet actionneur est piloté par un contrôleur de position PCON-CB, qui communique avec un contrôleur temps réel via le protocole de communication MODBUS RTU (*Remote Terminal Unit*). Ce protocole fonctionne sur le principe d'un maître et de plusieurs esclaves en se basant sur un système de registres de commandes et de données. La vitesse de transmission est fixée à  $38400 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Une alimentation de la marque Ametek, modèle Sorensen SG Series, est mise en place afin de faire circuler le courant au contact du pion. Elle peut débiter à ces bornes un courant continu de 300 A avec une tension de 100 V, soit une puissance de sortie maximale de 30 kW. Comme le montre la figure 2.7, le circuit est connecté de la manière suivante : d'une part, deux pièces de bande de captage, reliées à la borne positive de l'alimentation sont mises en appui contre le bord externe de la face inférieure du disque. Deux points d'entrée permettent notamment d'assurer la circulation du courant si le contact est brièvement rompu sur l'une d'entre elles. Elles sont équidistantes du contact pion/disque pour équilibrer la répartition de courant entre les deux points, et sont maintenues en appui contre le disque par des ressorts de compression. La somme de leur surface de contact  $S_B$  par rapport à la surface de contact pion-disque  $S_c$  est telle que  $S_B \gg S_c$ , de façon à voir une densité de puissance plus faible. D'autre part, une pince de cuivre connectée à la borne négative de l'alimentation entoure et serre le pion en appui contre le disque en cuivre. La

boucle de circulation du courant est ainsi fermée et se dirige du cuivre vers le pion comme cela est le cas dans un LPC. Pour éviter toute fuite de courant, l'ensemble décrit ci-dessus est isolé électriquement du reste du banc à l'aide de vernis et de feuilles isolantes.

### 2.1.4 Alimentation

L'alimentation est pilotée à l'aide de deux entrées analogiques [0-10 V] émises à partir d'un contrôleur temps réel. L'une envoie la consigne de courant et l'autre la consigne de tension, avec pour lois de commande :

$$I_{sp} = 330 \cdot V_{I_{sp}} \quad \text{et} \quad U_{sp} = 100 \cdot V_{U_{sp}} \quad (2.1)$$

avec  $I_{sp}$  le courant de consigne [A],  $U_{sp}$  la tension de consigne et  $V_{I_{sp}}$  et  $V_{U_{sp}}$  les tensions de consignes de courant et de tension envoyées à l'alimentation [mV].

Afin de mieux comprendre cette notion de tension maximale, voici un exemple : on donne à l'alimentation une consigne de courant de 120 A et une consigne de tension de 100 V. Or, d'après la loi d'Ohm, et pour une résistance de contact de 40 mΩ (valeur typique observée), l'alimentation ne pourra pas imposer une tension supérieure à 4,8 V. Elle aura cependant comme consigne d'augmenter la tension jusqu'à 100 V si la résistance de contact le permet (dans le cas de perte de contact et d'apparition d'arcs électriques par exemple).

L'alimentation est dotée également d'un système de mesures de courant et de tension. Ces deux grandeurs sont disponibles avec des sorties analogiques et sont lues par le contrôleur temps réel.

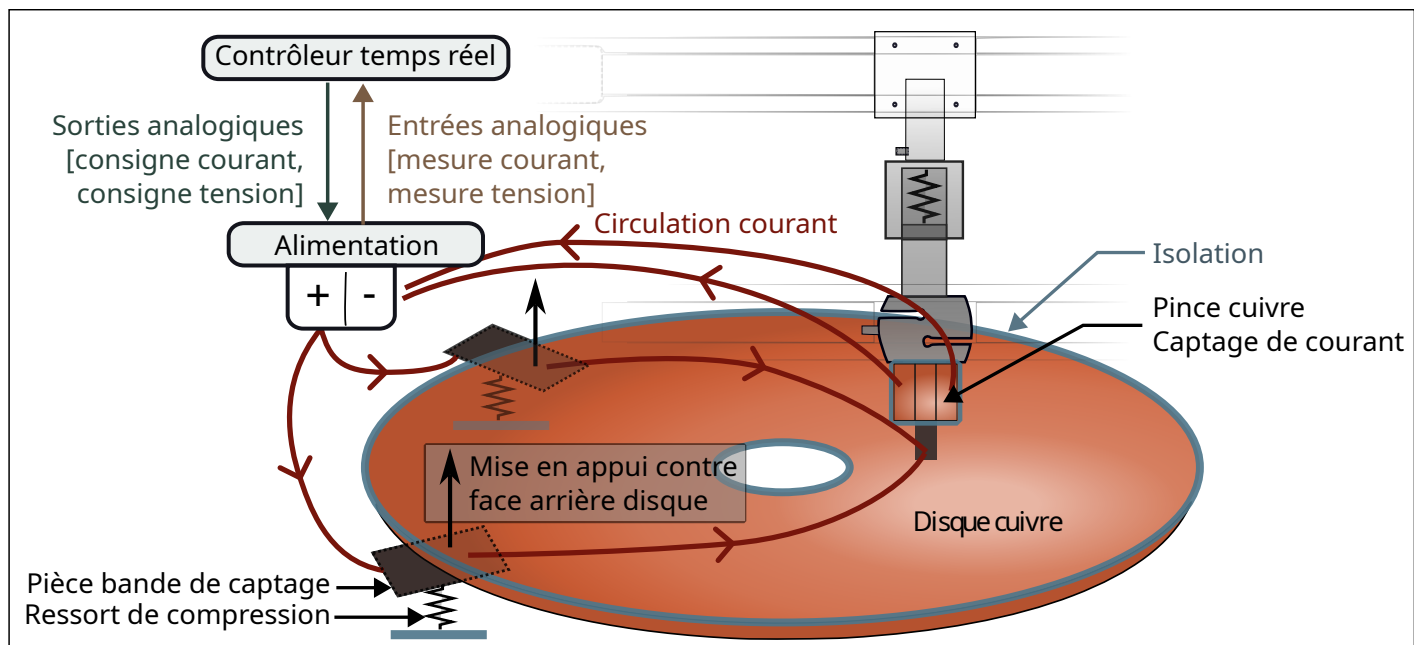


FIGURE 2.7 – Schéma du système gérant l'alimentation du pion.



## 2.2 Instrumentation

Dans cette section, les différents capteurs mis en œuvre dans le banc sont présentés ainsi que leurs caractéristiques (étendue de mesure (EM), sensibilité, etc.). Les méthodes de caractérisation sont ensuite expliquées et les incertitudes à prendre en compte présentées.

### 2.2.1 Couple et vitesse de rotation

#### Couplemètre

Comme indiqué sur la figure 2.4, un couplemètre permet de mesurer le couple imposé par le moteur à sa sortie. Ses caractéristiques principales sont données dans le tableau 2.1.

La pente théorique de la réponse du couplemètre se calcule de la façon suivante :

$$S_{th} = S \cdot \frac{V_{cc}}{EM_{service}} \quad (2.2)$$

avec  $S_{th}$  la sensibilité théorique [ $mV \cdot (N \cdot m)^{-1}$ ],  $S$  la sensibilité donnée par le constructeur [ $mV \cdot V^{-1}$ ],  $V_{cc}$  la tension d'alimentation [V] et  $EM_{service}$  l'étendue de mesure [ $N \cdot m$ ].

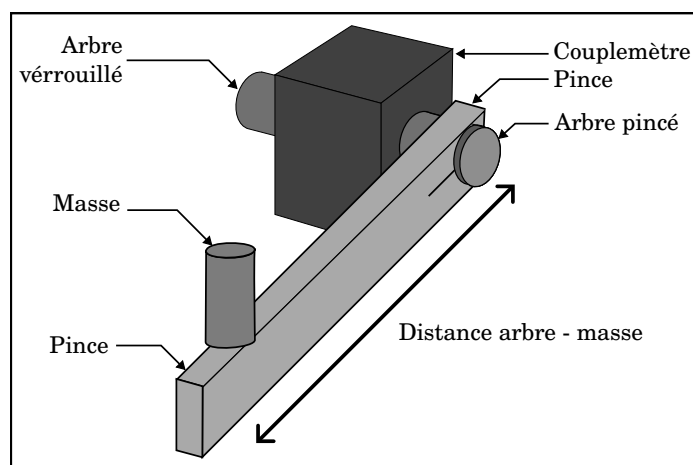


Figure 2.8(a) – Schéma de méthode de caractérisation du couplemètre RT2A.

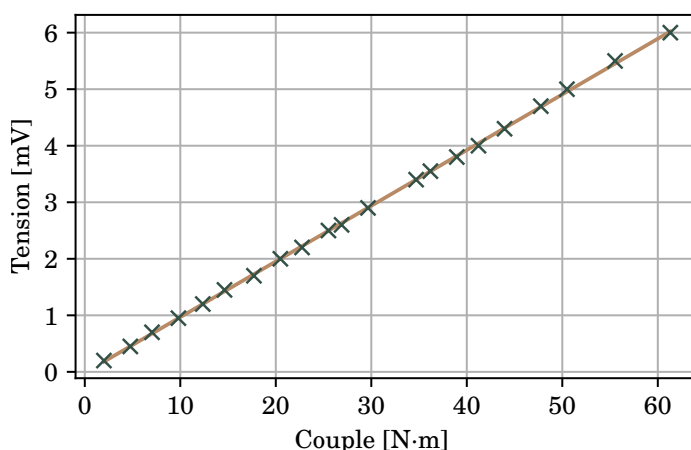


Figure 2.8(b) – Caractérisation du couplemètre.

Tension alim. (continue) $V_{CC}$	Sensibilité $S$	$EM_{nominale}$	$EM_{service}$	$EM_{maximale}$	$EM_{destructive}$	Linéarité et hystérésis	$V_{rot,max}$
5 V	$2mV \cdot V^{-1}$	70 N·m	100 N·m	150 N·m	300 N·m	$\leq \pm 0,2 \%$	$4000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$

TABLEAU 2.1 – Caractéristiques du couplemètre RT2.

Cette pente théorique est donc de  $0,1 mV \cdot (N \cdot m)^{-1}$  ; une vérification est néanmoins faite pour s'assurer de cette valeur. La méthode de caractérisation du couplemètre est schématisée par la figure 2.8 (a). Tandis que le premier arbre est verrouillé, une pince est fixée sur le deuxième. Différentes masses sont posées à une certaine distance du centre du couplemètre, permettant de connaître le couple appliqué sur l'arbre par la formule suivante :

$$C = F_m \cdot d \quad (2.3)$$

avec  $C$  le couple [ $N \cdot m$ ],  $F_m$  la force appliquée par la masse [N] et  $d$  la distance entre la masse et l'arbre [m]. Les mesures à différents couples, tracées sur la figure 2.8 (b), sont faites sur la chaîne d'acquisition et par le contrôleur temps réel utilisé dans l'ensemble du manuscrit. Cette caractérisation donne les valeurs de pente et de décalage qui permettent de calculer le couple :

$$C = \frac{V_C - 0,017}{0,098} \quad (2.4)$$

avec  $V_C$  la tension analogique d'entrée [mV].

### Caractéristiques de l'encodeur

Le système précédent (RT2A) intègre également un encodeur mettant à disposition quatre sorties pour mesurer la vitesse de rotation du disque, chacune étant décalée d'un quart de période. 880 impulsions sont produites par tour, ce qui permet de calculer la vitesse de rotation par la relation suivante :

$$v_{\text{rot}} = 60 \cdot \frac{f}{880} \quad (2.5)$$

avec  $v_{\text{rot}}$  la vitesse de rotation [ $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ ] et  $f$  la fréquence [Hz] mesurée sur l'une des sorties de l'encodeur.

### Mesure de la fréquence et étendue de mesure

La vitesse linéaire maximale atteinte dans cette étude est de  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  et la vitesse de rotation en fonction de la position du pion est obtenue par l'équation suivante :

$$v_{\text{rot}} = \frac{v_l \cdot 10^6}{60 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_p} \quad (2.6)$$

avec  $v_l$  la vitesse linéaire de consigne [ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ] et  $r_p$  le rayon du disque sur lequel le pion est positionné [mm]. Par cette dernière équation, le tableau 2.2 donne les vitesses de rotation et les fréquences en sortie de l'encodeur à mesurer ; le pion balayant du rayon limite interne  $r_{\text{int}}$  de 270 mm jusqu'au rayon limite externe  $r_{\text{ext}}$  de 470 mm. Les deux vitesses fréquemment utilisées pour les essais sont de 30 et  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . A une vitesse maximale théorique de  $150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , le moteur atteint sa vitesse de rotation maximale.

Vitesse linéaire [ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ]	$v_{\text{rot}} (r_{\text{int}})$ [ $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$v_{\text{rot}} (r_{\text{ext}})$ [ $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$f (r_{\text{int}})$ [kHz]	$f (r_{\text{ext}})$ [kHz]
30	294	169	4,3	2,5
60	590	338	8,7	5,0
150	1474	847	21,7	12,4

TABLEAU 2.2 – Bornes de  $v_{\text{rot}}$  du disque et des fréquences émises sur une sortie de l'encodeur à différentes vitesses.

Afin de mesurer la fréquence, un convertisseur fréquence-tension d'une étendue de 10 kHz avec une sortie analogique 0-10 V a été installé. Ce composant analogique présente l'avantage de déporter la mesure de fréquence et permet d'alléger le programme d'acquisition en ne prélevant que la tension continue proportionnelle à la fréquence. Comme le montre le tableau 2.2, il est nécessaire d'augmenter l'EM du convertisseur fréquence/tension pour mesurer à haute vitesse les pulsations en sortie de l'encodeur. Pour cela, une carte intégrant un diviseur de fréquence a été intégrée. Elle permet notamment à l'utilisateur de choisir parmi trois sorties : une restituant le signal original, une avec un signal à fréquence divisée par deux et une dernière avec une fréquence divisée par quatre. Il est ainsi possible de mesurer une fréquence allant jusqu'à 40 kHz. Ce montage, présenté dans la figure 2.4, a été caractérisé en utilisant un tachymètre DT-2236 d'une précision annoncée de 0,05 %. Pour cela, le disque a été mis en rotation à différentes vitesses constantes et une régression linéaire a été faite entre la mesure de tension en sortie du convertisseur fréquence/tension et la mesure faite par le tachymètre. L'équation de calibrage est alors la suivante :

$$v_{\text{rot}} = 71,65 \cdot V_{v_{\text{rot}}} - 0,33 \quad (2.7)$$

avec  $V_{v_{\text{rot}}}$  la tension analogique permettant de mesurer la vitesse de rotation [mV].

## 2.2.2 Force normale et force transversale

Deux cellules de pesée TS25, dont les caractéristiques sont affichées dans le tableau 2.3, sont utilisées pour mesurer la force normale  $F_N$  et la force transversale  $F_T$  au contact. Le coefficient de frottement est ensuite calculé par

l'équation 1.4. Comme le montre la figure 2.9, la cellule utilisée pour mesurer  $F_N$  est positionnée entre l'ensemble pince/pion et la chambre intégrant le ressort de compression. La deuxième cellule est placée à l'arrière de la pince puis fixée à un chariot libre positionné sur une glissière verticale. Les défauts de planéité du disque sont ainsi encaissés seulement par le ressort situé entre le vérin de mise en pression et la pince.

Tension alim.	Sensibilité	EM <sub>nominale</sub>	Charge de service	Charge max permmissible	Charge de rupture	Erreur combinée	Répétabilité
12 V <sub>cc</sub>	2mV·V <sup>-1</sup>	245 N	294 N	367 N	735 N	≤ ±0,023 %	≤ ±0,015 %

TABLEAU 2.3 – Caractéristiques des cellules de pesage utilisées pour mesurer  $F_N$  et  $F_T$ .

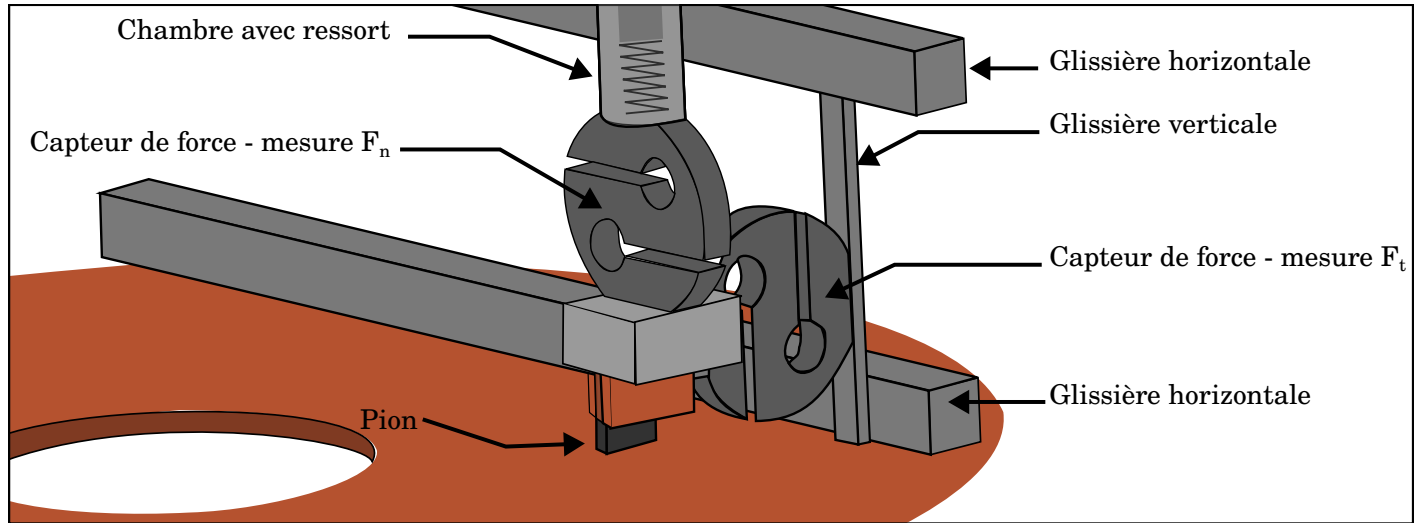


FIGURE 2.9 – Schéma de positionnement des cellules de pesage mesurant les forces normale  $F_N$  et transversale  $F_T$ .

Pour être caractérisées, les deux cellules de compression sont comprimées par différents objets de masses connues. Les valeurs obtenues à l'aide du contrôleur temps réel sur la chaîne d'acquisition sont montrées dans les figures 2.10 (a) et 2.10 (b). Le constructeur indiquant une sensibilité de 2 mV·V<sup>-1</sup> et les cellules étant alimentées en 12 V, on calcule, en reprenant l'équation 2.2, une sensibilité théorique de 0,098 mV·N<sup>-1</sup>. Les résultats des régressions linéaires donnent pour la mesure  $F_N$  et celle de  $F_T$  les équations respectives :

$$F_N = \frac{V_{F_N} + 2}{0,098} \quad \text{et} \quad F_T = \frac{V_{F_T} + 0,1}{0,098} \quad (2.8)$$

avec  $V_{F_N}$  et  $V_{F_T}$  les tensions analogiques en sorties des deux cellules [mV]. Alors que l'étendue de mesure pour la caractérisation atteint 102 N, la consigne maximale définie est de 120 N. En prenant en compte la non-planéité du disque, la force de contact maximale peut atteindre 160 N. En effet, il a été mesuré au palpeur que le disque a une non-planéité de ±3 mm (avec une raideur de 12 N·mm<sup>-1</sup>). Les cellules de compression sont aussi connues pour avoir une réponse linéaire, le constructeur donne une tolérance sur la sensibilité inférieure à ± 0,1 % de l'EM. On peut donc considérer qu'une correction peut être faite sur les mesures par régression linéaire.

### 2.2.3 Vibrations

Comme le présente la figure 2.11 (a), un accéléromètre ADXL335 offrant trois sorties analogiques est utilisé pour mesurer les vibrations du pion selon les 3 axes x, y et z. Il est fixé sur la pièce assemblant le capteur de force normale et l'ensemble pince/pion. Afin de le caractériser, ses sorties analogiques ont été branchées sur la chaîne d'acquisition et le contrôleur temps réel. L'accéléromètre a ensuite été fixé dans des positions afin que les axes subissent la gravité terrestre de différentes manières (-1, 0 et 1 g). La figure 2.11 (b) en présente les résultats. Enfin, compte tenu des

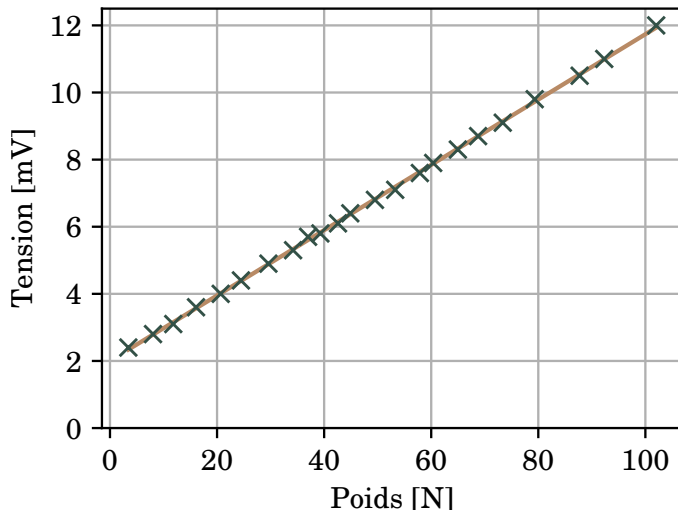


Figure 2.10(a) – Caractérisation du capteur de force utilisé pour mesurer la force normale  $F_N$ .

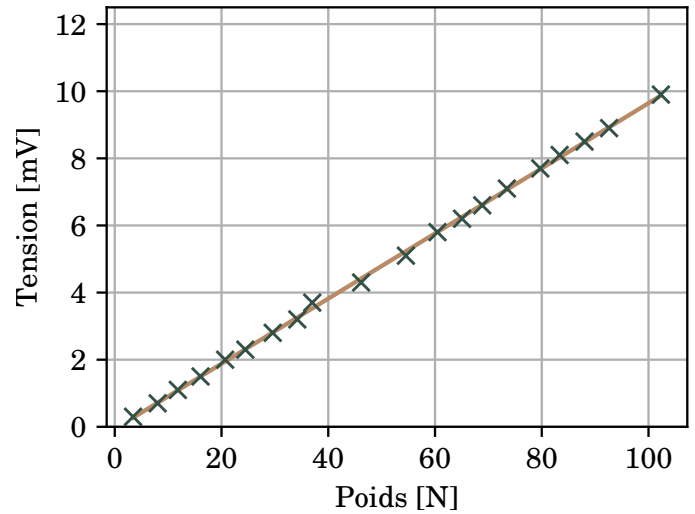


Figure 2.10(b) – Caractérisation du capteur de force utilisé pour mesurer la force tangentielle  $F_T$ .

réponses linéaires, les équations de calibration pour chaque axe ont été déduites :

$$a_x = -0,26 \cdot V_{a_x} - 1,0 \quad (2.9)$$

$$a_y = -0,29 \cdot V_{a_y} - 0,90 \quad (2.10)$$

$$a_z = -0,27 \cdot V_{a_z} - 0,85 \quad (2.11)$$

avec  $a_x$ ,  $a_y$  et  $a_z$  les vibrations en  $x$ ,  $y$  et  $z$  [g] et  $V_{a_x}$ ,  $V_{a_y}$  et  $V_{a_z}$  les tensions analogiques fournies de l'accéléromètre pour les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$  [V].

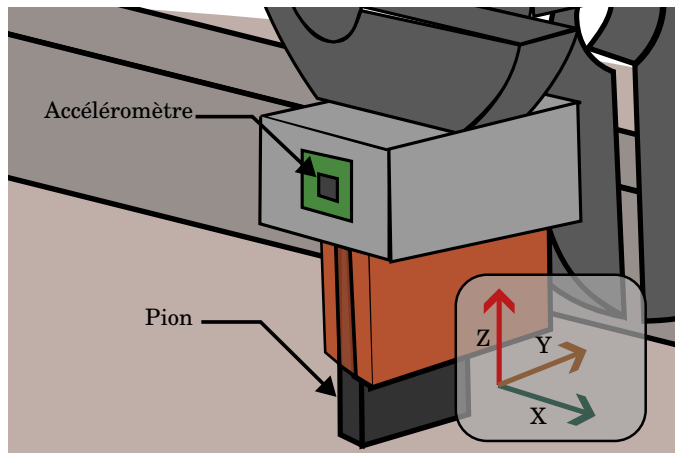


Figure 2.11(a) – Positionnement de l'accéléromètre sur la pince du pion.

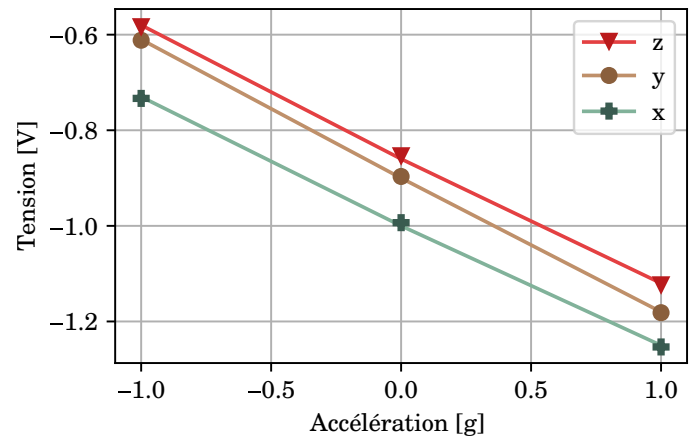


Figure 2.11(b) – Caractérisation de l'accéléromètre ADXL335.

## 2.2.4 Position transversale du pion

La mesure de position du pion sur le disque se fait par le biais d'un capteur de positionnement intégré dans le vérin de balayage. Elle est réalisée par le contrôleur de position PCON pilotant le vérin par protocole MODBUS. Le temps d'échange avec le PCON étant lent (une dizaine de commandes par seconde), la position est vérifiée une fois que le chariot du vérin atteint une extrémité de sa course, c'est à dire au moment où il change de sens. Entre les deux extrémités, la position est calculée suivant la vitesse et l'amplitude de balayage imposées. Pour ce faire, la formule suivante est utilisée :

$$r_p = r_{p-1} + v_b \cdot t \cdot s \quad (2.12)$$

où  $r_p$  est la position du pion [mm],  $r_{p-1}$  la dernière position vérifiée du pion (normalement égale à  $r_{\text{int}}$  ou  $r_{\text{ext}}$ ) [mm],  $v_b$  la vitesse de balayage [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $t$  le temps de trajet depuis la dernière demande de position [s] et  $s$  le sens de balayage (égal à 1 si  $r_{p-1}=r_{\text{int}}$  ou -1 si  $r_{p-1}=r_{\text{ext}}$ ).

## 2.2.5 Courant et tension

Comme décrit précédemment dans la figure 2.7, l'alimentation embarque un système de mesures de la tension et du courant à ses bornes. Ces mesures sont lues par sorties analogiques 0-10 V sur demande du contrôleur temps réel. La sensibilité pour le courant est de  $330 \text{ mV}\cdot\text{A}^{-1}$  et celle pour la tension de  $100 \text{ mV}\cdot\text{V}^{-1}$ . Les équations pour aboutir à ces mesures sont donc :

$$I = \frac{V_I}{330} \quad \text{et} \quad U = \frac{V_U}{100} \quad (2.13)$$

avec  $V_I$  et  $V_U$  les tensions des sorties analogiques de l'alimentation permettant de mesurer  $U$  et  $I$  [mV]. La fiche technique du constructeur indique que les tensions analogiques sont précises à  $\pm 1\%$  de l'EM.

## 2.2.6 Température du pion

Des mesures de température par capteur infra-rouge ou par thermocouple sont les deux moyens qui ont été évoqués pour étudier et caractériser l'échauffement du pion pendant un essai. Le premier présente l'avantage d'être non-intrusif, de mesurer l'échauffement instantanément et sur toute la longueur du pion. Cependant, le système étant en mouvement, le principe de mesure devient compliqué à mettre en place suite aux vibrations engendrées. De plus, le graphite est de couleur noire et est entouré d'une pince en cuivre qui s'échauffe en même temps que le graphite entraînant ainsi un rayonnement pouvant fausser la mesure. Enfin la mesure de température est faite en surface et pas à l'intérieur du pion. Le thermocouple quant à lui est intrusif et nécessite de percer l'échantillon afin d'y être inséré. Selon le diamètre de thermocouple utilisé, les mesures présentent une latence par rapport à l'échauffement réel au contact et il est nécessaire d'utiliser des brins de faible diamètre pour garantir un faible temps de réponse. Les vibrations et le courant circulant dans le pion rendent aussi le système de mesures plus complexe à mettre en place. Les thermocouples ont cependant pour avantages d'être fiables, faciles à caractériser et peu coûteux. S'ils sont bien enfouis dans l'objet et insérés dans une pâte thermiquement conductrice, la précision et la robustesse sont garanties. C'est donc le moyen de mesure par thermocouple qui a été retenu dans nos essais..

Comme schématisé sur la figure 2.12 (a) et visible sur la figure 2.12 (b), trois trous de 1 mm de diamètre sont réalisés pour accueillir chacun un thermocouple. Ces trous sont placés à 5, 10 et 15 mm du contact et ont une profondeur de la moitié de la largeur du pion. La difficulté dans cette mesure est d'obtenir la température d'un objet dans lequel un courant circule et qui se déplace latéralement par allers-retours.

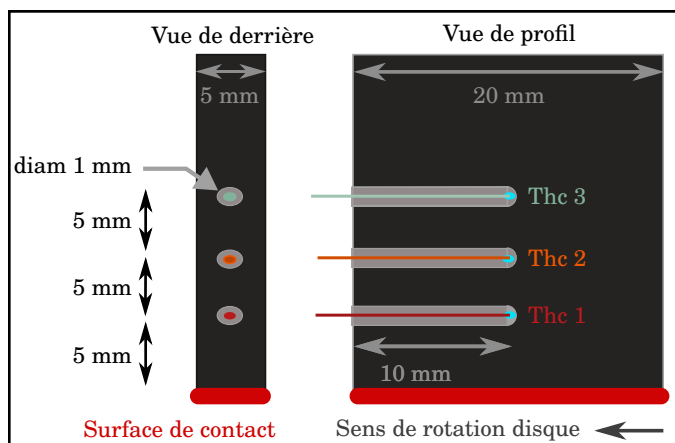


Figure 2.12(a) – Géométrie du pion et positionnement des thermocouples.

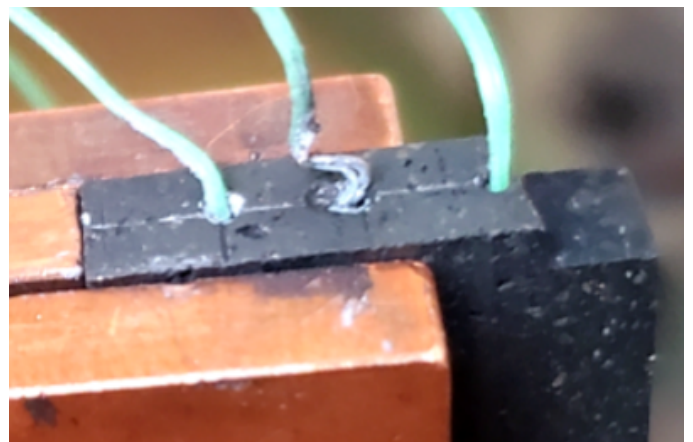


Figure 2.12(b) – Image du pion maintenu dans sa pince en cuivre avec trois thermocouples insérés à l'intérieur.

Pour répondre à ce besoin, une carte électronique suivant le synoptique présenté dans la figure 2.13 (a) a été spécialement développée et réalisée au sein du laboratoire (figure 2.13 (b)). Elle fonctionne de la manière suivante :

- Les tensions prélevées aux bornes des thermocouples (de l'ordre de la dizaine de  $\mu\text{V}$ ) sont amplifiées à l'aide d'un amplificateur de précision de référence AD8495. Cet amplificateur est spécialement adapté aux thermocouples de type K et possède une compensation de soudure froide pour une fréquence de coupure de l'ordre de la centaine de kHz, valeur bien supérieure à la fréquence de coupure de nos thermocouples. La sensibilité obtenue en sortie d'amplificateur est égale à  $5 \text{ mV}\cdot\text{C}^{-1}$  avec une erreur de gain de 0,03 %, et la réponse du capteur est donnée à partir de la relation suivante :

$$T = \frac{V_T - V_{ref}}{S} \quad (2.14)$$

avec  $T$  la température mesurée [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $V_T$  la tension analogique de sortie [V],  $V_{ref}$  une tension de référence déterminée [V] et  $S$  la sensibilité de  $5 \text{ mV}\cdot\text{C}^{-1}$ .

- Le pion étant traversé par un courant, les mesures prélevées en sortie des amplificateurs d'instrumentation sont isolées à l'aide d'amplificateurs d'isolement de gain unitaire (référence AMC1211). Ces amplificateurs ont pour but de transmettre au système d'acquisition des tensions isolées du reste du montage.
- Un convertisseur DC-DC isolé 5V-5V destiné à alimenter les amplificateurs d'isolement et à isoler l'alimentation du module de mesures des autres alimentations du montage.

La carte électronique intégrant ces composants a été conçue au laboratoire à partir d'un circuit imprimé réalisé à l'aide d'un logiciel de routage (Proteus) et en assemblant les différents composants (technologie traversante ou CMS) comme nous pouvons l'observer sur la figure 2.13 (b).

La température est mesurée par des thermocouples de type K de diamètre de fil  $80 \mu\text{m}$ , insérés dans les trous prévus à cet effet. Chaque trou est préalablement rempli d'une pâte thermique graisseuse à base de silicone ayant une conductivité thermique de  $5 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ , conçue initialement pour conduire et dissiper la chaleur. Le remplissage se fait à l'aide d'une seringue chirurgicale et d'une aiguille de diamètre 0,8 mm. Cette pâte permet de diminuer la latence thermique, ce qui est particulièrement nécessaire lors des pics d'échauffement ponctuels survenant lorsqu'il y a un frottement intense ou des arcs électriques.

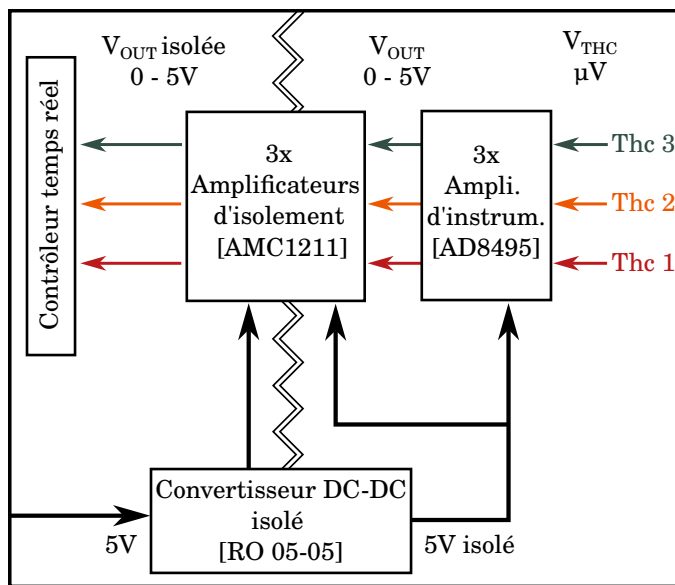


Figure 2.13(a) – Synoptique du module permettant la mesure de la température du pion.

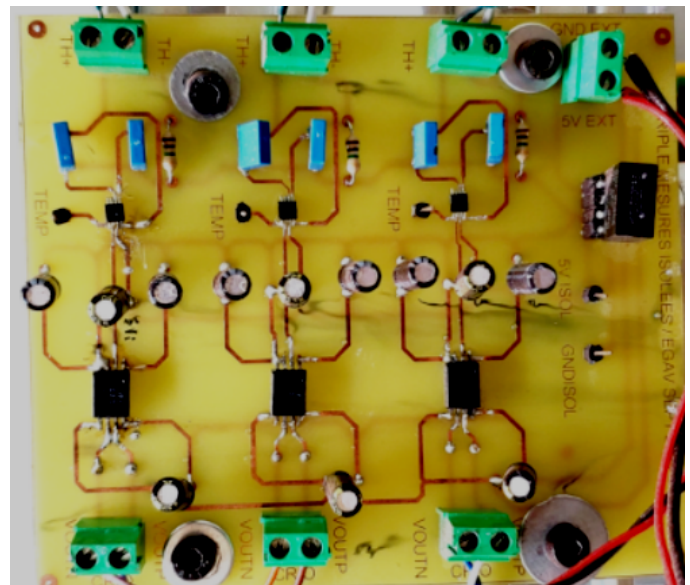


Figure 2.13(b) – Photo de la carte de mesure des températures du pion spécialement réalisée au laboratoire.

### Thermocouple type K

Le thermocouple de type K, à chromel en borne positive et alumel en borne négative, est largement utilisé pour son étendue de mesure dont la plage est généralement de  $-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les microthermocouples sont réalisés au laboratoire grâce à un banc permettant de souder des fils pouvant aller jusqu'à environ 1 mm de diamètre. Ce banc est constitué d'un module de soudage TL-Weld de chez OMEGA disposant d'un générateur de tension (220 V) et d'une électrode en charbon. Le principe consiste à approcher les deux fils de thermocouple en les maintenant grâce à une pince et en exposant l'autre extrémité à l'électrode. Un appui sur une pédale connectée au système permet alors de



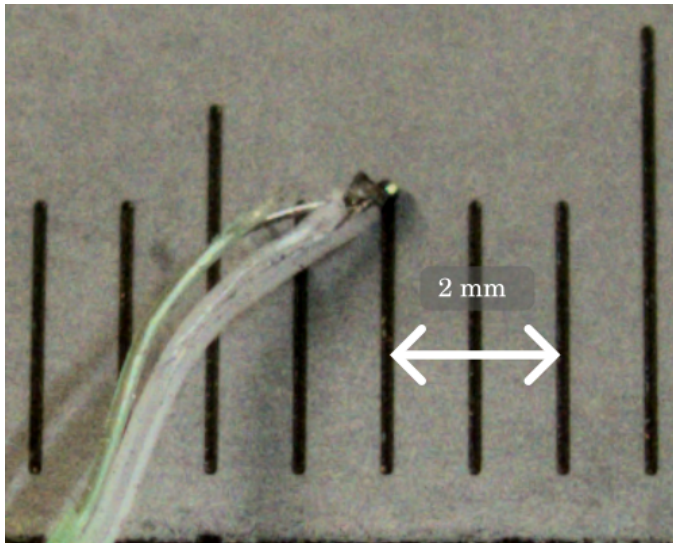


Figure 2.14(a) – Photo macro d'un thermocouple réalisé au laboratoire et inséré plus tard dans le pion.

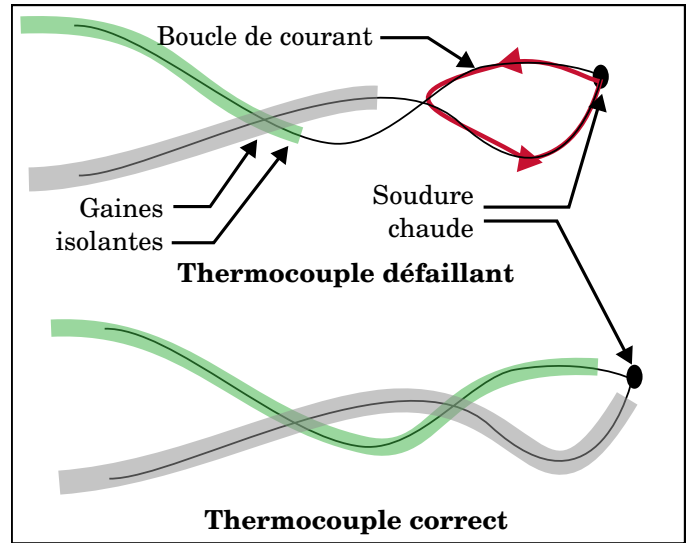


Figure 2.14(b) – Schéma de réalisation d'un thermocouple à insérer dans le pion.

décharger l'énergie accumulée dans l'alimentation en créant un court circuit, ce qui entraîne une soudure des deux métaux par décharge capacitive. La figure 2.14 (a) montre un exemple de jonction réalisée.

Comme le laboratoire possède les outils nécessaires pour leur réalisation, tous les thermocouples utilisés dans l'étude ont été réalisés par le doctorant.

La soudure entre les deux brins du thermocouple doit être précise et rigoureuse car ils sont enfermés dans un milieu soumis à des vibrations et traversé par un courant. Comme le montre la figure 2.14 (b), une soudure chaude trop éloignée de l'extrémité des gaines des brins peut entraîner la création involontaire d'un faux contact entre les fils. Cela crée ensuite une boucle de courant entre la soudure chaude et la soudure froide pendant l'essai. Aussi il a été observé que ce type de contact ne permet tout simplement pas la mesure de la température. La qualité de la soudure réalisée est également importante pour avoir un bon comportement temporel puisque plus le diamètre de la soudure est faible, moins son inertie sera importante et plus le temps de réponse de l'ensemble sera faible.

## Étalonnage et caractérisation

L'ensemble des thermocouples et de leur chaîne d'acquisition doit être étalonné avec un banc d'étalonnage constitué d'une sonde PT100 et d'un amplificateur ainsi qu'un bain thermostatique. Les thermocouples, raccordés à leur chaîne d'acquisition comme montré sur la figure 2.13 (a), peuvent ainsi être mis dans le bain thermostatique avec la sonde PT100 (utilisée comme référence) pour être caractérisés sur une plage de 10 à 95 °C. Lors de cette caractérisation, les tensions mesurées sont directement converties en °C avec la sensibilité connue des amplificateurs AD8495 ( $5 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$ ). Une régression linéaire est faite entre les températures mesurées et les températures de référence et montre un défaut de linéarité de 0,05 % (soit  $0,025 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$ ) et un décalage entre 0,01 °C et 0,4 °C. La figure 2.15 donne, pour un jeu de trois thermocouples branchés chacun sur une voie, l'écart entre les mesures faites et la température de référence ainsi que cet écart après correction. Comme on le verra, les thermocouples sont utilisés à des conditions extrêmes (vibrations, manipulations, températures extrêmes ponctuelles allant au-delà de 500 °C). De nombreux jeux ont donc été réalisés et caractérisés durant cette thèse.

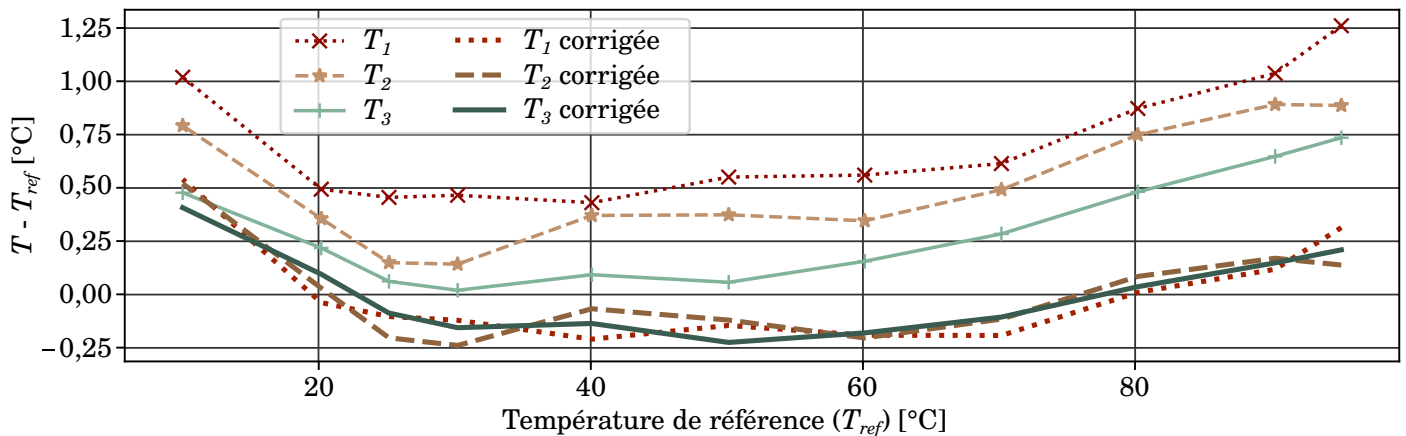


FIGURE 2.15 – Écart entre les températures mesurées et la température de référence, dans une configuration où les thermocouples et la PT100 sont dans le bain thermostatique.

Il a été observé lors des corrections que le décalage n'a jamais dépassé  $\pm 1,1$  °C tandis que la pente est toujours mesurée entre  $0,97$  et  $1,01$   $^{\circ}\text{C} \cdot \text{C}^{-1}$ , ce qui témoigne de la qualité de réalisation de la carte embarquée. Par exemple, l'équation de calibration pour le thermocouple 1 de la première série est la suivante :

$$T_{1,1} = 5,03 \cdot V_{T_1} + 0,42 \quad (2.15)$$

avec  $T_{1,1}$  la température mesurée avec le thermocouple 1, série 1 [°C] et  $V_{T_1}$  la tension mesurée sur la chaîne n°1 [mV].

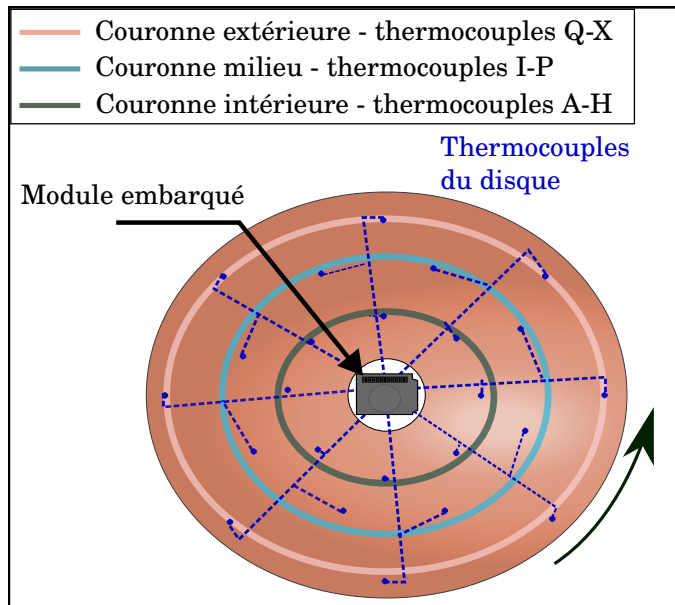
### 2.2.7 Température du disque

Pour mesurer la température du disque, 24 perçages d'une profondeur de 8 mm ont été faits sur la face inférieure du disque. Chaque trou, réparti sur 3 couronnes à 46, 30 et 25 cm du centre (voir figure 2.16 (a)), permet d'accueillir un thermocouple de type K ayant un diamètre de fil de 80  $\mu\text{m}$  inséré dans une pâte thermique. Ces thermocouples sont reliés à un module embarqué qui a été spécialement conçu et réalisé au sein du laboratoire (figure 2.16 (b))

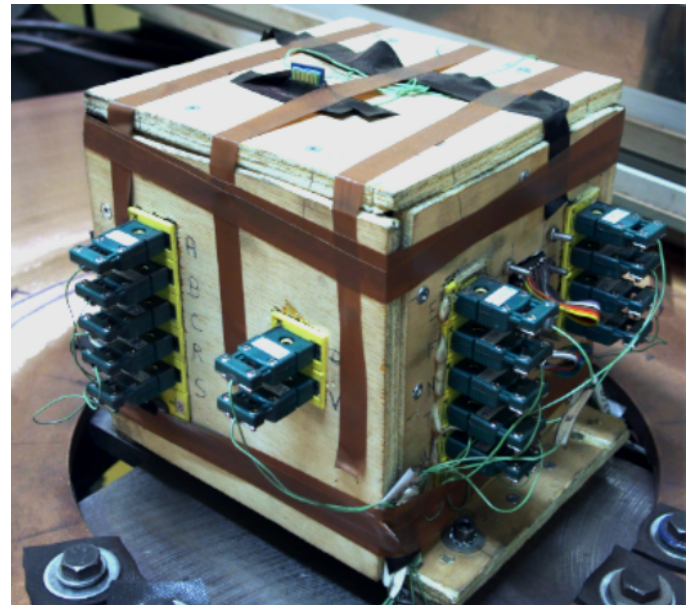
#### Fonctionnement global

La difficulté de ce travail est de mesurer des températures sur un disque en rotation dans lequel un courant circule, puis d'afficher et d'enregistrer les mesures via un contrôleur temps réel qui lui est statique. Une première option envisagée était d'utiliser un balai tournant d'instrumentation pour relier en filaire un module fixé au centre du disque au contrôleur temps réel. Pour des raisons de sécurité, de difficulté de mise en œuvre et de qualité de signal, cette solution a été abandonnée et une instrumentation embarquée et autonome envoyant les données de température sans fil a été retenue. Son fonctionnement général, présenté par la figure 2.17 (a), consiste en un système embarquant une source d'alimentation (4 accumulateurs 3,6 V en série de 3000 mAh), 3 micro-contrôleurs de type ESP32, 26 amplificateurs AD8495 et un module de référence HC05 permettant d'établir une liaison *Bluetooth*. Ce module est fixé





(a)



(b)

FIGURE 2.16 – Module d’instrumentation permettant la mesure de la température du disque : (a) Positionnement du pion et des thermocouples sur le disque, (b) Photo du module.

au centre du disque et permet de mesurer plusieurs températures via les thermocouples implantés dans le disque. Les mesures sont ensuite réceptionnées par un récepteur *Bluetooth* HC05 puis converties de liaison série à la liaison USB par un module CH340G afin d’être lues par le contrôleur temps réel sur un port USB.

### Module embarqué

Comme le détaille la figure 2.17 (a), des micro-contrôleurs ESP32 et des amplificateurs pour thermocouple de type K (AD8495) ont été utilisés pour concevoir le module embarqué sur le disque. Comme nous l’avons vu précédemment, ces derniers convertissent une tension très faible ( $\mu\text{V}$ ) issue des thermocouples en tension analogique amplifiée avec une sensibilité de  $5 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$  et une EM de  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  tout en assurant la compensation de soudure froide. Deux micro-contrôleurs ESP32 intégrant 15 convertisseurs analogique-numérique (CAN) sont chacun utilisé pour lire les 26 sorties analogiques des AD8495. Ces voies sont notées de A à Z : les lettres allant de A à H correspondent aux thermocouples de la couronne interne du disque; I à P à ceux de la couronne intermédiaire; Q à X à ceux de la couronne externe. La voie Y correspond au thermocouple mis à l’intérieur de la boîte tandis que la voie Z au thermocouple fixé sur le capot du module pour mesurer la température ambiante de la salle. Un troisième ESP32 récupère les données issues des deux premiers par protocole SPI (*Serial Peripheral Interface*), protocole de communication de type maître/esclave. Ces données sont concaténées et formatées pour être communiquées par liaison série RS232 à l’émetteur HC05 qui les transmet par protocole *Bluetooth*. Elles sont reçues et décodées par un second module HC05 jouant le rôle de récepteur puis lues sur un port série par le système d’acquisition grâce à un convertisseur série-USB CH340.

### Programmation des micro-contrôleurs

Les ESP32 sont des micro-contrôleurs produits par Espressif Systems et largement utilisés chez un public amateur comme professionnel. Une communauté importante et une documentation bien fournie sont donc disponibles pour les programmer rapidement. Par facilité, il a été choisi au départ de programmer les ESP32 en langage C++ sous l’environnement de développement intégré (IDE) Arduino qui fournit de nombreuses bibliothèques faciles à prendre en main. Ces bibliothèques ne permettent cependant pas de configurer un ESP32 en esclave SPI, protocole nécessaire pour faire communiquer les micro-contrôleurs entre eux. Il a donc été décidé de programmer les micro-contrôleurs en langage C avec l’IDE PlatformIO, disponible en extension sous l’éditeur de code source Microsoft Visual Studio.

### Caractérisation de thermocouples et chaîne d’acquisition

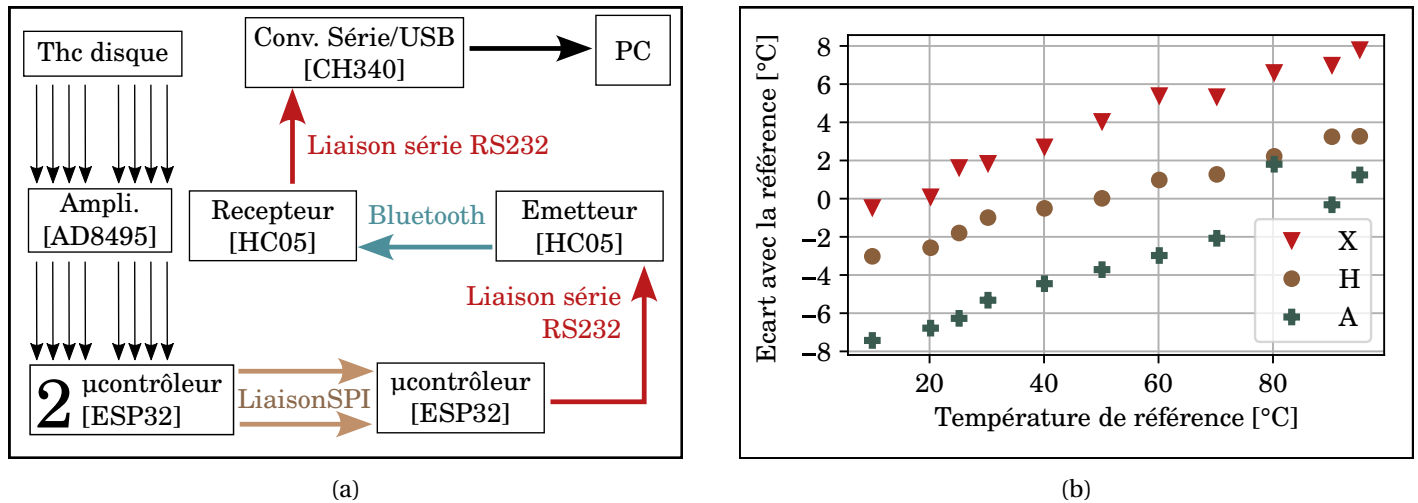


FIGURE 2.17 – Description de l’instrumentation permettant la mesure de la température du disque : (a) schéma du fonctionnement axé sur l’ensemble micro-contrôleurs, amplificateurs, thermocouples et (b) exemple de courbes de caractérisation.

L’ensemble des thermocouples et des chaînes d’acquisition a été caractérisé en utilisant comme référence un thermomètre à résistance de platine PT100 et un amplificateur étalonné, selon le principe énoncé précédemment. Pour cela, les thermocouples et la sonde de référence sont immergés dans un bain thermostatique rempli d’eau déminéralisée. Différentes valeurs sont ainsi relevées à différentes températures afin de corriger le décalage et la pente de chaque voie. La figure 2.17 (b) donne trois exemples de mesures faites sur les voies A, H et X. On observe un défaut de linéarité de prêt de 10 % et il y a un décalage pouvant être important (allant jusqu’à 11 °C de correction). Pour expliquer ce comportement, il faut comprendre que les AD8495 sont intégrés sur une carte électronique issue du commerce avec une résistance permettant d’établir une tension de référence qui ajuste le décalage suivant la gamme de températures sur laquelle on veut travailler. Contrairement au système de mesures de température du pion pour lequel les composants ont été choisis et soudés par nos soins, il n’est pas possible ici de modifier la tension de référence des amplificateurs, ce qui peut justifier ce décalage parfois important.

Chaque voie de mesure de température est cependant corrigée numériquement et individuellement en se basant sur des résultats de régression linéaire. En outre, on observe une correction linéaire moyenne de 10 % pour une pente moyenne de  $5,5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{mV}^{-1}$  et un décalage moyen de  $-6 \text{ }^\circ\text{C}$  (soit  $1,2 \text{ mV}$  à retirer sur la tension mesurée). Par exemple la température obtenue sur la chaîne A se calcule de manière suivante :

$$T_A = 5,52 \cdot V_{T_A} - 8,72 \quad (2.16)$$

avec  $T_A$  la température du thermocouple A calculée [°C] et  $V_{T_A}$  la tension mesurée sur la chaîne A du module sans fil [mV].

## 2.2.8 Calcul d’incertitudes sur les thermocouples

Que ce soit pour la chaîne d’acquisition mesurant les températures du disque ou celle mesurant les températures du pion, une caractérisation a été faite dans les conditions expérimentales préconisées par Charki A. [133] :

1. Le banc de caractérisation est constitué d’un bain thermostatique avec mitigeur, d’une sonde PT100 et d’un système d’acquisition PHP 601.
2. Les thermocouples ainsi que la sonde PT100 sont immergés d’au moins 20 cm dans le bassin d’eau déminéralisée du bain thermostatique.
3. Les valeurs lues sur le châssis d’acquisition sont saisies manuellement par l’utilisateur avec une précision à deux décimales.
4. Les valeurs des thermocouples sont mesurées numériquement via la chaîne d’acquisition utilisée pendant les essais.

### Incertitudes liées au banc d'étalonnage

Les incertitudes relatives au banc d'étalonnage sont indiquées dans le tableau 2.4. La configuration du banc d'étalonnage et les instruments utilisés par Petitgirard J. [20] lors de ces travaux de thèse étant les mêmes que ceux utilisés ici, les incertitudes d'indice 1 et 2 ( $s_1$ ,  $u_{1,et}$ ,  $u_{1,de}$ ,  $u_{1,rep}$ ,  $u_{1,res}$ ,  $u_{1,int}$ ,  $u_{2,hom}$ ,  $u_{2,st}$  et  $u_{2,ft}$ ) sont des valeurs reprises de ces travaux [20] et sont données dans le tableau 2.4.

Type d'incertitude	Notation	Valeur [°C]	Commentaires
<b>Chaîne étalon (indice 1)</b>			
Dispersion des résultats	$u_{1,s}$	5,0e-5	$u_{1,s,moy}=1,0e-6$ , $u_{1,s,max}=5,0e-6$ [20]
Etalonnage	$u_{1,et}$	6,5e-3	spec. php601 associé avec PT100
Dérive entre deux raccordements	$u_{1,de}$	1,8e-2	Charki .A <i>et al.</i> [133]
Reproductibilité	$u_{1,rep}$	6,0e-3	$\max(T_{max}-T_{min} / 2\sqrt{3})$ [20]
Résolution	$u_{1,res}$	3,0e-3	$res / 2\sqrt{3}$ , $res=1,0e-2$
Correction entre deux points d'étalonnage	$u_{1,int}$	7,0e-2	à $T < 80$ °C, écart max. à la régression / $\sqrt{3}$ [20]
<b>Origine thermique (indice 2)</b>			
Homogénéité, milieu de comparaison	$u_{2,hom}$	1,0e-1	Mesures à 2 emplacements avec PT100 [20]
Stabilité du milieu de comparaison	$u_{2,st}$	2,3e-3	$\sqrt{u_{1,s}}$ , Charki .A <i>et al.</i> [133]
Flux thermiques parasites sur étalon	$u_{2,ft}$	-	inclu dans $u_{1,et}$ , spec. php601

TABLEAU 2.4 – Incertitudes associées au banc d'étalonnage utilisé pour caractériser les systèmes de mesures de température (repris de la thèse de J. Petitgirard [20]).

### Incertitudes du système de mesures de température du pion

Les incertitudes de dispersion et la reproductibilité des trois chaînes d'acquisition ont été calculées sur un ensemble de mesures ( $N > 100$ ) faites pendant l'étalonnage, sur 9 jeux de thermocouples et à différentes températures ( $20$  °C  $< T < 95$  °C). Pour chaque thermocouple et température, une dispersion  $s_3$  et une reproductibilité  $u_{3,rep}$  ont été calculées par les formules suivantes :

$$u_{3,s} = \frac{1}{N \cdot (N-1)} \sum_{j=1}^N (q_j - \bar{q})^2 \quad (2.17)$$

avec  $u_{3,s}$  l'incertitude de dispersion [°C],  $N$  le nombre d'échantillons [-],  $q_j$  la  $j^{\text{ème}}$  mesure [°C],  $\bar{q}$  la moyenne des mesures [°C].

$$u_{3,rep} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2\sqrt{3}} \quad (2.18)$$

avec  $u_{3,rep}$  l'incertitude de reproductibilité [°C],  $T_{max}$  la température maximale mesurée [°C] et  $T_{min}$  la température minimale mesurée [°C].

Les incertitudes de dispersion et de reproductibilité calculées sont montrées sur la figure 2.18. Pour éliminer les points aberrants tout en étant "critique", les incertitudes des différentes chaînes d'acquisition sont divisées par un centile d'ordre 0,95. Dans ce cas, on aura d'un côté 95 % des points minima et de l'autre 5 % des points maxima, considérés comme points aberrants.  $u_{3,s,q95}$  et  $u_{3,rep,q95}$  sont donc conservées comme incertitudes de dispersion et de reproductibilité.

Le tableau 2.5 résume les incertitudes calculées sur toute la chaîne d'acquisition allant du thermocouple jusqu'au contrôleur temps-réel. Le tableau comprend aussi les résultats des incertitudes de type composées  $u_{th,p}$  [°C] et des incertitudes élargies  $U_{th,p}$  [°C] calculées telles que :

$$u_{th,p} = \sqrt{\sum u_1^2 + \sum u_2^2 + \sum u_3^2} \quad (2.19)$$

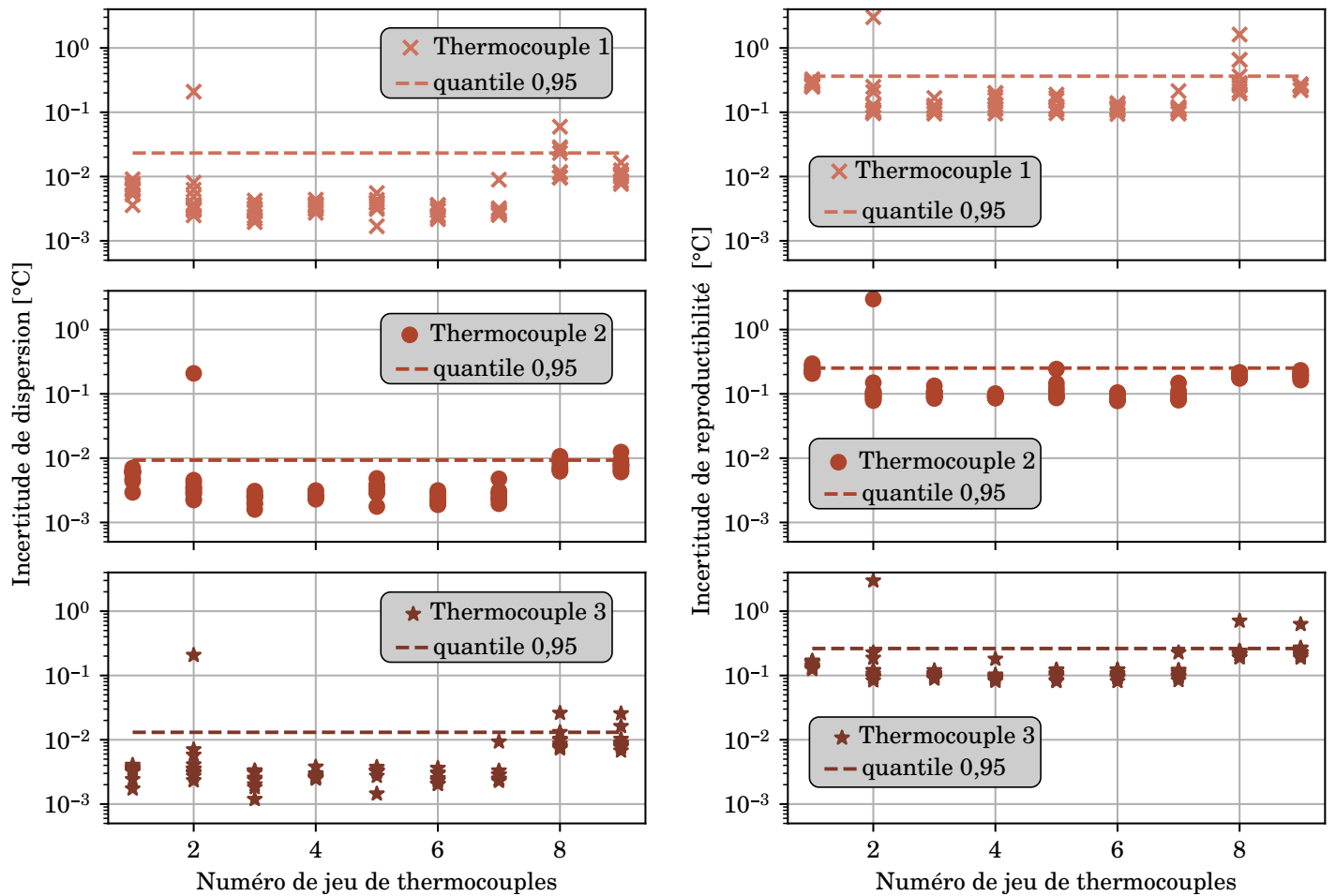


FIGURE 2.18 – Incertitudes de dispersion et de reproductibilité calculées sur 9 jeux de 3 thermocouples. Chaque point représente une dispersion ou une reproductibilité sur un ensemble de mesures ( $N > 100$ ) à une certaine température ( $20\text{ °C} < T < 95\text{ °C}$ ).

avec  $\sum u_1^2$ ,  $\sum u_2^2$  et  $\sum u_3^2$ , la somme des incertitudes d'indice 1, 2 et 3 [°C] et

$$U_{th,p} = 2 \cdot u_{th,p} \quad (2.20)$$

Type d'incertitude	Notation	$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$T_3$ [°C]	Commentaires
<b>Chaîne en étalonnage (indice 3)</b>					
Dispersion des résultats	$u_{3,s,c95}/u_{3,s,moy}$	$2,3e-2/9,1e-3$	$9,3e-3/6,9e-3$	$1,3e-2/7,4e-3$	$u_{3,s,c95}$ retenu
Reproductibilité	$u_{3,rep,c95}/u_{3,rep,moy}$	$3,6e-1/2,4e-1$	$2,5e-1/1,8e-1$	$2,6e-1/1,9e-1$	$u_{3,rep,c95}$ retenu
Résolution	$u_{3,res}$	$3,0e-2$	$3,0e-2$	$3,0e-2$	$res/\sqrt{2}$ , $res=1e-1$
<b>Inc. de type composée</b>	$u_{th,p}$	$6,1e-1$	$5,2e-1$	$5,3e-1$	-
<b>Inc. élargie k=2</b>	$U_{th,p}$	$1,2$	$1,1$	$1,1$	-

TABLEAU 2.5 – Incertitudes associées aux chaînes d'acquisition de la mesure de la température du pion en étalonnage.

### Incertitudes du système de mesures de température du disque

La même méthode a été employée pour calculer les incertitudes sur le module de mesures de température du disque.

Dans un premier temps, et en travaillant sur les jeux de données enregistrées lors de l'étalonnage sur l'ensemble des thermocouples, les valeurs aberrantes ont été éliminées en ne gardant que les valeurs comprises entre le centile d'ordre 0,05 et celui d'ordre 0,95. Des calculs d'incertitudes de dispersion (eq. 2.17) et d'incertitudes de reproductibilité (eq. 2.18), montrées sur la figure 2.19, ont ensuite été effectués pour chaque thermocouple et pour chaque température de référence. Chaque point représente une incertitude de dispersion ou de reproductibilité calculée sur un ensemble de mesure ( $N > 100$ ) faites sur le même thermocouple. Enfin, les valeurs maximales ont été conservées comme incertitudes de référence pour la dispersion et la reproductibilité.

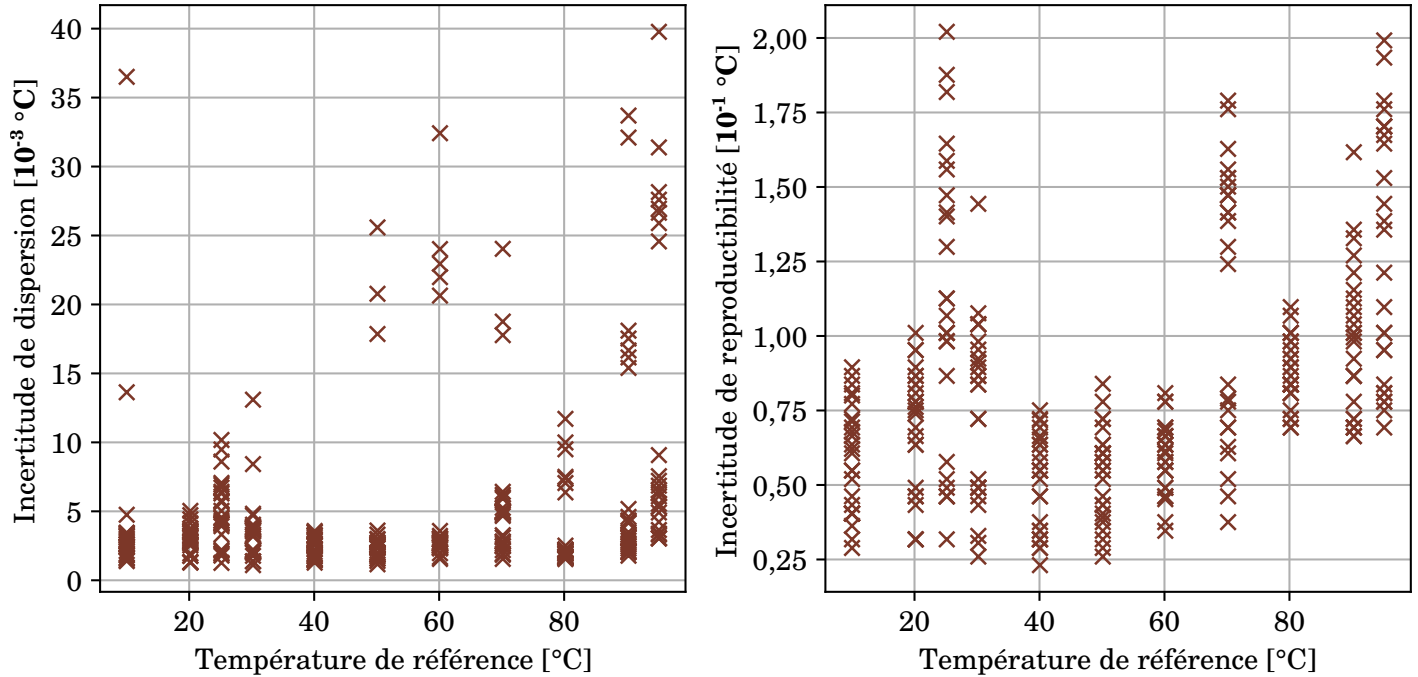


FIGURE 2.19 – Incertitudes de dispersion et de reproductibilité calculées sur les 26 thermocouples et leurs chaînes d'acquisition en fonction de la température de consigne.

Le tableau 2.6 présente un résumé des incertitudes ainsi que l'incertitude  $u_{th,d}$  [°C] calculée telle que :

$$u_{th,d} = \sqrt{\sum u_1^2 + \sum u_2^2 + \sum u_4^2} \quad (2.21)$$

avec  $\sum u_4^2$  la somme des incertitudes d'indice 4 au carré

L'incertitude  $U_{th,d}$  [°C] retenue est une incertitude élargie :

$$U_{th,d} = 2 \cdot u_{th,d} \quad (2.22)$$

Type d'incertitude	Notation	Valeur [°C]	Commentaires
<b>Chaîne en étalonnage (indice 4)</b>			
Dispersion des résultats	$u_{4,s,max}$	4,0e-2	-
Reproductibilité	$u_{4,rep,max}$	2,0e-1	-
Résolution	$u_{4,res}$	3,0e-2	$res / 2\sqrt{3}$ , $res=1e-1$
<b>Inc. de type composée</b>	$u_{th,d}$	4,7e-1	-
<b>Inc. élargie k=2</b>	$U_{th,d}$	9,4e-1	-

TABLEAU 2.6 – Incertitudes associées au système de mesures de température du disque en étalonnage.

### Remarques sur les incertitudes calculées

Tout d'abord, l'incertitude finale  $U_{th,d}$  du module de mesures de température du disque est légèrement inférieure à l'incertitude  $U_{th,p}$  dédiée à la mesure de température du pion. En effet, les deux chaînes d'acquisition sont différentes, et on observe que la solution technique utilisée pour mesurer la température du disque aurait été tout aussi adaptée, voire même plus précise, pour mesurer les températures du pion. Cela reviendrait aussi bien moins cher puisque l'on s'affranchirait du matériel National Instruments (les données pouvant être lues sur n'importe quel ordinateur possédant un port USB).

Deuxième remarque, les incertitudes ont été calculées avec les systèmes de mesures sur support statique, et moteur à l'arrêt. On ne connaît donc pas l'impact du moteur sur les mesures, notamment dû aux perturbations du champ électromagnétique. On ne connaît pas non plus le comportement des systèmes lorsque le banc fonctionne, les cartes étant soumises à des vibrations importantes pouvant altérer et fatiguer les soudures et les connectiques.

Ces remarques sont notées dans les perspectives de ces travaux. Aussi le traitement des données expérimentales montrera que les acquisitions sont stables sans lissage ou filtrage.

## 2.2.8 Conclusion

Un ensemble de capteurs résumé dans le tableau 2.7 a été mis en place pour instrumenter le banc d'essai. Grâce à des mesures faites sur leur chaîne d'acquisition, ils ont tous été caractérisés et corrigés pour augmenter la précision. Les incertitudes ont été calculées sur les mesures de température pour mieux interpréter les résultats.

Nom	Dénomination	Étendu de mesure EM	Sensibilité S	$V_{cc}$ (V)
Force	$F_N / F_T$	245 N	0,098 mV·N <sup>-1</sup>	12
Couple	$C$	100 Nm	0,098 mV·Nm <sup>-1</sup>	5
Vitesse rotation	$v_{rot}$	682/1364/2728 tr·min <sup>-1</sup>	0,014 mV·(tr·min) <sup>-1</sup>	5
Vibrations	$a_x, a_y, a_z$	10 g	-0,27 V·g <sup>-1</sup>	5
Tension	$U$	100 V	0,1 V·V <sup>-1</sup>	-
Courant	$I$	330 A	0,33 V·A <sup>-1</sup>	-
T(°C) pion	$T_1, T_2, T_3$	500 °C	5 mV·°C <sup>-1</sup>	5
T(°C) disque	$T_A, T_B .. T_Z$	500 °C	5 mV·°C <sup>-1</sup>	3,3

TABLEAU 2.7 – Récapitulatif des capteurs installés sur le banc.

## 2.3 Contrôle, commande et acquisition

Un système de type cRIO (*compact Reconfigurable Input/Output system*, aussi appelé CompactRIO) de chez National Instruments est utilisé pour contrôler le banc d'essais et faire l'acquisition des différentes mesures. Le modèle utilisé, un cRIO 9030, comprend deux ports USB, trois ports de communication distincts RJ45, RS485 et RS232 ainsi que quatre emplacements pouvant accueillir tout type de module de la série National Instruments (NI) de type C. Deux cibles peuvent être utilisées pour programmer le cRIO : un FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) et/ou un contrôleur temps réel.

### FPGA

Un FPGA est un circuit logique programmable constitué de blocs logiques configurables, d'entrées/sorties et de mémoires. L'avantage du FPGA est de pouvoir accomplir des tâches en parallèle avec une cadence très élevée (40 MHz). Il est spécialement dédié au développement hardware dans les blocs logiques (entrées, sorties numériques, mise en œuvre de convertisseurs analogiques numériques et numériques analogiques,...) et sa programmation se fait à bas niveau. Les tâches complexes sont donc difficiles à programmer et il n'est pas destiné à faire du calcul ni à tracer des graphiques. Le FPGA implanté dans notre cRIO est un circuit de la famille Xilinx (Kintex 7) comportant environ 500 000 blocs logiques en technologie 28 nm.

## Contrôleur temps réel

Le cRIO embarque un processeur double cœur (1,33 GHz) muni d'un système d'exploitation NI *Linux Real-Time* autonome. Celui-ci peut communiquer avec le FPGA et accomplir des tâches complexes et du calcul. En revanche, le système d'exploitation utilise une part considérable du processeur, limitant la rapidité des programmes implémentés (de l'ordre du kHz pour faire une tâche simple).

N'ayant pour le moment pas besoin de faire d'acquisition très rapide, le système de contrôle commande est implémenté uniquement dans le contrôleur temps-réel à l'aide du logiciel LabVIEW.

### 2.3.1 Architecture

L'architecture du cRIO et de ses modules embarqués ainsi que l'agencement avec les actionneurs et l'instrumentation sont représentés figure 2.20. On peut voir que trois cartes type C sont utilisées :

- Une carte NI 9205 lisant les entrées analogiques liées aux mesures du courant  $I$ , de la tension  $U$ , des températures du pion  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , des accélérations  $a_x$ ,  $a_y$  et  $a_z$ , des mesures de forces normale et transversale  $F_N$  et  $F_T$ , du couple en sortie de moteur  $C$  et de la vitesse de rotation  $v_{rot}$ . Toutes ces entrées analogiques sont lues en différentiel, c'est à dire par une tension entre deux bornes distinctes. Cette carte possède au total 32 entrées analogiques codées sur 16 bits pour une fréquence maximale d'acquisition de 250 kHz et d'une précision de 1 % de la pleine échelle nominale. Cette dernière peut être fixée pour chaque sortie à  $\pm 10$  V,  $\pm 5$  V,  $\pm 1$  V ou  $\pm 200$  mV et est configurée en fonction de l'EM de la tension du capteur ( $\pm 200$  mV pour les cellules de pesée,  $\pm 10$  V pour la mesure de courant). Les entrées sont toujours utilisées en mode différentiel, c'est à dire par paire, ce qui revient à avoir 16 entrées.
- Une carte NI 9474 à 8 sorties numériques. Elle est alimentée par une tension de 24 V et permet d'activer le variateur de vitesse et de piloter le vérin linéaire par une voie activé/désactivé et une voie haut/bas.
- Une carte NI 9263 à 4 sorties analogiques permettant d'envoyer les consignes de courant  $I_{sp}$  et de tension  $U_{sp}$  et de vitesse de rotation du disque  $v_{rot,sp}$ . Une dernière sortie permet de communiquer la mesure de vitesse de rotation  $v_{rot}$  au variateur de vitesse pour permettre à son correcteur PID de faire la régulation. Ces sorties sont codées sur 16 bits pour une fréquence maximale de 100 kHz et une précision de 0,4 %.

Trois ports sont aussi utilisés pour communiquer avec différents matériels :

- Un port USB pour recevoir les mesures de température du module d'instrumentation du disque, par le biais d'un convertisseur Série-USB et du récepteur *Bluetooth* HC05.
- Un port RJ485 qui permet de communiquer en MODBUS avec le contrôleur de position PCON-CB qui pilote le vérin de translation.
- Un port RJ45, qui permet de faire une communication LAN entre l'ordinateur de l'opérateur et le cRIO. Lorsque le banc d'essais fonctionne, l'interface homme machine (IHM) et les données sont envoyées par ce biais. C'est aussi par ce port que l'ensemble des programmes sont compilés et implémentés sur le cRIO.

### 2.3.2 Stratégie de contrôle

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) est un langage graphique créé par NI qui permet de créer des systèmes de contrôles et de mesures. Communément appelé langage G, LabVIEW permet de travailler sur des systèmes d'exploitation tels que Linux, Microsoft Windows ou Mac OS x tout comme sur des FPGA ou des plateformes temps-réel. C'est donc le langage utilisé pour programmer le contrôleur temps réel du cRIO.

Les programmes LabVIEW peuvent rapidement devenir très complexes, monolithiques et difficilement lisibles. Dans ces cas là, les programmes sont difficiles à reprendre en main et à modifier. Afin de pérenniser la partie logicielle, un effort a été fait pour construire le programme en blocs et sous blocs en se basant sur l'une des bases de la philosophie UNIX<sup>1</sup> : "Écrivez des programmes qui effectuent une seule chose et qui le font bien" ("*Write programs that do one thing and do it well.*") [134].

La figure 2.21 présente l'arbre de construction du programme pilotant le banc d'essais dans sa globalité. Comme le montre le tableau 2.8, les blocs sont distribués dans différentes boucles à priorités et fréquences de fonctionnement différentes. Dans ce cas, la priorité la plus haute est celle ayant la valeur la plus importante, puis diminue par ordre

---

1. Unix est une famille de systèmes d'exploitation. Il est construit sur une approche de développement logiciel et un ensemble de normes, appelées Philosophie d'Unix, basées sur l'expérience des fondateurs.



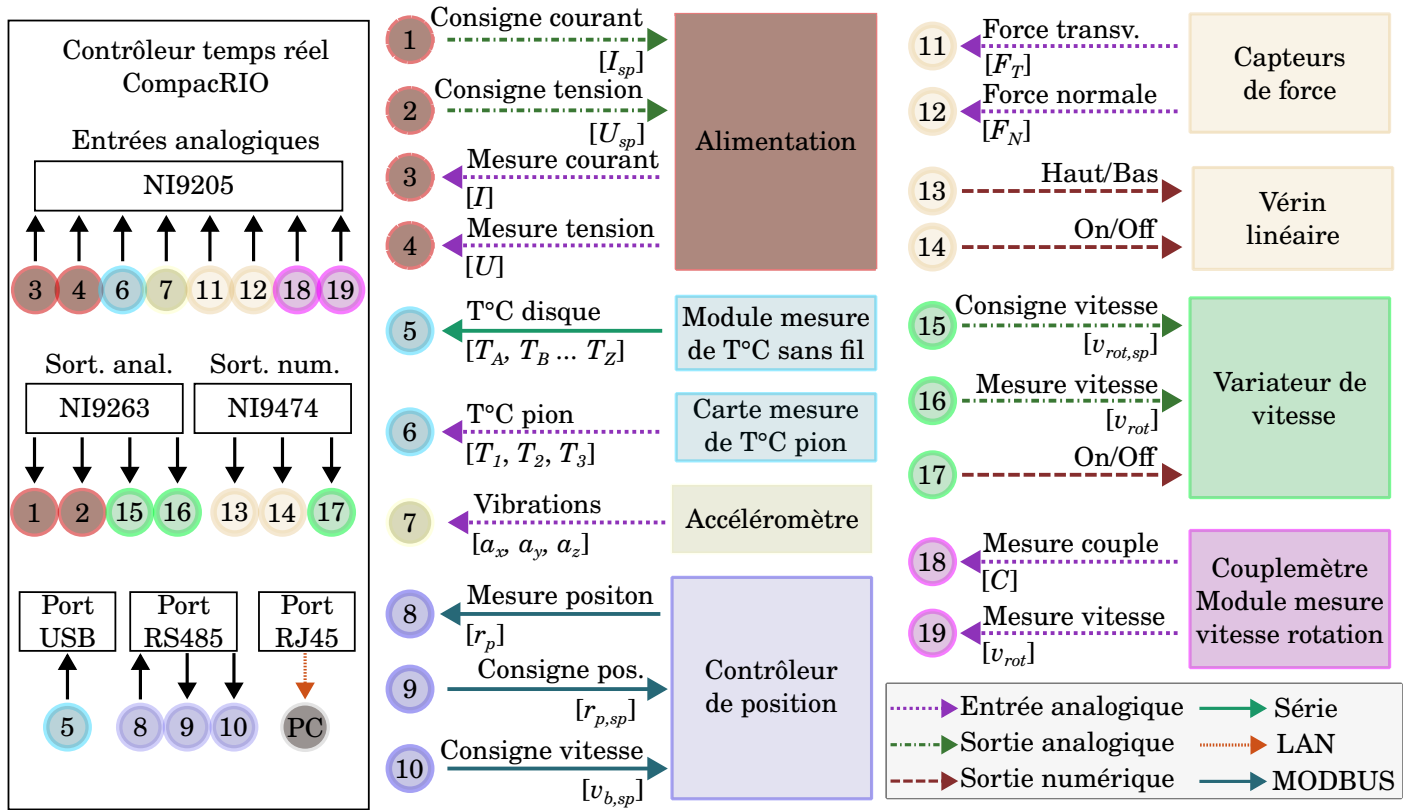


FIGURE 2.20 – Architecture d’agencement du matériel de contrôle-commande et des grandeurs associées.

décroissant. Ce système permet notamment de limiter la fréquence de fonctionnement sur certaines tâches qui demandent des ressources, notamment la mise à jour des indicateurs et des graphiques, pour accélérer et donner la priorité à la vitesse d’acquisition des mesures dont la valeur change rapidement (force, tension, courant et vibrations). On différencie alors trois fréquences :

1. La fréquence d’écriture  $f_e$ , de 100 Hz, qui est celle à laquelle le fichier est incrémenté d’une ligne de valeurs.
2. La fréquence d’actualisation  $f_{a,th}$  théorique (Hz), qui est la fréquence à laquelle une valeur doit être mise à jour.
3. La fréquence d’actualisation  $f_a$  réelle (Hz), qui est la fréquence à laquelle sa valeur est mise à jour dans le fichier.

Tâche	Fréquence [Hz]	Priorité	Tâche	Fréquence [Hz]	Priorité
Mesures $F_N$ & $F_T$	100	105	Mise à jour indicateur l’IHM	5	101
Sécurité surcharge (force)			Mesures $v_{rot}$ et $C$		
Mesures vibrations			Commande $v_{rot,sp}$		
Commandes $I_{sp}$ & $U_{sp}$	50	102	Compteur distance	10	99
Mesures $U$ & $I$			Mesure T°C disque		
Sécurité surcharge (poids)			Commande vérin linéaire		
Mesures $T_1, T_2, T_3$	20	101	Mise à jour graphique déroulant	1	99
Mesure $r_p$			Compteur temps d’essai		
Commande Pcon			Mise à jour affichage T°C disque		
Compteur mouvement balayage				0,66	98

TABLEAU 2.8 – Répartition des blocs et des sous-blocs dans les différentes boucles du programme principal. Les valeurs de priorités des boucles sont arbitraires (la valeur de priorité par défaut sur LabVIEW est de 100).



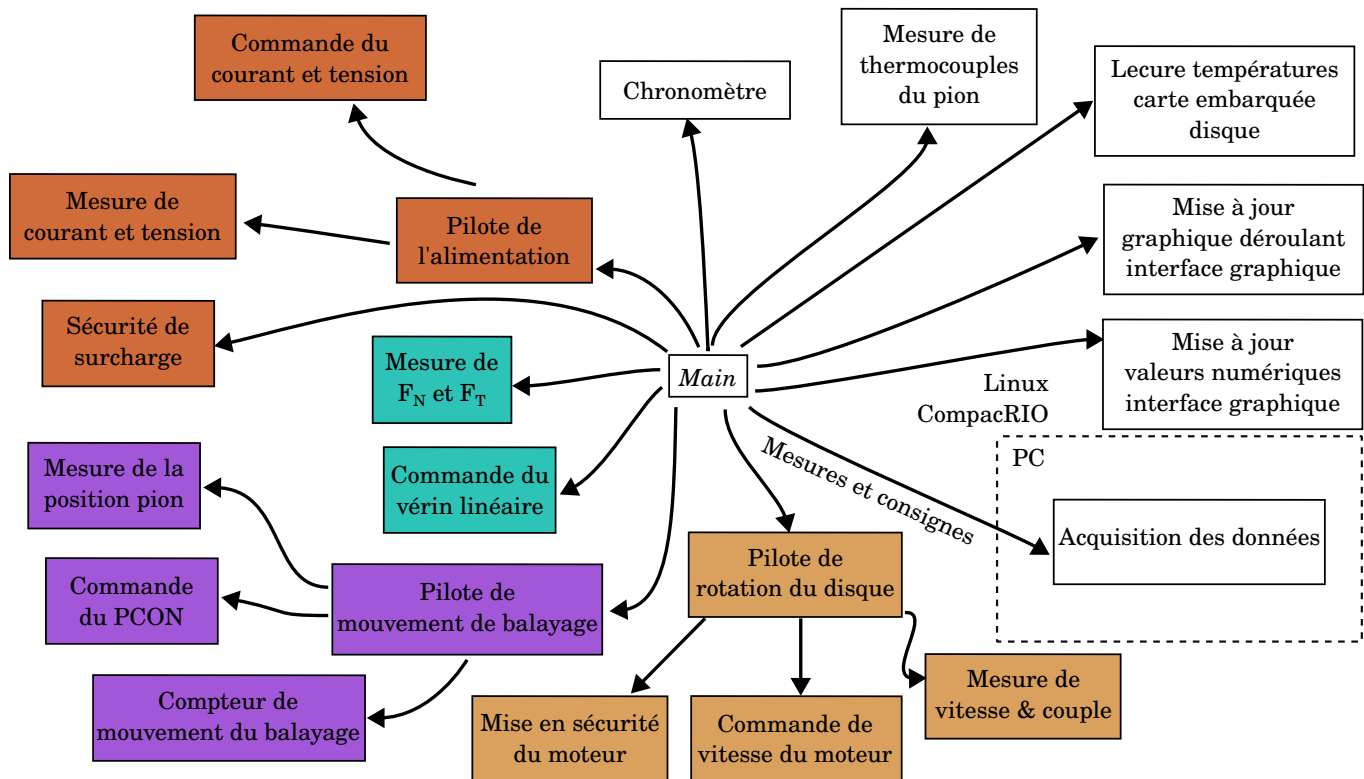


FIGURE 2.21 – Architecture des programmes implémentés sur le cRIO, basés sur la philosophie UNIX : "Écrivez des programmes qui effectuent une seule chose et qui le font bien".

Il est alors observé que la boucle la plus prioritaire (ind. 105) a sa fréquence d'actualisation théorique (100 Hz) identique à sa fréquence d'actualisation réelle. En revanche celle ayant la priorité inférieure (ind. 102) a une fréquence d'actualisation théorique (50 Hz) différente de sa fréquence d'actualisation réelle (20 à 50 Hz). Ces fréquences sont vérifiées dans la trame de données, et puisque la fréquence d'écriture est de 100 Hz une valeur changeant tous les pas de temps a une fréquence d'acquisition identique (puis 50 Hz si la valeur est modifiée toutes les deux lignes, etc.).

Différentes stratégies sont mises en place afin de respecter les consignes d'essais.

### Position et vitesse transversale du pion

La vitesse de balayage est imposée par le contrôleur de position qui reçoit une commande par MODBUS. Cette vitesse peut soit être imposée par l'opérateur, soit être calculée avec l'équation 1.1 en fonction de la vitesse linéaire, de la distance de piquetage et de l'amplitude de balayage renseignées par l'opérateur.

Comme expliqué dans la section 2.2.4, la position du pion est mesurée quand à elle par le contrôleur de position lorsqu'il arrive aux extrémités de sa course, puis calculée en utilisant les consignes de vitesse, d'amplitude de balayage et du temps de trajet lorsqu'il est entre ses bornes. Les positions des extrémités et l'amplitude de balayage sont définies par l'utilisateur à travers l'IHM (voir figure 2.22).

### Vitesse de rotation du disque

La régulation de la vitesse de rotation du disque est gérée par le correcteur PID intégré dans le variateur de vitesse ATV320. Pour cela, le contrôleur temps réel envoie une mesure et une consigne par des entrées analogiques. Parce que la vitesse linéaire doit rester constante et que la position du pion oscille, la vitesse de rotation du moteur oscille constamment en suivant l'équation 2.5. La figure 2.23 donne un exemple de la fluctuation de la vitesse de rotation pour un essai réalisé à  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et une vitesse de balayage de  $16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , conditions dans lesquelles les amplitudes et les fréquences d'accélération et de décélération sont les plus importantes. Cette figure permet aussi de comparer la consigne et la mesure et de voir que l'écart entre les deux varie peu avec un maximum à 6 %. En effet, les rampes

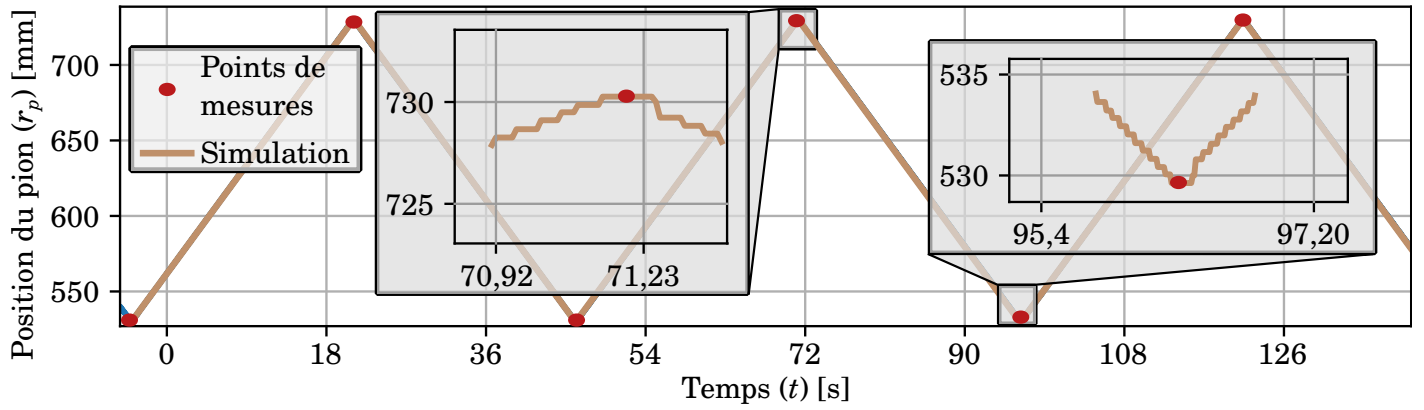


FIGURE 2.22 – Exemple d’enregistrement de position lors d’un essai à vitesse de balayage de  $8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

d’accélération sont tellement fortes qu’une latence est toujours observée sur la mesure par rapport à la consigne.

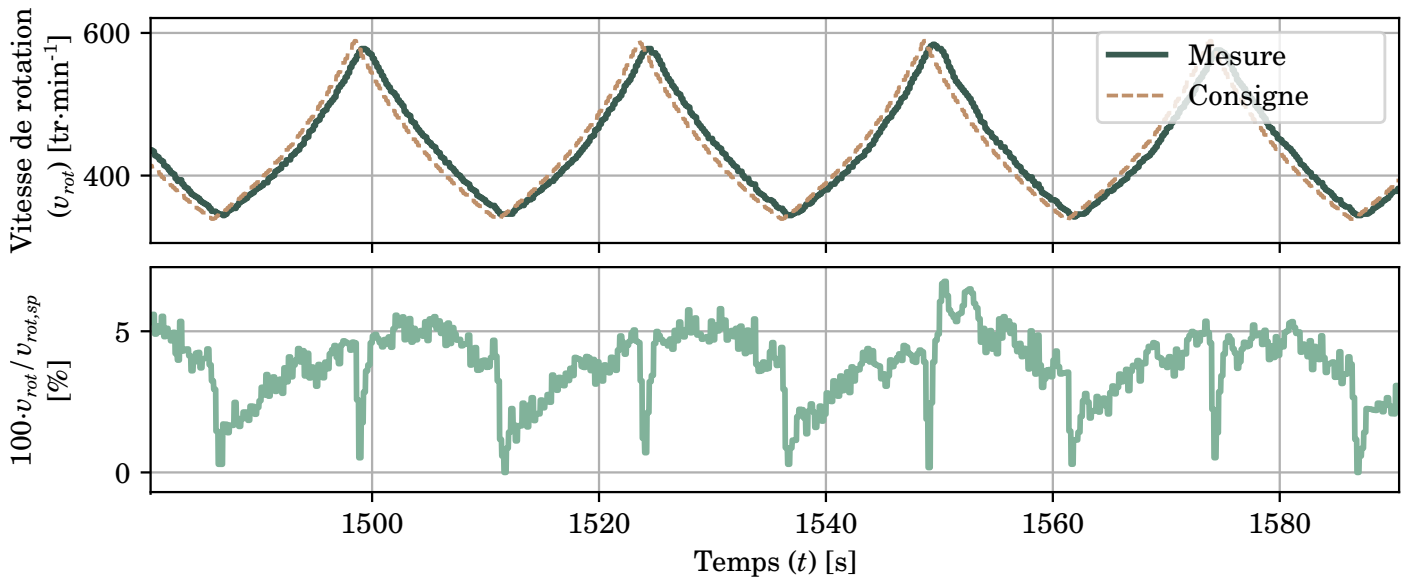


FIGURE 2.23 – Consigne et mesure de vitesse de rotation, et écart entre les deux, pour un essai à vitesse linéaire de  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et vitesse de balayage de  $16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## Force normale de contact

La force normale de contact est appliquée en deux étapes :

1. A vitesse de rotation nulle, le pion est mis en pression contre le disque en cuivre à  $\pm 3$  N de la consigne appliquée.
2. Une fois le disque en rotation et le pion en mouvement de balayage, une force de contact est enregistrée dans un tableau à une fréquence de 20 à 50 Hz. La force moyenne est alors calculée lorsque le tableau est plein, puis corrigée en faisant descendre ou monter le vérin linéaire pendant  $\pm 30$  ms. Enfin, le tableau est vidé et l'opération recommence. Ce procédé permet notamment de corriger la force de contact, par exemple lorsque le pion s'use (rappelons que 1 mm usé à une raideur de  $12 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$  équivaut à une chute de 12 N de la force de contact), mais aussi de modifier  $F_N$  pendant l'essai.

La figure 2.24 donne un exemple de mesures de la force normale. Trois tracés représentent la consigne de 90 N, les mesures filtrées avec un filtre passe-bas de type Butterworth d'ordre 4 et de fréquence de coupure de 0,5 Hz, et les mesures lissées sur 2000 échantillons (20 s). On observe que les mesures filtrées sont encore très dispersées, mais lorsque les mesures sont lissées la force de contact est à  $\pm 5$  N de la consigne. Sur plusieurs moyennes des mesures, la force de contact lissée respecte la consigne à moins de 10 %.

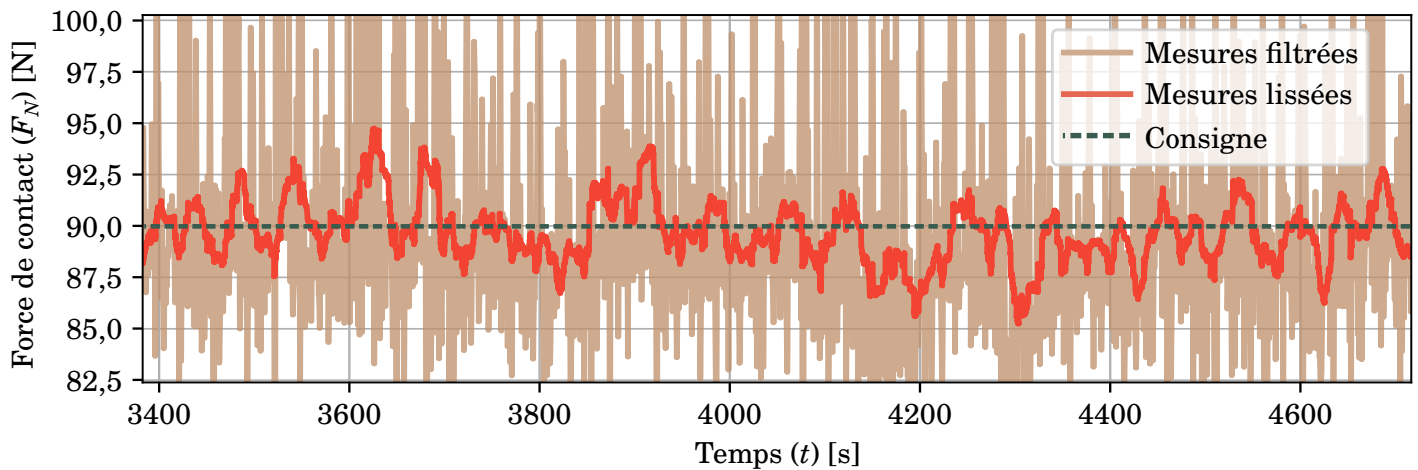


FIGURE 2.24 – Consigne, mesures filtrées et mesures lissées de la force normale  $F_N$  pour un essai dont la consigne est de 90 N.

## Courant d'alimentation

La régulation de courant est faite par l'alimentation. L'erreur moyenne entre la mesure et la consigne sur dix essais menés sous différentes conditions varie entre 1 et 5 %. Les essais avec l'erreur la plus importante sont ceux pour lesquels de nombreuses ruptures de contact sont observées.

### 2.3.3 Acquisition des données

Dans le programme LabVIEW, des variables globales sont créées sur les mesures faites pour permettre d'y avoir accès à travers l'ordinateur pour les enregistrer sur le disque dur. Pour cela, trois fichiers sont créés avant le début d'un essai :

1. Un fichier de configuration indiquant la spécificité et la configuration de l'essai, comme le nom de l'échantillon, la matière, la force de contact, la fréquence d'acquisition, la température de la pièce en début d'essai ou la masse avant et après essai. L'utilisateur peut aussi ajouter des commentaires sur le déroulement de l'essai. Ce fichier a pour vocation d'améliorer la traçabilité de l'essai et d'être lu par un *script* Python en utilisant la bibliothèque [ConfigParser](#).
2. Un fichier spécifique aux mesures de température faites sur le disque. Ces mesures sont enregistrées à une fréquence de 10 Hz puisque la température du disque évolue lentement (inertie très importante) et qu'une précision temporelle n'est pas nécessaire.

3. Un fichier sur lequel les autres mesures ( $F_N$ ,  $a_x$ ,  $T_1$ ,  $r_p$ , etc.) et les valeurs de consigne ( $v_{rot,sp}$ ,  $I_{sp}$ , etc.) sont enregistrées à une fréquence d'écriture de 100 Hz, c'est à dire la fréquence d'échantillonnage la plus importante parmi les mesures faites.

Les mesures sont enregistrées sous forme de trames de données. La première ligne du fichier renvoie au nom des différentes colonnes, puis chaque ligne représente un enregistrement fait. La première colonne donne toujours l'heure à laquelle l'enregistrement a été réalisé (Heure :Min :Seconde, Milliseconde). Le tableau 2.9 regroupe les fréquences d'échantillonnage différentes des mesures observées dans les trames de données. On observe notamment que les mesures qui peuvent fluctuer rapidement ont la fréquence de cadencement la plus rapide qui est gardée constante. Comme cela a été décrit précédemment, la priorité est mise sur ces mesures tandis que la fréquence d'acquisition n'est pas constante pour les autres mesures. Par exemple, les mesures de température sont actualisées avec un écart temporel de 0,02 s à 0,05 s. Sous cette fréquence d'enregistrement, le fichier des mesures et consignes a une croissance de  $16 \text{ kO}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Mesure	$f_a$ [Hz]	Mesure	$f_a$ [Hz]	Mesure	$f_a$ [Hz]
$F_N$	100	$I$	100	$T_1$	50-20
$F_T$	100	$V$	100	$T_2$	50-20
$a_x$	100	$v_{rot}$	5	$T_3$	50-20
$a_y$	100	$r_p$	20-10	$T_A, T_B..T_Z$	5-10
$a_z$	100	$C$	5		

TABLEAU 2.9 – Mesures et fréquences d'actualisation (ou d'échantillonnage) observées dans les trames de données.

## 2.3.4 Interface graphique

### Généralités

La figure 2.25 montre une capture d'écran de l'interface graphique prise lorsque le banc est en fonctionnement. Pour des raisons de lisibilité et d'ergonomie, l'interface graphique est construite à partir de deux fenêtres, une pour les commandes et l'autre pour le contrôle, chacune constituée d'onglets.

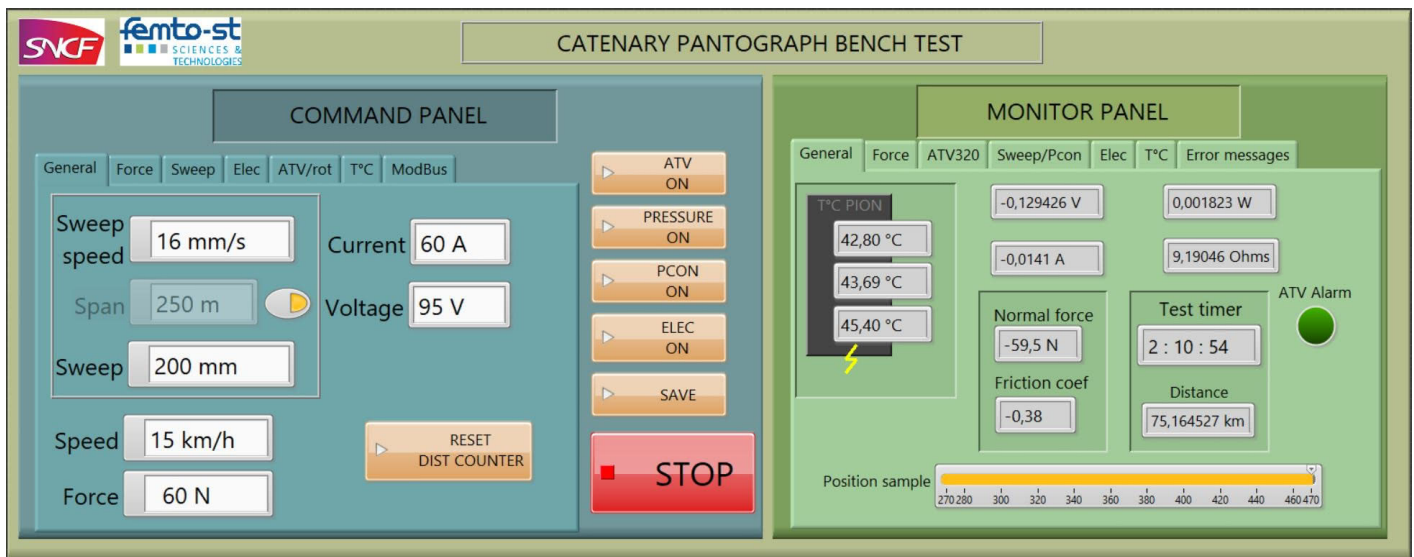


FIGURE 2.25 – Interface graphique permettant de contrôler le banc d'essai.

### Fenêtre de commande (*Command panel*)

A gauche se trouve l'interface de commande composée de sept onglets. L'onglet principal permet d'activer l'ensemble des actionneurs, la sauvegarde ou d'arrêter l'essai. C'est aussi sur cet onglet que les valeurs de l'essai sont saisies par l'utilisateur. Les six autres onglets permettent d'accéder à des commandes spécifiques aux différents actionneurs, systèmes de mesures ou protocoles de communication. Les valeurs sont remises à des valeurs par défaut pour des raisons de sécurité (actionneurs désactivés et courant et vitesse de rotation mis à zéro par exemple).

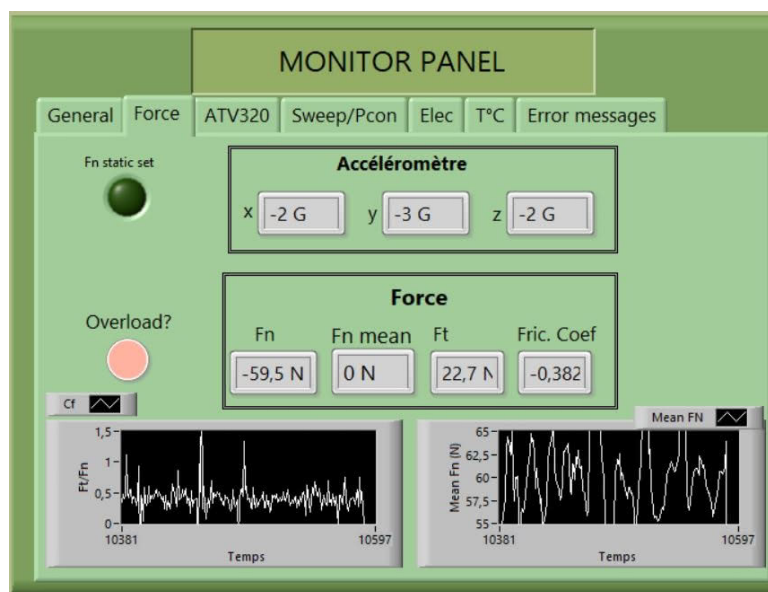


FIGURE 2.26 – Fenêtre de contrôle spécifique aux vibrations en x, y et z et aux forces normale et transversale de contact.

### Fenêtre de contrôle (*Monitor panel*)

A droite une fenêtre de contrôle donne un visuel sur les différentes mesures, sous forme d'indicateurs numériques ou de graphiques déroulants. Un onglet général donne une vue d'ensemble sur les principales mesures telles que la force de contact, les températures du pion, le courant, la tension, le coefficient de frottement, et permet de connaître la durée du test et la distance parcourue. Par ailleurs, six autres onglets offrent un aperçu détaillé des mesures faites sur les différents systèmes. Comme on peut l'apercevoir sur la figure 2.26, une fenêtre consacrée aux mesures des vibrations en x, y et z et aux mesures de forces normale et transversale de contact permet de lire le coefficient de frottement ou la force moyenne sous forme numérique ou de graphiques déroulants.

## 2.4 Exemple représentatif d'un essai

Comme indiqué sur la figure 2.27, un essai commence à vitesse de rotation nulle et avec le pion soumis à une pression de  $\pm 3$  N de la consigne (1). Le disque est mis en rotation suivant une accélération régulière et lente afin de limiter le couple fourni par le moteur (2). Pendant cette accélération, le pion commence à suivre son mouvement de translation (3). Une fois la vitesse linéaire atteinte (4), c.à.d. la vitesse de consigne, les consignes de courant et de tension de l'alimentation sont envoyées (5). La phase initiale de l'essai est terminée et le pion suit maintenant un mouvement de balayage entre sa position interne (6) et externe (7). De manière synchronisée, la vitesse de rotation suit des rampes de décélération (6) et d'accélération (7).

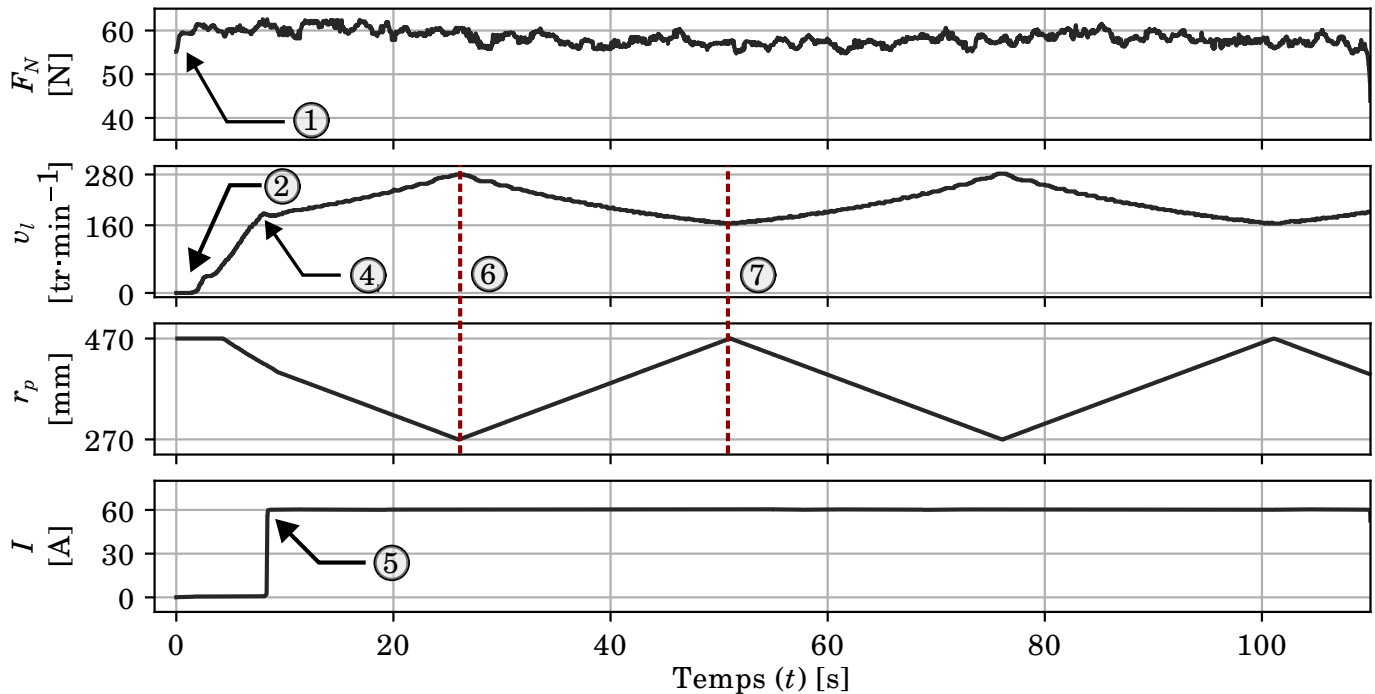


FIGURE 2.27 – Exemple d'un début d'essai (nuance A,  $F_N=60$  N,  $I=60$  A,  $v_l=30$  km·h<sup>-1</sup>,  $v_b=8$  mm·s<sup>-1</sup> et  $k=4$  N·mm<sup>-1</sup>).

## 2.5 Conclusion

Cette section décrit un banc d'essais développé et utilisé tout au long de cette thèse. Des actionneurs et des systèmes de mesures pilotés par un contrôleur temps réel cRIO permettent de faire des essais expérimentaux d'usure et d'échauffement sur un contact carbone-cuivre tel qu'il est retrouvé sur une LPC. Différentes stratégies ont été mises en place pour piloter l'ensemble des actionneurs et tous les moyens de mesures ont été caractérisés, en étant accompagnés de calculs d'incertitudes. La partie logicielle a été pensée de façon à être pérenne et facilement modifiable pour de futures adaptations ou corrections.

Les valeurs limites atteintes pendant cette étude sont affichées et comparées avec des valeurs retrouvées en ligne (tableau 2.10). On peut observer une grosse différence entre certaines d'entre elles, notamment pour la vitesse linéaire  $v_l$ , le courant  $I$  et la vitesse de balayage  $v_b$ . Le courant est limité pour une question de représentativité d'échauffement. En effet, alors que sur le banc d'essais le contact reste fixe du point de vue du pion et balaie de manière répétée sur le disque, il se déplace dans une LPC le long d'un fil thermiquement neuf et balaie latéralement une bande. Cette dernière a une inertie thermique beaucoup plus importante que notre échantillon utilisé comme pion. Aussi, un courant trop élevé aboutirait à un échauffement et à une usure du pion qui ne seraient pas représentatifs ainsi qu'à un échauffement du disque trop important par rapport à la température ambiante à laquelle devrait être le cuivre. La limite des deux vitesses quant à elle est imposée par la limite structurelle du banc d'essais.

Ces limites ont été atteintes à la suite d'un long processus de modifications, d'améliorations ou de corrections qui font l'objet du prochain chapitre. Le protocole d'essai et la méthode de mesures pour les essais ont aussi demandé

beaucoup d'énergie. Ces cheminements font l'objet du chapitre suivant.

	$v_l$ [km·h <sup>-1</sup> ]	$I$ [A]	$F_N$ [N]	$v_b$ [mm·s <sup>-1</sup> ]	$k$ [N·mm <sup>-1</sup> ]
Banc d'essai FEMTO-ST	60	120	90	16	4-12
TER SNCF Regiolis 2N	0-160	1050	50-110	776	3-12 [29]

TABLEAU 2.10 – Valeurs limites du banc d'essais atteintes dans ces travaux et comparaison avec les valeurs retrouvées en ligne sur un train TER.





---

---

## CHAPITRE 3

---

# FIABILISATION ET MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

**P**ENDANT cette thèse, les travaux de développement et de mise au point du banc d'essais se sont articulés autour de trois axes majeurs :

1. Les évolutions structurelles du banc d'essais, qui ont été nécessaires pour le fiabiliser et le rendre robuste.
2. La mise au point d'une méthode de mesure de l'usure, qui est essentielle pour obtenir des résultats réalistes et précis sans compromettre l'essai.
3. L'élaboration d'un protocole d'essais pour aboutir à des conditions d'essais répétables.

Pour ces deux derniers points, un partenariat avec l'équipe de tribologie du Département de Mécanique Appliquées (DMA) de l'institut FEMTO-ST a été mis en place. De nombreux questionnements ont ainsi été discutés, allant de la préparation de la surface du disque jusqu'à la géométrie du pion et la méthode d'usinage utilisée pour les fabriquer.

---

### 3.1 Évolution structurelle du banc d'essais

---

#### 3.1.1 Maintien du disque

Le maintien du disque a été le plus gros défi de ces travaux. En effet, cette pièce a été délicate à faire usiner dans une entreprise extérieure, puisque son diamètre et son épaisseur font respectivement 1 m et 12 mm et que le cuivre est un matériau se déformant rapidement par stress thermique et contrainte mécanique. Dès sa réception, le disque comportait un défaut de planéité avec une amplitude d'un peu plus de 1 cm (mesurée au palpeur sur son rayon extérieur). Une fois mis en rotation, le disque n'était de ce fait pas équilibré, ce qui provoquait beaucoup de vibrations et de contraintes mécaniques. Il a donc été nécessaire de fabriquer un arbre solidement fixé à la structure du banc ainsi qu'une bride d'une grande circonférence pour aplanir le disque. Il était aussi nécessaire de trouver des roulements/roues permettant d'encaisser le balancement du disque et d'éviter que toutes les contraintes de ballotement soient concentrées au centre du disque. Enfin, le disque a été aplani par stress thermique et contrainte mécanique.

#### **Arbre et bride du disque**

Entre le renvoi d'angle et le disque, l'arbre consistait en un tube percé qui était emmanché dans un cylindre lui-même percé. Ces deux pièces étaient accouplées par une simple vis traversante et le tout maintenu dans son axe par un couplemètre. Cependant, il s'est très vite avéré que le couplemètre n'était pas adapté pour tenir le rôle de palier et

qu'une vis n'était pas suffisante pour subir un couple de plusieurs dizaines de N·m de manière continue. Comme le montre la figure 3.1 (a), le couplemètre a été placé à la sortie du moteur avec à sa place un arbre en acier maintenu par deux brides. Ces dernières ont été vissées à une plaque en acier, elle-même fixée à la structure du banc.

La bride initiale, constituée d'aluminium et venant épouser le disque sur quelques centimètres (voir figure 3.1 (b)) a dû être, elle aussi, remplacée. Une autre bride, plus robuste (figure 3.1 (c)), a donc été conçue pour maintenir le disque sur plus de la moitié de son rayon et ainsi le contraindre mécaniquement afin de l'aplanir (l'acier étant moins élastique que le cuivre).

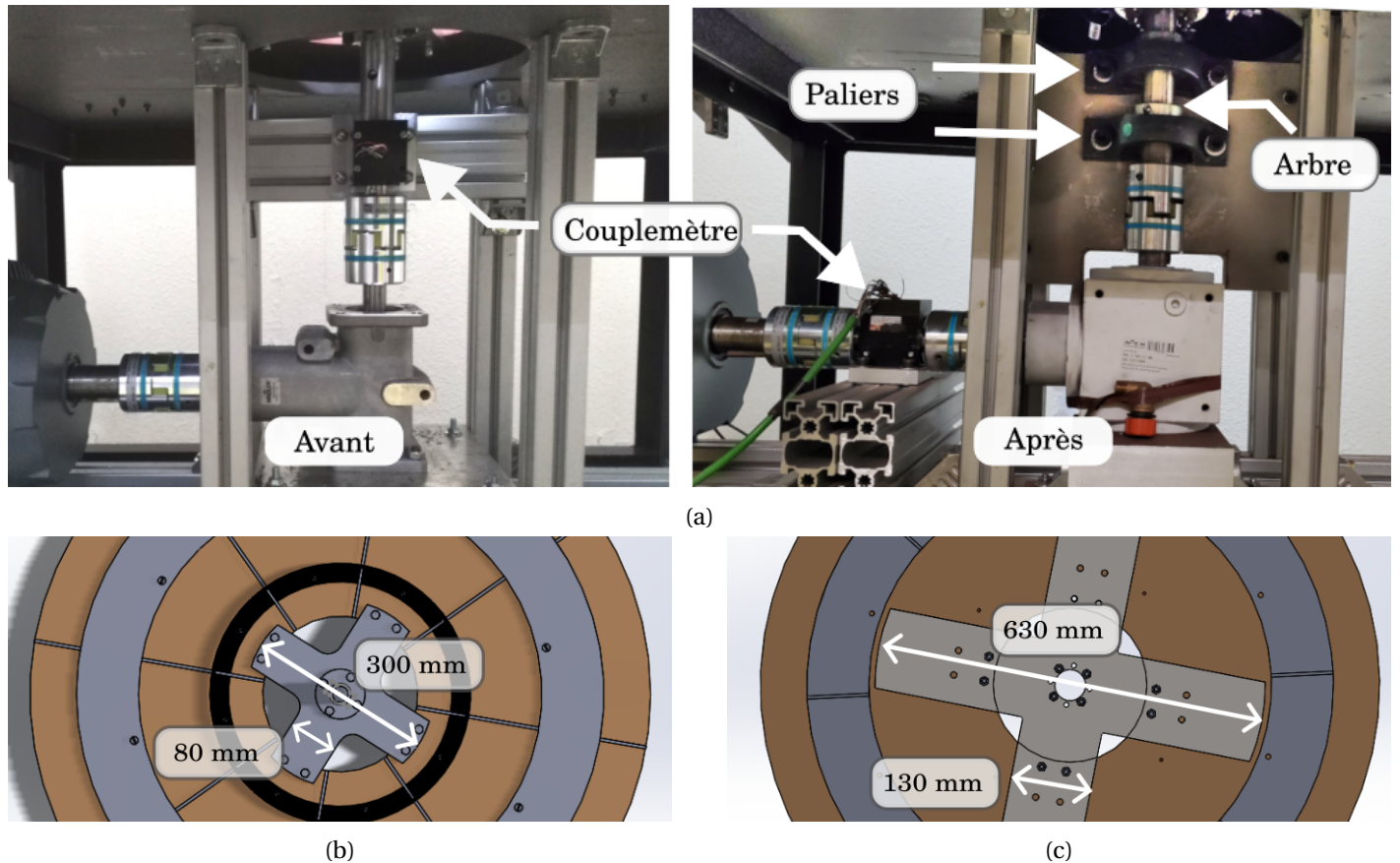


FIGURE 3.1 – (a) Ajout d'un arbre en acier et de deux paliers entre le renvoi d'angle et le disque en cuivre, (b) bride du disque par rapport à l'arbre en début de thèse et (c) après modification.

### Aplanissement du disque

Afin de corriger son défaut de planéité (de plus de 1 cm), le disque a été posé sur trois pieds et un profilé aluminium de 60 par 60 mm a été utilisé pour contraindre le disque dans un sens et dans l'autre (le disque ayant un défaut concave et convexe, voir figure 3.2). Tout en étant contraint, le disque a été chauffé à l'aide d'un décapeur thermique. Compte tenu de la surface et de l'inertie considérables, le disque n'a pu être échauffé que d'une quinzaine de degrés. Cependant, après redressement, le défaut de planéité a été réduit à 3 mm, ce qui a permis d'avoir un contact beaucoup plus stable et un disque plus équilibré lorsqu'il est en rotation.

### Points d'appui du disque

Le disque ayant une masse importante (110 kg), un rayon élevé et n'étant pas équilibré, l'arbre fixé aux paliers n'était pas adapté pour maintenir le disque dans son axe. Il était indispensable d'installer un appui près du rayon externe du disque pour encaisser son déséquilibre. Pour avoir un plan isostatique, c'est à dire un plan qui ne surcontraint pas le système, il a été décidé de répartir le poids du disque sur trois points de support formant un triangle équilatéral centré par rapport au disque. Pour éviter de dégrader le cuivre, une bande de roulements en acier a été fixée sur la partie inférieure du disque. Des goulottes ont également été prévues pour permettre le passage des fils de thermocouple.



FIGURE 3.2 – Disque sous contrainte mécanique et prêt à être chauffé pour faire une correction de planéité.

Le premier choix de support s’est porté sur des roulements en acier trempé (figure 3.3 (a)). Or, à très faible vitesse ( $90 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ , soit  $4$  à  $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  selon la position du pion), ces derniers ont directement usé la bande de roulement (voir figure 3.3 (b)). La photo de la figure 3.3 (c) montre les différents types de roues fabriquées essentiellement au laboratoire avec plusieurs matériaux et sous diverses formes et dimensions. Au total, les techniciens usineurs ont réalisé plus de 32 roues. Aucun industriel n’a pu fournir de roues correspondant à nos besoins, c’est à dire tournant à vitesse élevée (vitesse linéaire allant à plus de  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) et supportant de fortes contraintes mécaniques (un vrillement axial constant à cause de la courbe du disque et un écrasement répété à cause de sa non-planéité).

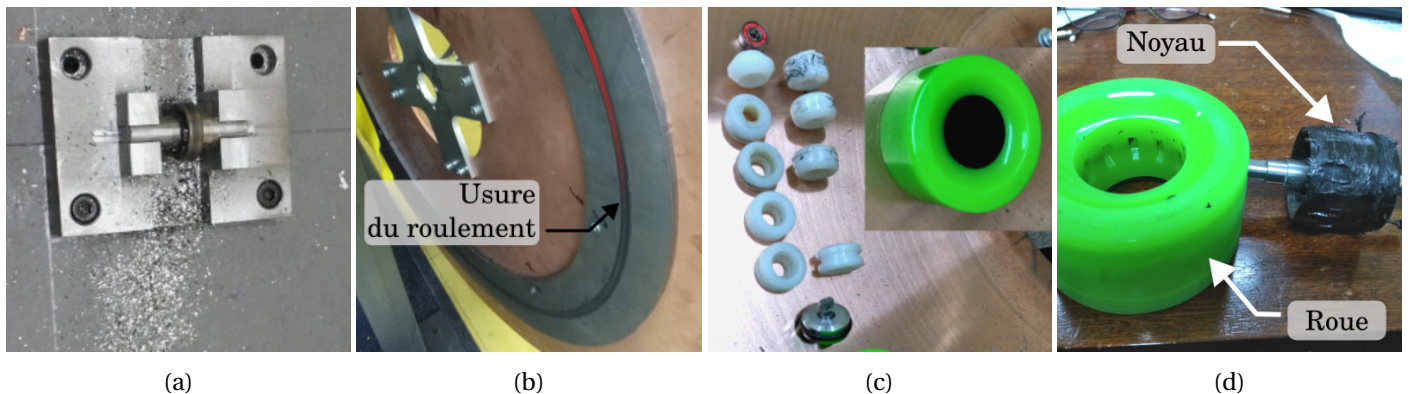


FIGURE 3.3 – Différents roulements et roues utilisés comme points d’appui du disque : (a) roulement en acier trempé et copeaux liés à l’usure de la bande de roulement, (b) bande de roulement usée, (c) roues fabriquées/achetées et testées comme support du disque et (d) roue de luge de rue cassée dont les ailettes du noyau ont fondu.

Finalement, les roues de *longboard*, et plus spécifiquement les roues de luge de rue, ont su répondre à nos besoins. Ces deux planches à roulettes sont des dérivés de *skateboard* conçues pour la descente sur route à haute vitesse. L’usager est pour cela en position debout sur une *longboard* et en position couchée sur une luge de rue (voir photo de la figure 3.4 (a)). Les roues de luge de route ont un diamètre plus important, faisant  $97 \text{ mm}$  dans ce cas, pour atteindre des vitesses plus élevées (record du monde de vitesse de  $157 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Ces roues, ayant un noyau en plastique dur entouré de polyuréthane de dureté 75a, nous ont donc permis de faire des essais sur plusieurs heures sans interruption.

- Une seconde problématique a ensuite été rencontrée, causée par les contraintes auxquelles est soumis la roue :
- Des contraintes de vrillement, induites par le mouvement rotatif du disque différent du mouvement rectiligne de la roue.



Figure 3.4(a) – Lugeur en descente sur une luge de rue.

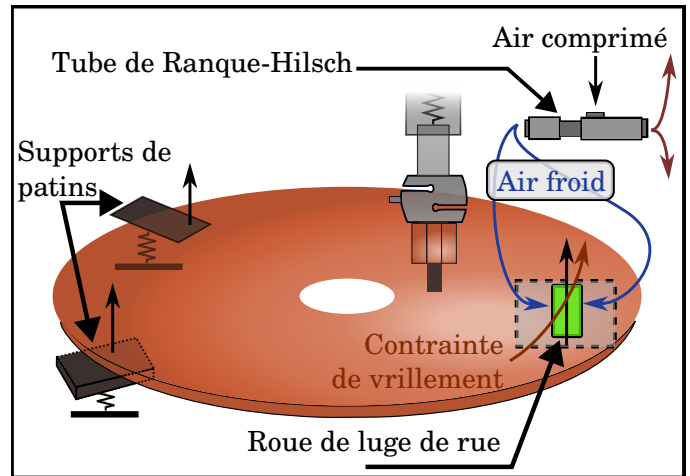


Figure 3.4(b) – Répartition des supports du disque en cuivre.

— Des contraintes d'écrasement, provoquées par la non-planéité du disque qui comprime à répétition la roue.

Ces contraintes entraînent un échauffement interne du noyau tel que le plastique peut fondre (figure 3.3 (d)) puisque la roue perd sa fonctionnalité lorsque les hauteurs des ailettes du noyau ne sont plus suffisantes pour entraîner la couche de polyuréthane. Afin de refroidir cette zone, un tube de Ranque-Hilsch, ou tube vortex, a été mis en place. Branché sur une arrivée d'air sec pressurisé, ce tube permet d'obtenir de l'air chaud sur une sortie et de l'air froid (en dessous de 0 °C) sur l'autre qui est dirigé sur la roue.

Comme schématisé sur la figure 3.4 (b), le ballon de l'atelier (d'un volume de 5 m<sup>3</sup> pour une pression de 10 bar) alimenté par un compresseur a été utilisé pour injecter l'air comprimé tandis que l'air refroidi, dont le flux est divisé en deux, est soufflé de part et d'autre sur le noyau. Une série de différents tests a pu mettre en avant que le banc fonctionnait parfaitement avec une seule roue située sous l'appui du pion. En outre, les deux patins permettant la circulation du courant, situés sur l'autre extrémité de la roue, font offices de deuxième et troisième support afin de former un triangle de sustentation.

### 3.1.2 Contrôle-commande du moteur et structure de transmission

#### Asservissement en vitesse

L'asservissement en vitesse du moteur est réalisé à partir d'un correcteur PID recevant en entrée la consigne de vitesse (à partir de la position du pion) et la mesure réelle de vitesse. Ce correcteur fournit alors une commande au moteur afin de réduire l'écart entre ces deux entrées. Deux solutions ont été testées sur le banc :

1. Le correcteur PID est implanté au niveau logiciel dans le CRIO : Dans ce cas, l'asservissement est réalisé à l'aide du logiciel LabVIEW à partir d'un bloc PID disponible dans la bibliothèque et la commande est envoyée au variateur de vitesse à l'aide du protocole MODBUS. Cette solution a mis en évidence une latence entre la consigne et la mesure, alors que l'amplitude crête à crête de la vitesse réelle reste inférieure à la vitesse de consigne. Ces phénomènes sont d'autant plus marqués lorsque la vitesse de rotation ou les rampes d'accélération s'intensifient.
2. Le correcteur PID intégré au variateur de vitesse AT320 est utilisé. Pour cela, la commande et la mesure sont envoyées sous forme de tensions analogiques 0-10 V au variateur, ce qui réduit le temps de réponse du système. Ainsi, ce mode d'asservissement permet de limiter le déphasage et les écarts entre les valeurs de consignes et les valeurs mesurées.

Dans les deux cas, un échauffement du moteur a été constaté et le remplacement du ventilateur couplé au moteur (c'est à dire dont la vitesse de rotation est liée à celle du moteur) par un ventilateur tournant à vitesse constante et élevée a permis de réduire cet échauffement.

L'utilisation du PID interne au variateur permet donc de rendre plus réactif le système et ainsi d'envisager d'augmenter la vitesse linéaire, ce qui induit toutefois des rampes d'accélération plus raides et un couple d'accélération sur le moteur et la chaîne de transmission plus important. Lors de la conception initiale du banc, aucun dimensionnement n'avait été réalisé en amont pour connaître la valeur du couple limite à respecter pour chaque élément. Cela a conduit à la rupture du renvoi d'angle initialement utilisé sur le banc, dont le couple admissible était de 40 N·m. Un état des



lieux sur le couple acceptable des différentes pièces mécaniques allant du moteur jusqu'au disque a donc été effectué. Il a ensuite été suivi d'un calcul du couple imposé en fonction de la position du pion, de la vitesse linéaire et de celle de balayage.

### Etat des lieux du couple admissible

Les caractéristiques du moteur indiquent que le couple nominal est de 60 N·m tandis que le couple d'accélération s'élève à 108 N·m. Une fois le renvoi d'angle remplacé, si l'on reprend la chaîne de transmission décrite sur la figure 2.4, les limites des éléments sont les suivantes :

- Accouplement souple : 317 N·m
- Couplemètre : service 100 N·m / maximal 150 N·m / destructif 300 N·m
- Renvoi d'angle : 196 N·m à 750 tr·min<sup>-1</sup> / 162 N·m à 1500 tr·min<sup>-1</sup>

Le couplemètre ainsi que la capacité d'accélération du moteur sont donc les deux couples limitants, dont le seuil maximal à ne pas dépasser dans un essai a été fixé à 100 N·m.

### Mesure du couple de frottement

Le couple imposé au moteur et à la chaîne de transmission est la somme de deux couples indépendants : l'un découle des différents frottements sur le disque (pions, roue, patins) et l'autre du moment d'inertie du disque et de l'accélération de ce mouvement de rotation.

Dans un premier temps, le couple de frottement est mesuré, grâce au couplemètre, lors d'essais où la vitesse de rotation est constante. Ce couple est indépendant de la vitesse de glissement et se calcule de la façon suivante :

$$C_{\text{frot}} = \sum_i^n F_{fi} \cdot l_i \quad (3.1)$$

avec  $C_{\text{frot}}$  le couple de frottement [N·m] et  $F_{fi}$  une force de frottement [N] à la longueur  $l_i$  [m] du centre du disque. La figure 3.5 (a) donne les valeurs minimales, moyennes et maximales de couple de frottement mesurées à différentes vitesses de rotation. Comme l'indique l'équation 3.1, le couple de frottement est bien indépendant de la vitesse de rotation. La figure 3.5 (b) affiche les valeurs minimales, moyennes et maximales de couple de frottement en fonction des valeurs respectives minimales, moyennes et maximales du coefficient de frottement  $\mu$ . Une régression linéaire appliquée à ces valeurs lorsque  $F_N$  est fixée à 80 N donne le couple de frottement comme égal à :

$$C_{\text{frot}} = 68,5 \cdot \mu + 8,0 \quad (3.2)$$

Sans frottement du pion, le couple de frottement induit par la roue et les deux patins est de 8,0 N·m. On peut supposer que ce sont les patins qui frottent le plus par rapport à la roue et que cette valeur peut légèrement fluctuer lorsqu'ils s'usent ou sont remplacés. Cette régression linéaire permet aussi de voir que le frottement du pion sur le disque est majoritairement responsable du couple de frottement. C'est ainsi une mesure alternative du frottement au niveau du pion et un moyen d'estimer le couple de frottement en fonction de la force de contact appliquée.

On peut également observer sur ces deux figures que la valeur moyenne de  $C_{\text{frot}}$  est voisine de 28 N·m. On choisira cependant par mesure de sécurité un couple de frottement général de 40 N·m pour établir le domaine d'étude permis. Le couple limite étant de 100 N·m, le couple d'accélération ne doit donc pas dépasser 60 N·m.

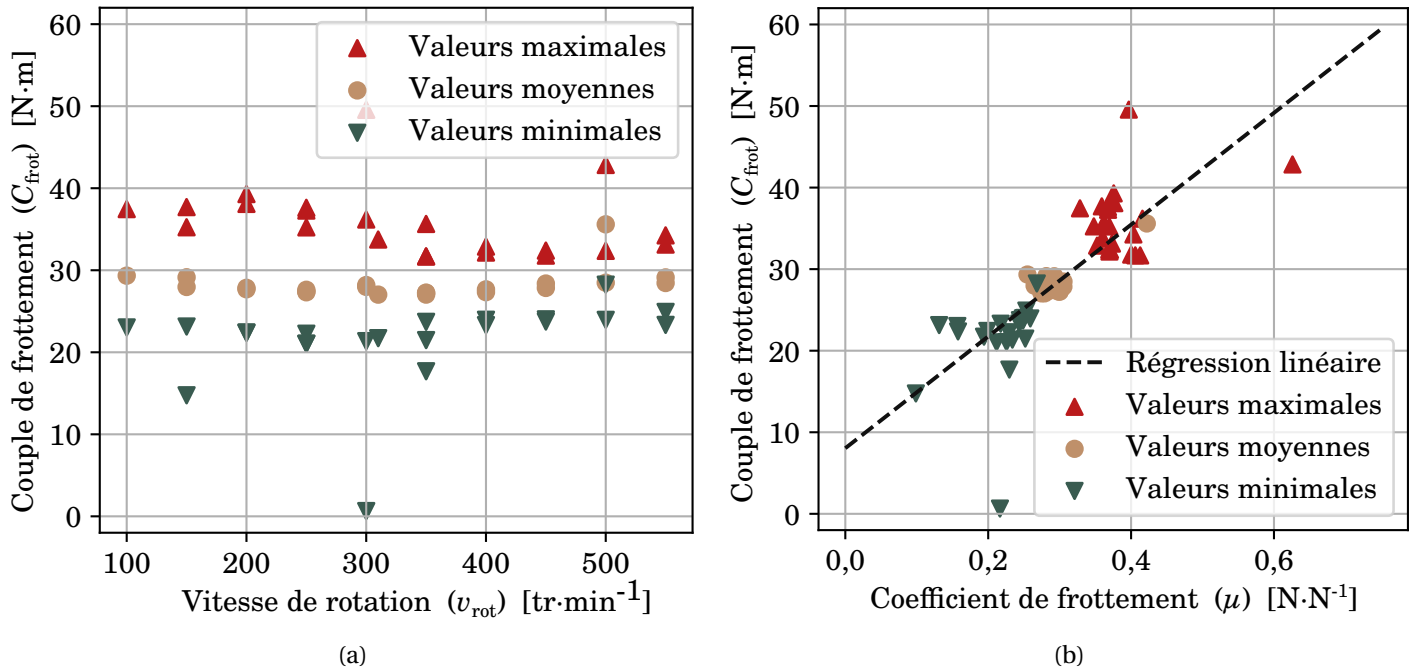


FIGURE 3.5 – Mesure du couple de frottement pour différentes vitesses de rotation ( $F_N=80$  N et  $I=60$  A ou  $I=0$  A). (a) Couple de frottement en fonction de la vitesse de rotation et (b) Couple de frottement en fonction du coefficient de frottement.

### Calcul du couple d'accélération

Le calcul du couple d'accélération  $C_a$  se fait en plusieurs étapes. Tout d'abord, le moment d'inertie du disque est calculé suivant :

$$I_{\Delta} = 0,5 \cdot m_{\text{tot}} \cdot r_{\text{dis}}^2 \quad (3.3)$$

avec  $I_{\Delta}$  le moment d'inertie [kg·m<sup>2</sup>],  $m_{\text{tot}}$  la masse totale du disque, de la piste de roulement et de la bride [kg] et  $r_{\text{dis}}$  le rayon du disque [m]. Avec  $m_{\text{tot}}$  de 115 kg et  $r_{\text{dis}}$  égal à 0,5 m, le moment d'inertie est de 14,4 kg·m<sup>2</sup>.

Ensuite puisque l'accélération de la rotation du disque est égale à :

$$a_r = \frac{d\omega}{dt} \quad (3.4)$$

il est possible d'exprimer  $a_r$  de la façon suivante :

$$a_r = \frac{\omega_{a,t} - \omega_{a,t-1}}{r_{p,t} - r_{p,t-1}} \cdot v_b \quad (3.5)$$

avec  $a_r$  l'accélération radiale [rad·s<sup>-2</sup>],  $\omega_{a,t-1}$  et  $\omega_{a,t}$  la vitesse angulaire aux instants  $t-1$  et  $t$  [rad·s<sup>-1</sup>],  $r_{p,t-1}$  et  $r_{p,t}$  le rayon du pion sur le disque aux instants  $t-1$  et  $t$  [m] et  $v_b$  la vitesse de balayage [m·s<sup>-1</sup>].

Enfin, les équations 3.3 et 3.5 nous permettent de calculer le couple d'accélération  $C_a$  de la façon suivante :

$$C_a = I_{\Delta} \cdot a_r \quad (3.6)$$

avec  $C_a$  le couple d'accélération [N·m].

### Vitesses linéaires, vitesses de balayage et amplitudes de balayage limites

La figure 3.6 (a) représente le couple d'accélération maximal en fonction de la vitesse linéaire, pour un balayage entre 270 mm et 470 mm du rayon du disque et à différentes vitesses de balayage. De plus, la figure 3.6 (b) donne les

tracés des couples d'accélération en fonction de la position du pion pour différentes vitesses linéaires et à une vitesse de balayage établie à  $16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Le domaine d'étude permis est représenté dans les deux cas sous forme de rectangle à fond grisé. Par exemple, on observe qu'avec cette amplitude de balayage fixée, la vitesse linéaire limite est de  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  pour une vitesse de balayage de  $16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

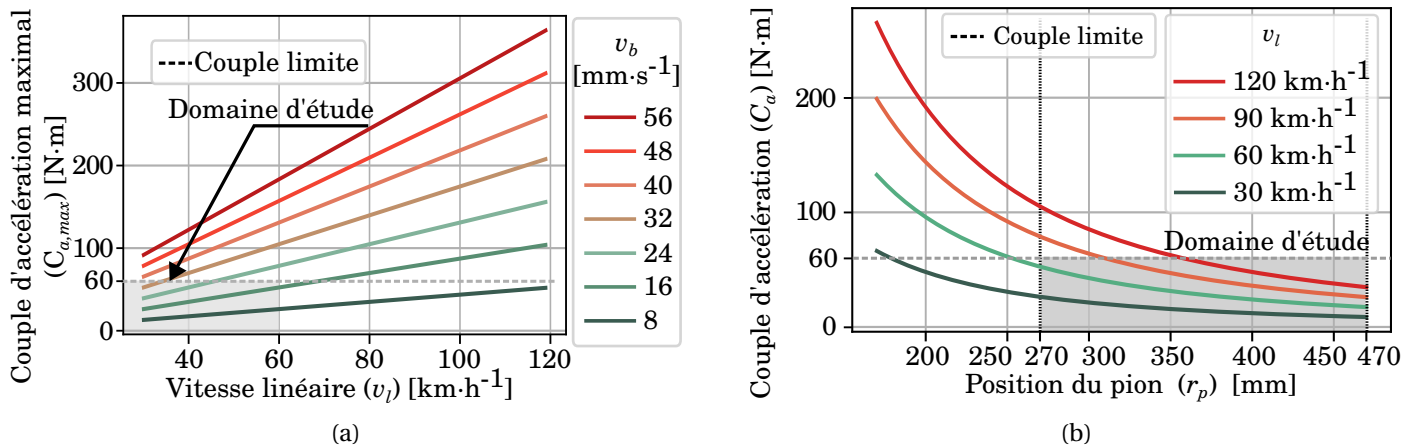


FIGURE 3.6 – Calcul du couple d'accélération : (a) valeurs maximales en fonction de la vitesse linéaire et pour différentes vitesses de balayages calculées et (b) couple en fonction de la position du pion, pour différentes vitesses linéaires ( $v_b=16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

En conclusion, les vitesses de balayage et les vitesses linéaires permettant de respecter le couple limite, sont respectivement de  $16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , pour une amplitude de balayage de  $200 \text{ mm}$ . Pour augmenter l'une de ces valeurs, il faudrait soit diminuer la valeur d'un des deux autres paramètres, soit remplacer le moteur (pour hausser son couple d'accélération) et le couplemètre (pour élargir son étendue de mesure) afin de repousser le couple limite.

### 3.1.3 Balayage du pion

La rigidité des pièces permettant le balayage a demandé une attention particulière. En effet, il a été constaté que l'échauffement mesuré lorsque le pion balaie dans un sens n'est pas le même que dans l'autre sens. La figure 3.7 (a) montre l'échauffement mesuré par le thermocouple 1 (à  $5 \text{ mm}$  du contact) et la variation de température en fonction du temps et en fonction de la position du pion sur le disque. On aperçoit que lorsque le pion progresse du centre du disque vers son rayon extérieur, deux échauffements rapides (deux pics de  $10$  et  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ponctués d'un refroidissement mènent à un échauffement de plus de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dans le sens inverse, à savoir lorsque le pion se dirige vers l'intérieur du disque, un refroidissement progressif d'environ  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  peut être observé.

Ce phénomène correspond à une modification des propriétés de contact entre l'aller et le retour et entache la représentativité avec le contact fil-bande. En outre, ces propriétés sont modifiées localement lorsque le pion se dirige vers l'extérieur du disque, puisque c'est à ce moment que des pics d'échauffement ponctuels et brutaux sont observés. Il est possible que les fils d'alimentation (quatre brins de  $16 \text{ mm}^2$  entourés d'une gaine, sur-entourée d'une gaine épaisse en plastique) fassent bras de levier sur le système permettant le mouvement de balayage (voir la figure 3.7 (b)). Ce bras de levier rompt le contact plan établi entre la surface du pion et celle du disque et donne un angle entre ces deux surfaces. Comme révélé par Chen.G et al. [88], cet angle a une incidence sur l'échauffement et l'usure puisque l'aire apparente et la pression de contact sont modifiées. La difficulté est donc ici de maintenir un contact plan le plus constant possible entre les deux surfaces.

Pour palier à cette problématique, l'ensemble du système de balayage a été modifié selon la figure 3.8 (a). (1) Le vérin de translation a été placé au plus près du disque tandis que (2) le vérin linéaire mettant en pression le pion est fixé à deux chariots libres. (3) Une pièce en "U" maintient ce même vérin tout en laissant (4) une liberté de mouvement dans le sens de rotation du disque afin que toute la force transversale puisse être mesurée par la cellule de pesée. (5) Une pièce lie le chariot fixe du vérin et les deux chariots libres afin de les maintenir parallèles. Enfin, (6) un rail de glissement, sur lequel coulisse la cellule de pesée de la force transversale par le biais d'un chariot, permet la descente et la remontée du pion. En outre, ce rail et la pièce en "U" permettent de mesurer toute la force transversale par la



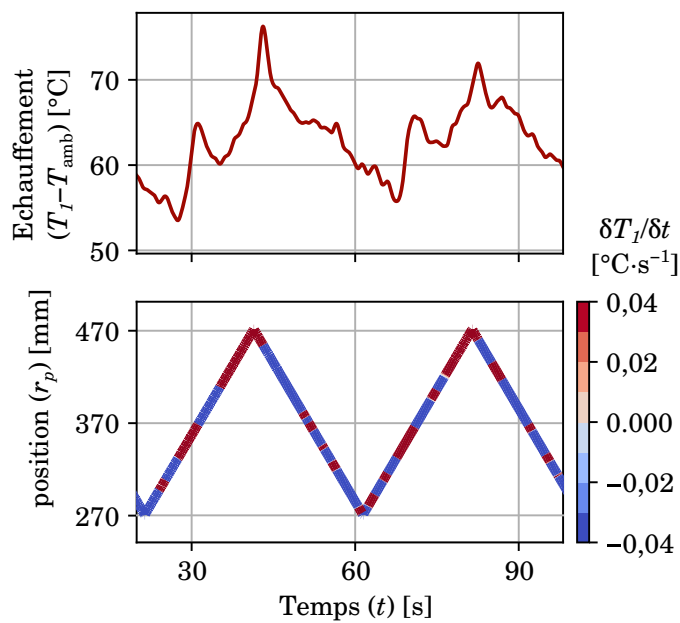


Figure 3.7(a) – Échauffement du pion et position du pion en fonction du temps.  $\delta T_I / \delta t$  est représenté par une échelle de couleur sur cette dernière courbe ( $F_N=60$  N,  $v_l=35$  km·h<sup>-1</sup>,  $I=75$  A,  $v_b=10$  mm·s<sup>-1</sup>).

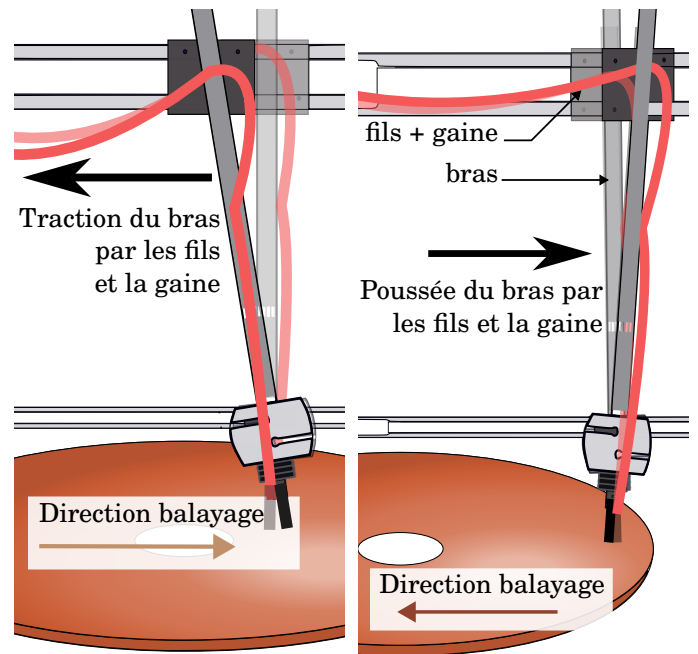


Figure 3.7(b) – Schéma décrivant l'angle entre la surface du pion et celle du disque, induit par le bras de levier des fils d'alimentation.

cellule de pesée. La figure 3.8 (b) permet de voir sur quelques minutes l'échauffement du pion sur le thermocouple 1 et sa variation temporelle en fonction de la position du pion. On observe notamment qu'une variation de température périodique s'établit en fonction de la position et du sens du balayage du pion. Néanmoins, l'amplitude est de moins de 4 °C alors que l'échauffement est beaucoup plus important puisque les conditions expérimentales sont plus sévères. Il y a donc une amélioration, mais la problématique de comportement du contact en fonction du sens de balayage reste néanmoins présente.

### 3.1.4 Méthode d'alimentation et résistance électrique du système

#### Représentativité par rapport au contact bande/fil d'une LPC

La circulation du courant, représentée sur la figure 3.9 (a), se faisait à l'origine par une alimentation en entrée et une charge à réinjection sur le réseau. L'idée était d'avoir un courant circulant dans le système et une puissance dissipée dans une charge de manière similaire au courant circulant dans la liaison pantographe caténaire pour être consommée par les moteurs du train. La charge à réinjection permettait donc de faire circuler un courant tout en développant une puissance importante sans avoir à la dissiper sous forme de chaleur. En effet, une majeure partie du courant continu est convertie en courant alternatif, mise en phase avec le réseau, puis réinjectée. Les alimentations et la charge se mettent chacune automatiquement en régulation de courant ou de tension (lorsque les deux valeurs sont atteintes il y a oscillation entre les deux régulations). Comme le représente la figure 3.9 (b), la régulation est dans cette configuration majoritairement faite en tension. Lorsque la résistance du système augmente (à cause de la fluctuation de la résistance de contact), la tension diminue légèrement (chute de tension aux bornes du contact) et le courant chute tandis que de petites étincelles liées à la rupture du contact sont observées.

La figure 3.10 affiche des acquisitions de tension, courant et vibrations mesurées en fonction du temps lors d'un essai en ligne (tension 1,5 kV continu) mené par l'AEF, sur une accélération d'une durée inférieure à 100 secondes et où la vitesse varie selon une rampe de 0 à 110 km·h<sup>-1</sup>.

Pendant les 20 premières secondes, le courant suit une rampe en variant de 0 à 1000 A tandis que la tension chute de 1830 à 1720 V. Une fois que le courant a atteint son seuil, le courant et la tension restent relativement constants avec une valeur respective de 1000 A (980-1000 A) et 1720 V (1710-1730 V) jusqu'à la fin de l'accélération et avec une

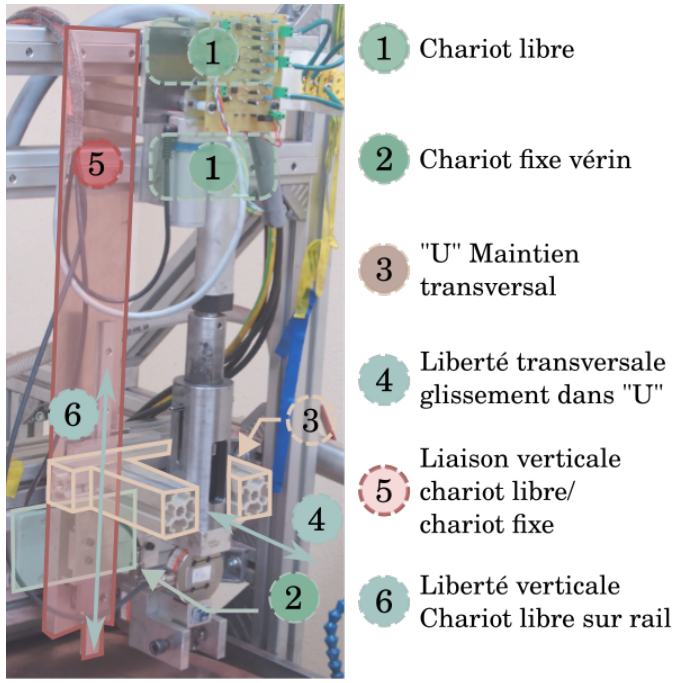


Figure 3.8(a) – Schéma de la mécanique et de l'assemblage des éléments permettant le balayage du pion tout en maintenant l'angle entre la surface du pion et celle du disque constant.

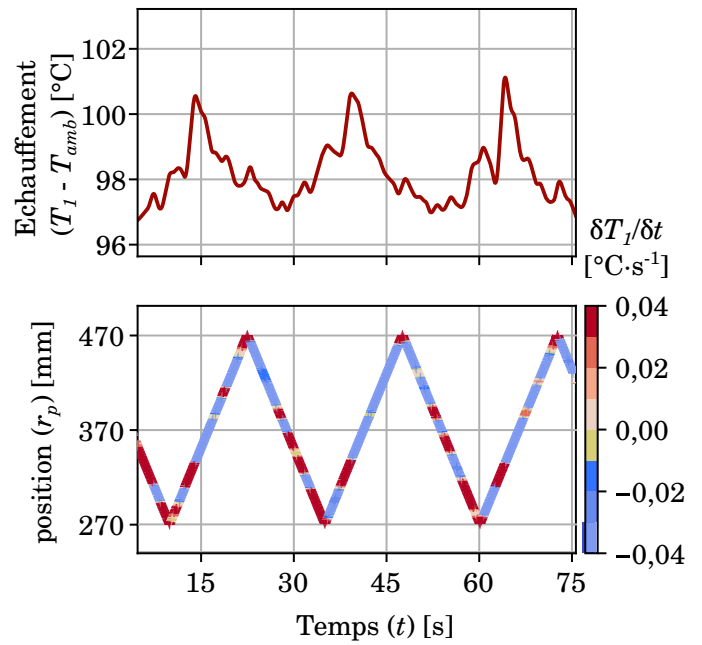


Figure 3.8(b) – Échauffement du pion et variation de  $\delta T_1 / \delta t$  en fonction du temps ( $F_N=90$  N,  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup>,  $I=120$  A,  $v_b=16$  mm·s<sup>-1</sup>).

résistance électrique du système de 1,7 Ω. On observe aussi que les vibrations ont une amplitude de plus en plus importante au fur et à mesure que la vitesse augmente, sans que le courant, la tension, et donc la résistance n'en soient affectés. En effet, dans les différentes études expérimentales les valeurs de la résistance de contact  $R_c$  sont comprises entre 10 et 200 mΩ ce qui est nettement inférieur à la résistance du système. Il est donc logique que ni le courant ni la tension ne soient impactés par une fluctuation de  $R_c$  due aux vibrations.

Comme il a été montré dans l'état de l'art (section 1.5.5), l'échauffement et les arcs électriques sont majoritairement responsables de l'usure du contact. Il est donc important d'avoir un courant continu constant, plutôt qu'une tension, afin d'être représentatif du contact fil/bande et d'avoir un échauffement par effet Joule ainsi que des arcs électriques réalistes. C'est pourquoi la charge est retirée du banc. Comme on peut le voir sur la figure 3.11 (a), la tension et la résistance du système fluctuent l'une par rapport à l'autre en ayant des amplitudes beaucoup plus petites que précédemment. En outre, on constate que la résistance du système a une valeur dont l'ordre de grandeur est le même que celui des résistances de contact observé dans l'état de l'art.

### Estimation des résistances de contact

Une étude sur les différentes résistances électriques du système a été réalisée afin d'estimer la résistance de contact entre le pion et le disque. Comme on peut le voir sur la figure 3.11 (b), le schéma électrique est composé d'une alimentation ainsi que des cinq résistances suivantes :

- (1) Entre la borne positive de l'alimentation et les patins, la première résistance  $R_{\text{fil,cosses}(+)}$  comprend celle des fils (4 brins de 16 mm<sup>2</sup>), des cosses et des contacts cosses/fils.
- (2) Deux résistances patin/disque  $R_{p,av}$  et  $R_{p,ar}$ .
- (3) La résistance du disque  $R_{\text{disque}}$ .
- (4) La résistance de contact pion/disque  $R_c$ .
- (5) La résistance de contact pion/pince  $R_{\text{pince}}$ , celle des cosses et de leurs résistances de contact et celle des fils  $R_{\text{fil,cosses}(-)}$  allant sur la borne négative de l'alimentation.

La résistance du disque en cuivre (3) est négligeable puisque  $R_{\text{disque}} \ll 1 \cdot 10^{-5}$  Ω. Les résistances (1) et (5) sont des résistances liées au serrage, fixes, et sont donc négligeables par rapport aux résistances (2) et (4) qui sont variables

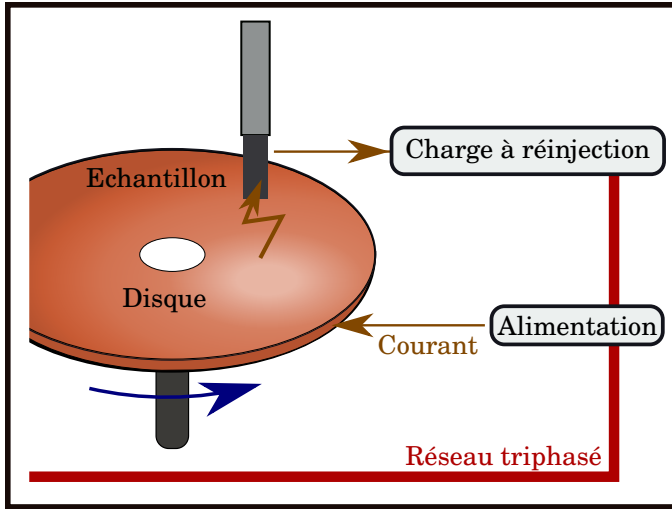


Figure 3.9(a) – Schéma du premier montage permettant la circulation du courant.

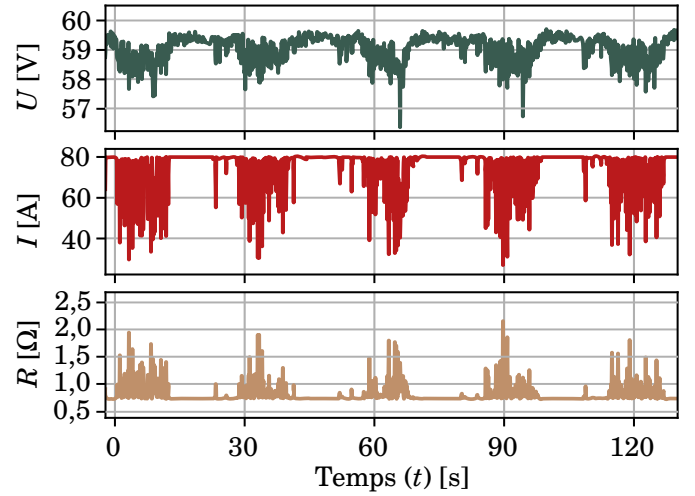


Figure 3.9(b) – Variations de tension, courant et résistance électrique en fonction du temps ( $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $80 \text{ A}$ ,  $60 \text{ V}$ ,  $60 \text{ N}$ ,  $4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ , essai avec charge à réinjection).

(contact glissant). Pour estimer la résistance des patins, des mesures ont été faites dans quatre configurations de câblage différentes :

1. Patins avant et arrière en série (figure 3.12 (a)) :  $R_{s,0} = R_{p,ar} + R_{p,av}$
2. Patin arrière et pion en série (figure 3.12 (b)) :  $R_{s,1} = R_{p,ar} + R_c$
3. Patin avant et pion en série (figure 3.12 (c)) :  $R_{s,2} = R_{p,av} + R_c$
4. Patins en parallèle et pion en série (figure 3.12 (d)) :  $R_{s,3} = (R_{p,av} // R_{p,ar}) + R_c$

Ces résistances  $R_{s,0}$ ,  $R_{s,1}$ ,  $R_{s,2}$  et  $R_{s,3}$  sont calculées par le rapport entre la valeur médiane de tension au borne de l'alimentation et la valeur médiane de courant lors des essais.

La figure 3.13 (a) représente les résultats des résistances  $R_{s,0}$ ,  $R_{s,1}$ ,  $R_{s,2}$  et  $R_{s,3}$  à différentes vitesses linéaires. On peut tout d'abord observer que  $R_{s,0}$  varie légèrement en fonction de la vitesse avec une valeur comprise entre  $38 \text{ m}\Omega$  et  $56 \text{ m}\Omega$ .  $R_{s,1}$ ,  $R_{s,2}$  et  $R_{s,3}$  suivent quant à elles une croissance exponentielle. Puisque ces trois résistances sont celles dans lesquelles  $R_c$  est impliquée, ce phénomène est induit par une augmentation de la résistance de contact pion-disque, qui évolue elle-même avec la vitesse linéaire. Le fait que  $R_{s,3}$  soit supérieure à  $R_{s,1}$  et  $R_{s,2}$  est surprenant car la mise en parallèle des patins devrait plutôt diminuer la résistance du système. Ce résultat pourrait s'expliquer par une modification des conditions de contact (surface du disque).

Les résistances de contact  $R_{p,av}$  et  $R_{p,ar}$  des patins avant et arrière sont calculées de la manière suivante :

$$R_{p,av} = \frac{1}{2} \cdot (R_{s,0} + R_{s,2} - R_{s,1}) \quad (3.7)$$

$$R_{p,ar} = \frac{1}{2} \cdot (R_{s,0} + R_{s,1} - R_{s,2}) \quad (3.8)$$

La résistance équivalente des patins en parallèle est ensuite calculée :

$$R_{p,eq} = \frac{R_{p,ar} \cdot R_{p,av}}{R_{p,ar} + R_{p,av}} \quad (3.9)$$

Enfin, en utilisant les résultats obtenus dans ces quatre configurations, la résistance de contact pion/disque  $R_c$  peut être estimée selon les trois façons suivantes :

$$\text{Config. 1 : } R_{c,1} = R_{s,1} - R_{p,ar} \quad (3.10)$$

$$\text{Config. 2 : } R_{c,2} = R_{s,2} - R_{p,av} \quad (3.11)$$

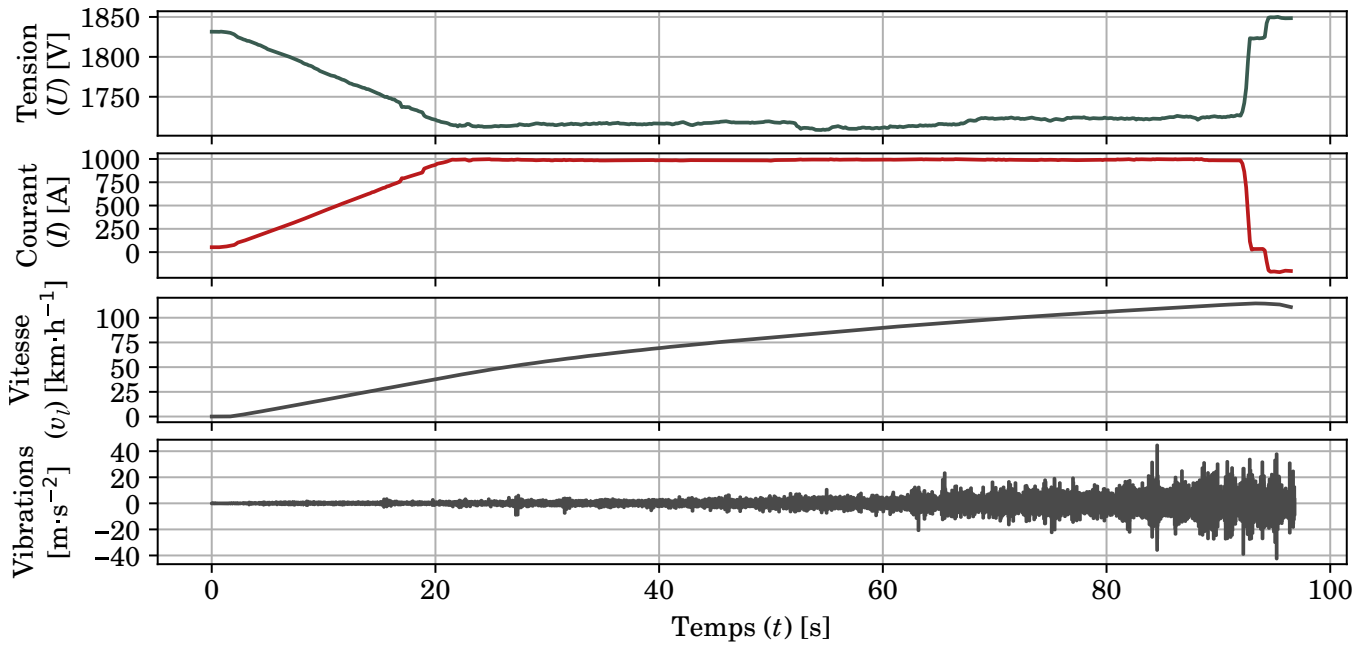


FIGURE 3.10 – Variations de tension, courant, vitesse et vibrations mesurées par l'AEF lors d'un essai en ligne en fonction du temps (1,5 kV DC).

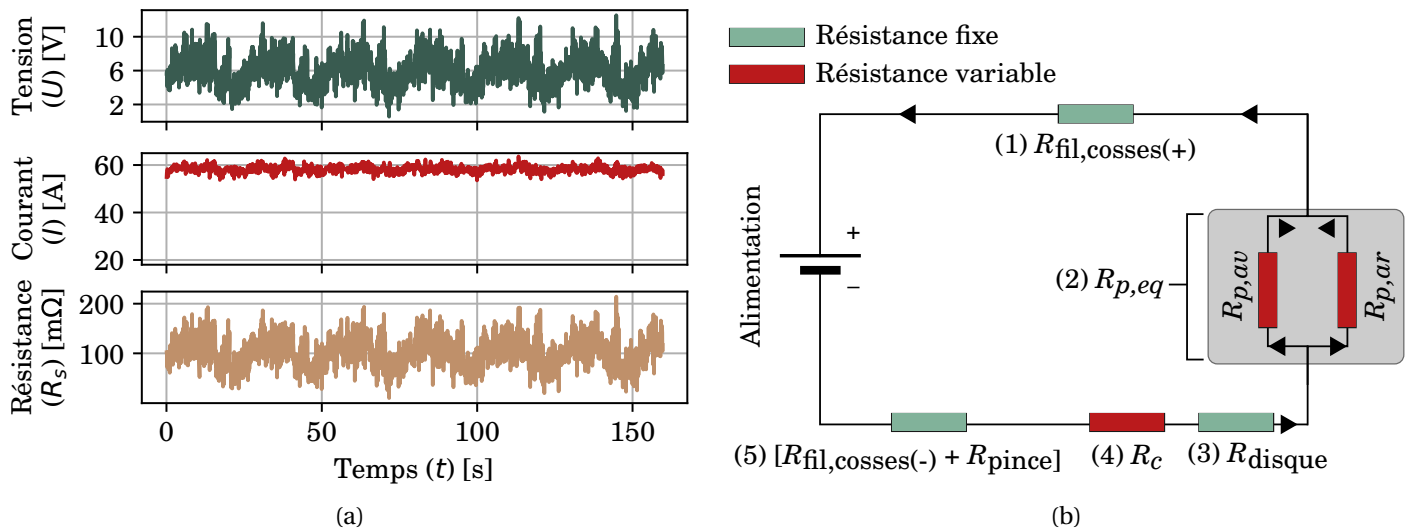


FIGURE 3.11 – (a) Variations de tension et de courant mesurées et résistance calculée en fonction du temps ( $v_l=90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $I=60 \text{ A}$ ,  $F_N=60 \text{ N}$ ,  $v_b=12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) et (b) circuit électrique équivalent du banc sans charge.

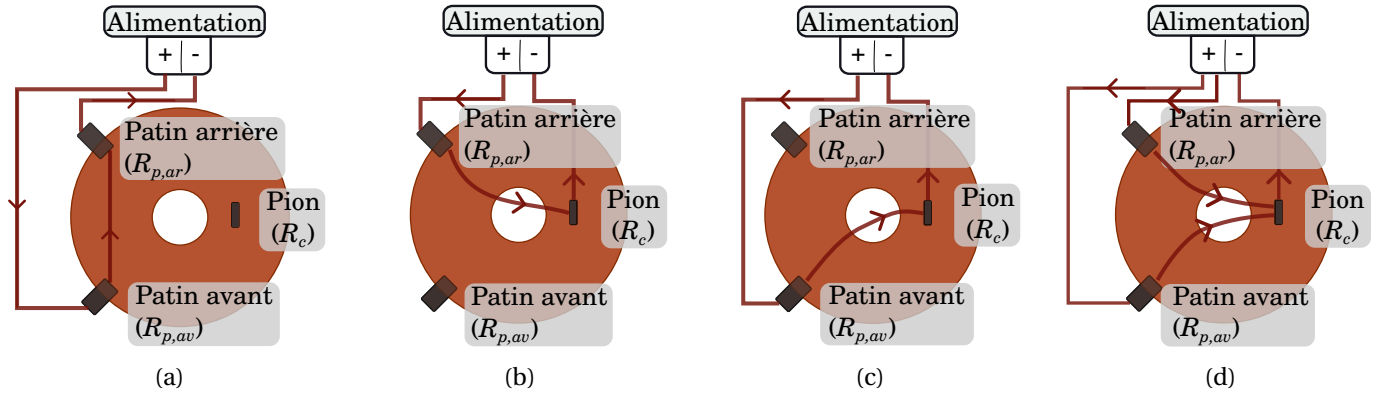


FIGURE 3.12 – Différents câblages des patins et du pion permettant de mesurer  $R_{s,0}$ ,  $R_{s,1}$ ,  $R_{s,2}$  et  $R_{s,3}$

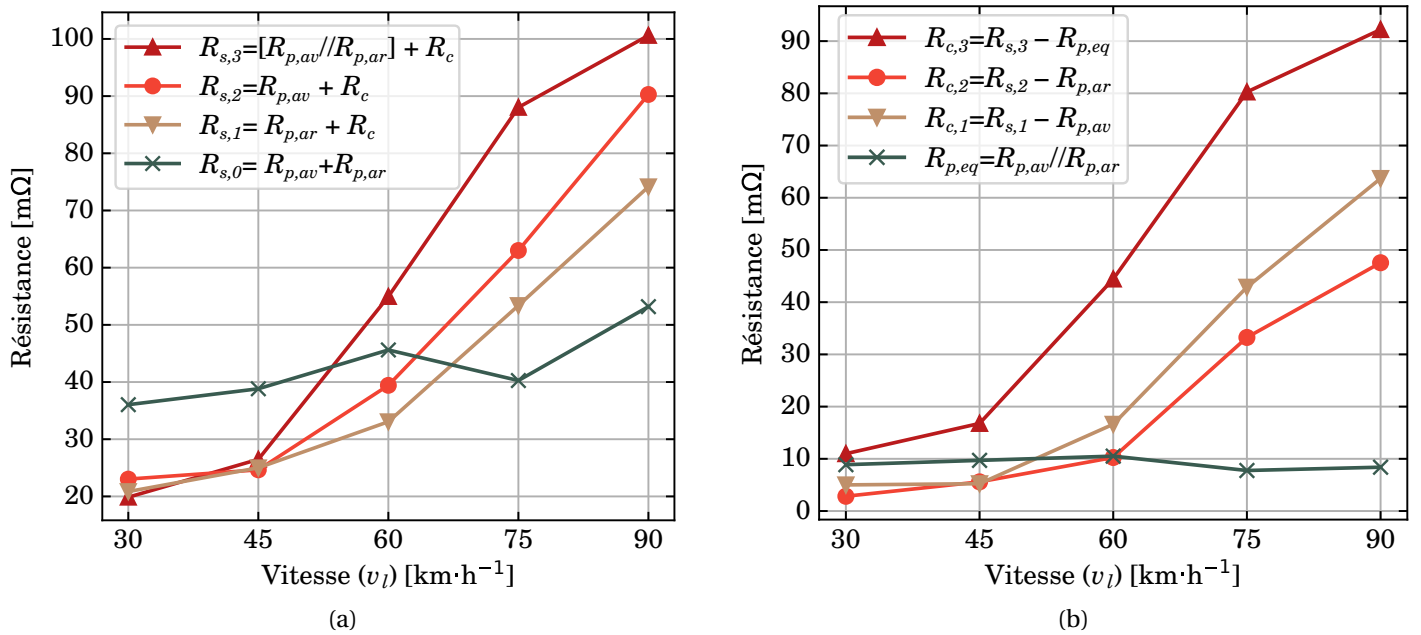


FIGURE 3.13 – (a) Résistances calculées dans différentes configurations, (b) Résistance de contact pion/disque et résistance équivalente des patins en parallèle  $R_{p,eq}$  en fonction de la vitesse linéaire ( $F_N=60$  N,  $I=60$  A,  $v_b=12$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=4$  N·mm<sup>-1</sup>).

$$\text{Config. 3 : } R_{c,3} = R_{s,3} - R_{p,eq} \quad (3.12)$$

Les résultats des différentes résistances calculées en fonction de la vitesse sont montrés sur la figure 3.13 (b). On peut noter que la résistance équivalente  $R_{p,eq}$  calculée à partir de  $R_{s,0}$ ,  $R_{s,1}$  et  $R_{s,2}$  est quasiment constante et a une valeur avoisinant 10 mΩ. La résistance de contact  $R_c$  augmente dans les trois cas de figure de manière exponentielle en fonction de la vitesse. Les valeurs obtenues par les équations 3.10 et 3.11 présentent un écart variant de 5 à 10 mΩ pouvant provenir d'une différence entre  $R_{p,av}$  et  $R_{p,ar}$ . Par contre, dans le cas où les deux patins sont mis en parallèle et que  $R_c$  est calculée par l'équation 3.12, il y a un écart beaucoup plus important avec les autres valeurs qui tend à augmenter avec la vitesse linéaire. Cet écart peut provenir soit de conditions de contact différentes entre les tests faits pour  $R_{s,1}$  et  $R_{s,2}$  et ceux effectués pour  $R_{s,3}$ , soit des patins qui ont été involontairement altérés lors de leur manipulation. L'usure ou la modification des patins pendant un test n'est pas envisageable car la durée d'essais est trop courte.

Ces mesures expérimentales mettent en évidence que la résistance de contact pion/disque  $R_c$  peut être calculée à partir de la tension et du courant mesurés aux bornes de l'alimentation en connaissant la résistance des contacts disque/patins. Cependant, les résultats sont très hétérogènes avec des tests qui ont été menés chacun qu'une seule fois.

Par conséquent, chaque essai devrait être répété plusieurs fois avec des patins différents pour obtenir une meilleure répétabilité et interprétation des résultats. Il faudrait aussi envisager d'ajouter un autre système de mesure de la tension puisque la précision de l'alimentation est de  $\pm 1$  V pour une mesure se trouvant généralement entre 0,5 et 10 V. Un capteur de tension 0-100 V ayant une meilleure précision pourrait être par exemple mis aux bornes de la pince et des patins. Cependant, par manque de temps, la résistance de contact disque/pion sera dans le reste de cette étude supposée égale à la résistance calculée à partir de la tension et du courant mesurés par l'alimentation retranchée de 10 m $\Omega$  (valeur correspondant de  $R_{p,eq}$ ).

## 3.2 Mesure de l'usure du pion

La première méthode pour déterminer l'usure repose sur la mesure de la masse de l'ensemble du pion et des thermocouples avant et après essai. Pour cela, une balance de précision KERN PLS 420-3F d'une précision de 1 mg est utilisée. Cette méthode a notamment l'avantage d'être rapide et de pouvoir être mise en œuvre sur le site. Néanmoins, il est très vite apparu que ce moyen de mesure n'est pas adapté pour connaître le comportement d'usure pendant un essai. En effet, pour faire une pesée il est nécessaire de retirer le pion et donc de rompre le plan pion/disque qui s'est établi pendant l'essai. Par conséquent, on peut connaître la masse perdue au cours d'un essai sans pouvoir estimer l'allure de l'usure. Or, comme on le verra par la suite, l'usure n'est pas toujours linéaire au cours de l'essai ce qui nécessite de développer un protocole de mesure permettant d'avoir plus de deux points de mesures.

Plusieurs contraintes doivent être prises en compte par ce protocole. Premièrement, il n'est pas possible d'enlever le pion pendant l'essai. En effet, en s'usant les surfaces du pion et du disque se retrouvent plan/plan et déplacer le pion romprait cette planéité. Deuxièmement, la mesure doit pouvoir être réalisée par une seule personne tout en étant rapide. Cela veut dire qu'elle ne doit pas dépasser la demi-heure, auquel cas soit l'essai deviendrait trop long, soit il ne serait pas possible de réaliser plusieurs mesures. Enfin, la géométrie donnée au pion doit être réaliste, c'est à dire que la fabrication de ces échantillons doit être réalisable.

### 3.2.1 Utilisation d'encoches de référence

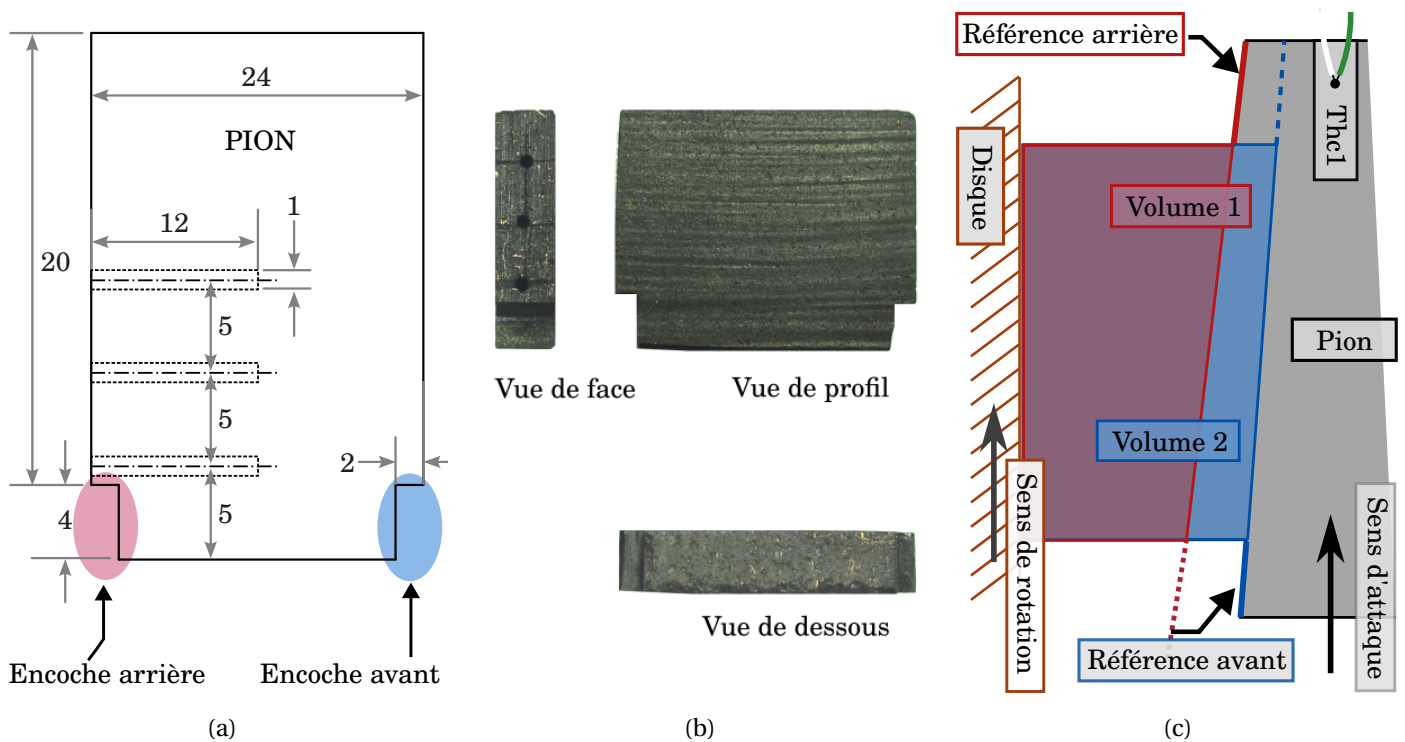


FIGURE 3.14 – (a) Schéma de découpe du pion (unité en mm), (b) Rendu visuel vues de face, de dessous et de profil et (c) schéma d'utilisation des encoches permettant de mesurer le pion.

Un protocole utilisant des surfaces de référence a été établi pour permettre de calculer le volume perdu à différents



moments d'un essai. Comme le montre le schéma de la figure 3.14 (a), la longueur de découpe du pion a été allongée de 4 mm afin de façonner deux encoches de 2 mm de profondeur de part et d'autre du pion. La hauteur des encoches est de 4 mm et ne peut aller au-delà puisqu'elle empiéterait sinon sur le trou prévu pour insérer le thermocouple 1. Les trois photos de la figure 3.14 (b) donnent un visuel des différentes faces d'un pion. Comme le montre la figure 3.14 (c), ce sont les surfaces des encoches plan à la surface de contact du pion qui sont utilisées comme plan de référence. Chaque encoche peut être utilisée comme plan de référence et permet de calculer le volume supérieur à chacun de ces plans. Il est important de noter que ces volumes sont distincts car comme on le verra, les deux plans de référence ont une pente et une hauteur qui sont rarement identiques.

### 3.2.2 Fabrication des pions en graphite

La première étape du protocole de mesure d'usure a été de vérifier si un pion ayant une telle géométrie pouvait être réalisé. En effet, le graphite est réputé pour être cassant tout en étant abrasif pour les outils de découpe. De plus, à la différence du métal qui produit des copeaux lors de sa découpe, le graphite génère de la poussière toxique pour l'utilisateur et très salissante pour les machines.

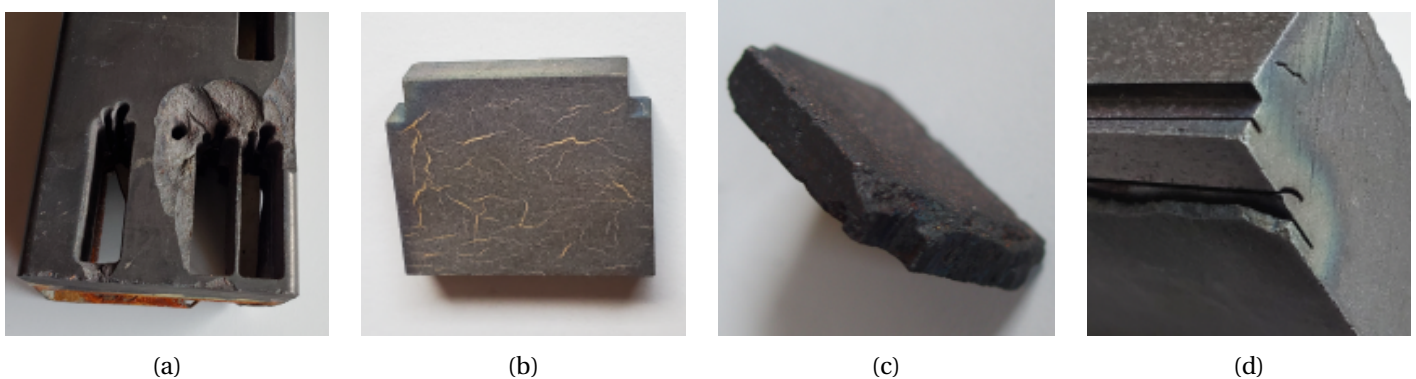


FIGURE 3.15 – (a) Essai de découpe d'un pion au jet d'eau, (b) découpe de pion idéale (par électro-érosion), (c) pion ayant des défauts et inutilisable en essai et (d) problématique rencontrée lors de tentatives de coupes au fil.

L'usinage et la découpe au jet d'eau ont été les deux premières méthodes employées pour réaliser la découpe des pions. La première permet de faire une découpe propre en utilisant une fraise de petite taille en carbure tournant à grande vitesse ( $50\,000\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ ) et d'usiner par petits pas (0,2 mm). Cela pose néanmoins deux problèmes, d'une part le travail est fastidieux et donc coûteux, et d'autre part cette méthode est très salissante pour la machine et la salle d'opération. Quant à la découpe au jet d'eau, elle présente l'inconvénient d'éclater le graphite du fait de ses propriétés friables (figure 3.15 (a)).

Puisque le graphite est conducteur, il a alors été envisagé de découper le pion au fil par électro-érosion. Cette méthode de découpe se déroule en plusieurs étapes :

1. Une pièce conductrice est plongée dans un liquide diélectrique (eau déionisée).
2. Cette pièce ainsi qu'un fil en laiton ou en cuivre sont chacun utilisés comme électrode avec une tension électrique très importante imposée entre les deux.
3. Le fil, tendu et se déroulant, se rapproche de la pièce jusqu'à ce qu'il y ait un claquage du liquide isolant sous forme d'arcs électriques.
4. Le fil s'enfonce dans la pièce et la découpe de manière très précise en ne laissant qu'une saignée à peine plus large que son diamètre.

La découpe par électro-érosion reste la solution la plus économique puisque la machine peut être programmée pour faire les coupes et demande peu de surveillance de la part de l'utilisateur. La pièce étant immergée dans l'eau, la découpe ne génère pas non plus de poussière. Comme on peut le voir figure 3.15 (b), cette méthode donne des rendus très propres où les surfaces de référence et de contact ont une planéité satisfaisante. Cependant, suivant la machine et la nuance, les résultats peuvent être décevants. Par exemple, le fil peut éclater les coins des pions, les rendant inutilisables pour l'essai (voir figure 3.15 (c)). Le fil peut aussi être "coincé" ou dévié par une partie du matériau

non conductrice (voir figure 3.15 (d)). Les encoches peuvent aussi être incurvées et nécessitent d'être surfacées par usinage. Néanmoins, même si la découpe par électro-érosion reste coûteuse à cause du temps de découpe ( $\pm 24$  h de travail pour 30 pions sur une nuance), elle reste pour le moment la meilleure méthode de production de pions.

### 3.2.3 Méthode de prise d'empreinte

La fabrication d'une empreinte consiste à faire une copie d'une fraction du volume du pion allant de la surface de contact jusqu'à au moins 1 mm au-dessus des encoches afin d'inclure les plans de référence. Dans un premier temps, une solution à base de silicone est utilisée pour faire une empreinte. Le produit, nommé F20 et fabriqué par Plastiform, est constitué d'une cartouche de deux réservoirs de liquide réagissant ensemble lorsqu'ils sont mélangés pour se solidifier. Comme pour la résine époxy ou la pâte utilisée par les dentistes pour faire des empreintes dentaires, la cartouche doit être insérée dans un pistolet muni d'une buse permettant de mélanger les liquides (voir photo 3.16 (a)). Le fabricant donne une précision de réplique de  $1 \mu\text{m}$  avec un silicone ayant une dureté de 50 shore A (très souple) et un allongement à la rupture de 80 % (capable donc de s'allonger).

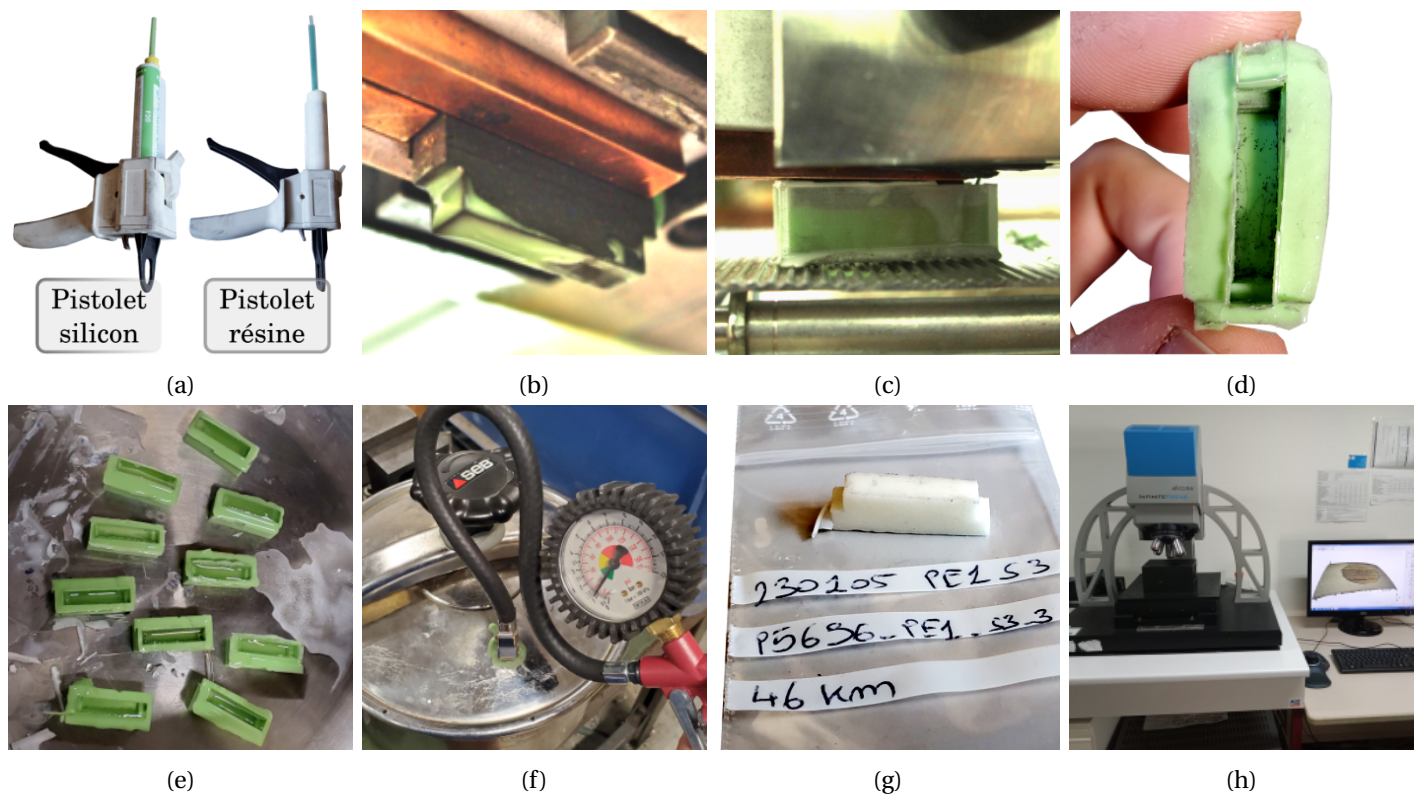


FIGURE 3.16 – Processus de fabrication d'une réplique du volume d'un pion : (a) Pistolets utilisés pour injecter le silicone et la résine. (b) Mouille de la surface du pion au silicone pour éviter les bulles d'air. (c) Trempe du pion dans un bain de silicone et (d) négatif du volume étudié. (e) Négatifs remplis de résine puis (f) mis sous pression dans un cuiseur vapeur pour faire remonter les bulles d'air. (g) Résine démoulée qui est une copie du volume étudié et (h) microscope utilisé à SUPMICROTECH-ENSMM de Besançon pour mesurer le volume.

Pour réaliser cette empreinte, la température du pion doit être de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  afin de permettre un temps de manipulation suffisant, la chaleur étant catalyseur de la solidification du mélange. Un temps de refroidissement du pion et de la pince est donc nécessaire si la température est trop élevée. Ensuite, la surface du pion est mouillée avec du F20 pour éviter les bulles d'air (figure 3.16 (b)) puis plongée dans un récipient rempli de ce mélange à l'aide d'une plate-forme de levage de laboratoire (figure 3.16 (c)). A  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , le temps de manipulation du mélange F20 est de 1 minute et le temps de prise de 8 minutes. Les gestes de mouillage du pion et de placement du récipient doivent donc être rapides et précis. Après le temps de prise, l'empreinte est démoulée (voir figure 3.16 (d)), puis mise dans un sachet plastique zippé, annoté de la date et du nom de l'essai ainsi que de la distance à laquelle l'empreinte a été faite.



### 3.2.4 Fabrication des répliques

Ces empreintes sont en fait des négatifs du volume étudié et sont utilisées comme moule pour en réaliser une copie. Pour cela, des répliques en résiné de polyuréthane beige (à base de Isocyanate et de Polyol) sont faites par le même procédé que celui utilisé pour le silicone. Les produits employés sont le RenCast FC 52 Isocyanate et le FC 52 Polyol. Comme on peut le voir sur la figure 3.16 (a), des cartouches à deux réservoirs sont préparées avec ces solutions afin d'être plus précis dans le dosage. De la même manière que pour le F20, les cartouches sont insérées dans un pistolet et une buse mélangeur est mise en bout de cartouche. Le FC 52 Isocyanate et le FC 52 Polyol sont des produits dangereux à l'inhalation, irritants pour les yeux, le système respiratoire et la peau et sont très nocifs pour les organismes aquatiques. Des gants et des lunettes sont donc indispensables lors de la manipulation. La précision du volume de la réplique par rapport à celle du moule n'est pas indiquée par le constructeur et un temps d'attente de 1 h doit être respecté avant démoulage.

Les répliques sont fabriquées une fois que plusieurs empreintes ont été effectuées. Les moules de silicone sont placés dans un cuiseur vapeur puis remplis de mélange d'Isocyanate et de Polyol (voir photo figure 3.16 (e)). Le cuiseur est alors refermé puis mis sous une pression légèrement supérieure à 1 bar afin de faire remonter les bulles d'air formées entre les empreintes et la résine (figure 3.16 (f)). La mise sous pression se fait par injection d'air et avec un très faible débit pour éviter de souffler et de renverser les empreintes remplies de résine.

Pour s'assurer que la résine soit bien solidifiée, les répliques sont démoulées le lendemain. Comme pour les empreintes en silicone, les répliques en résine sont stockées dans des sachets en plastique zippés, annotés du nom, de la date de l'essai et de la distance parcourue par l'échantillon pendant l'essai (voir figure 3.16 (g)). L'ensemble des sachets qui concerne un même essai est stocké dans un sachet plus grand annoté du nom et de la date de l'essai, du nom de l'étude dans lequel s'inscrit l'essai ainsi que des valeurs des différents paramètres (courant, force, fréquence d'enregistrement, etc.).

### 3.2.5 Étude au microscope

Lorsque le nombre de répliques est suffisant, elles sont emmenées à Besançon, dans les bâtiments de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (SUPMICROTECH-ENSM). Les locaux de cette école abritent d'une part une école d'ingénieurs et d'autre part différents départements de l'Institut FEMTO-ST dont le Département de Mécanique Appliquée (DMA). Ce dernier dispose d'un microscope optique 3D confocale de marque Alicona (voir photo figure 3.16 (h)) que l'on utilise pour étudier la topographie et les variations de couleurs des surfaces des échantillons. Plus spécifiquement, le microscope dispose d'un système optique à faible profondeur de champ qui, par la variation de la mise au point, permet de mesurer la hauteur de certaines zones. Une topographie précise (300 nm) est ainsi réalisée en déplaçant verticalement et horizontalement l'optique. La zone de mesure et les sensibilités des déplacements sont précisées par l'utilisateur. Le contraste et la luminosité sont aussi à fixer, et peuvent empêcher la mesure si ils sont mal réglés. Voici les réglages du microscope pour les études de surfaces réalisées :

- Objectif x5 (le plus grand disponible)
- Sensibilité verticale : 1  $\mu\text{m}$
- Sensibilité horizontale : 20  $\mu\text{m}$
- Contraste pour réplique : 0,4, Contraste pour graphite : 0,67
- Luminosité pour réplique : 250  $\mu\text{s}$ , Luminosité pour graphite : 200  $\mu\text{s}$

Comparés à la surface du pion, les profils habituellement étudiés sur le microscope sont globalement beaucoup plus petits. Les fichiers bruts obtenus pour une étude de surface sont très volumineux (500 Mo). L'interface utilisateur du microscope permet cependant de convertir le fichier dans différents formats dont le format *SURF*, ici utilisé. Les fichiers *SURF*, d'un peu moins de 50 Mo, sont nommés "AAMMJJ\_Netude\_Nessai\_D\_km.sur" (date "AAMMJJ", nom d'étude "Netude", nom d'essai "Nessai" et distance "D"). Les données sont alors analysées à l'aide d'un programme destiné à la visualisation et au traitement de ce type d'informations.

### 3.2.6 Analyse et mesure de volume

Gwyddion, un programme libre et open-source codé en python, est utilisé pour traiter les fichiers *SURF*. C'est un logiciel qui permet notamment l'analyse des champs de hauteur et qui intègre de nombreuses fonctions de manipulation de données. La version utilisée durant ces travaux est la 2.62-1.

La figure 3.17 permet de visualiser un exemple de tranche du volume que l'on peut obtenir et les différentes étapes du procédé de mesure qui sont les suivantes :

1. La topographie de la surface réalisée au microscope peut présenter des points noirs, (courbe bleu foncé de la figure 3.17 (a)). Les hauteurs de ces "trous", que le microscope n'a pas pu établir, sont estimées à partir des points l'entourant par une interpolation de Laplace (courbe rouge foncé de la figure 3.17 (a)).
2. La totalité de la surface est nivelée à partir du plan des surfaces de référence (courbe bleu foncé de la figure 3.17 (b)).
3. Une soustraction est faite sur l'ensemble des hauteurs pour que le plan des surfaces de référence soit à zéro (courbe rouge clair de la figure 3.17 (b)).
4. Le volume sur une zone localisée et dépassant le plan de référence est ensuite mesuré (fond rouge de la figure 3.17 (b)).

Pour aller plus dans le détail et donner une autre visualisation du processus d'analyse, les étapes réalisées pour mesurer le volume sont données dans l'appendice A.

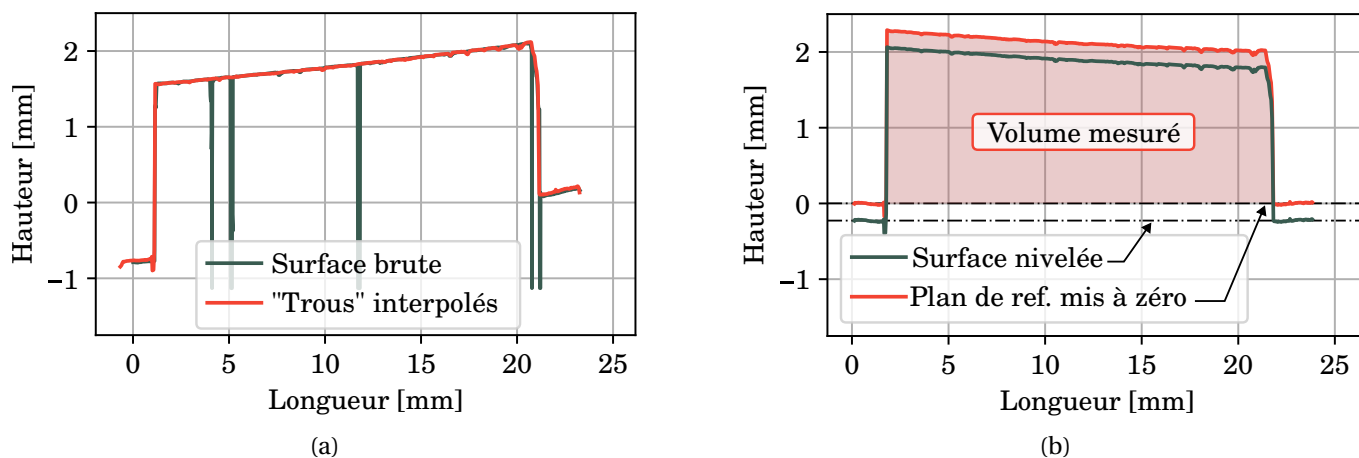


FIGURE 3.17 – Coupe du volume observée sur le programme Gwyddion et visualisation des différentes étapes permettant la mesure du volume. (a) Estimation et remplacement des points noirs et (b) nivellement de la surface de contact à partir de plan de référence.

### 3.2.7 Incertitude

L'incertitude de mesure du volume du pion est calculée en réalisant dix mesures sur un pion identique. L'écart entre la moyenne de ces résultats et chaque mesure est ensuite calculé puis représenté figure 3.18 et tableau 3.1. L'écart maximal avec la moyenne est de  $8,5 \text{ mm}^3$ , ce qui représente une erreur de 2,1 %. Alors que cette différence peut sembler au premier abord minime par rapport à la mesure, elle est est pourtant très importante. En effet, on mesure la perte de volume au cours du temps qui est, comme on le verra, souvent de moins de  $10 \text{ mm}^3$  entre deux points de mesures, voire certaine fois au cours d'un essai. Toutefois, six des dix écarts avec la moyenne sont inférieurs à  $1,7 \text{ mm}^3$ , alors que trois écarts sont supérieurs  $5 \text{ mm}^3$ . Par conséquent, le protocole de mesure est donc plutôt robuste.

Réplique	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volume ( $V$ ) [ $\text{mm}^3$ ]	402,3	400,8	400,3	397,7	393,4	398,6	391,1	407,6	400,7	398,36
$V - \bar{V}$ [ $\text{mm}^3$ ]	3,21	1,73	1,24	-1,38	-5,65	-0,52	-7,95	8,46	1,57	-0,73

TABEAU 3.1 – Valeurs de volume mesurées sur dix répliques d'un pion identique et différence entre  $V$  et  $\bar{V}$ .

Pour estimer l'incertitude, la dispersion  $u_{5,s}$  et la reproductibilité  $u_{5,rep}$  sont calculées avec les équations 2.17 et 2.18. La valeur obtenue de  $u_{5,s}$  est de  $2,1 \text{ mm}^3$  tandis que celle de  $u_{5,rep}$  est de  $4,7 \text{ mm}^3$ . Ainsi, l'incertitude totale, qui est la somme de  $u_{5,s}$  et  $u_{5,rep}$ , est de  $6,8 \text{ mm}^3$ . L'incertitude composée, retenue pour le reste de cette étude et avec  $k=2$ , est finalement de  $13,6 \text{ mm}^3$ .

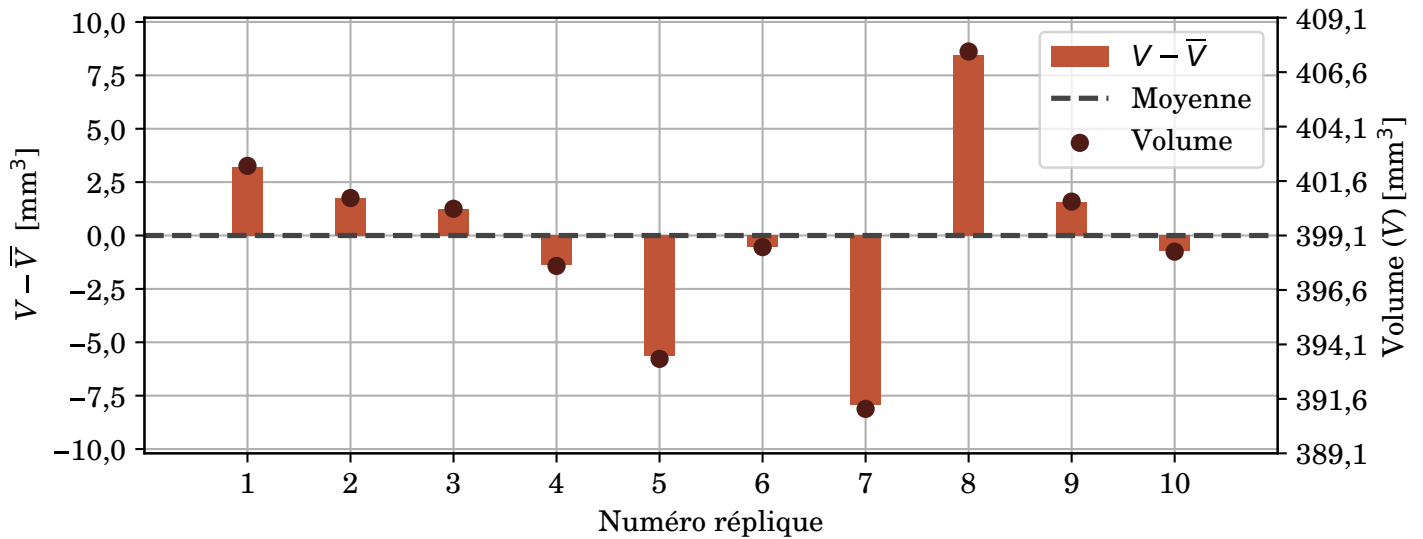


FIGURE 3.18 – Répétition de mesure de volume sur dix répliques réalisées sur un même pion.

### 3.2.8 Exemple de résultats

Des mesures de perte de volume en fonction de la distance parcourue sur deux essais sont données figure 3.19. D'une part, le tracé pointillé et les marqueurs carrés représentent les variations de volume calculées *via* les mesures de masse avant et après essai (calculées à partir de la masse volumique de la nuance). D'autre part, le tracé plein et les marqueurs ronds vides correspondent aux mesures de volume faites pour différentes distances au cours de chaque essai par la méthode expliquée précédemment. Enfin, pour chaque essai, une régression linéaire (tracée ligne interrompue) est appliquée sur les points où la perte de volume semble varier linéairement avec la distance. En effet, une perte de volume importante a été mesurée au début de chaque essai, particulièrement au début du test 2 où la perte de volume semble plus abrupte et rapide. On remarque qu'on ne peut pas établir la pente au début du test 1 puisqu'il manque des points de mesures. En revanche, une fois ces phases passées, on peut estimer dans les deux essais que l'usure est linéaire et qu'elle peut être estimée par régression linéaire.

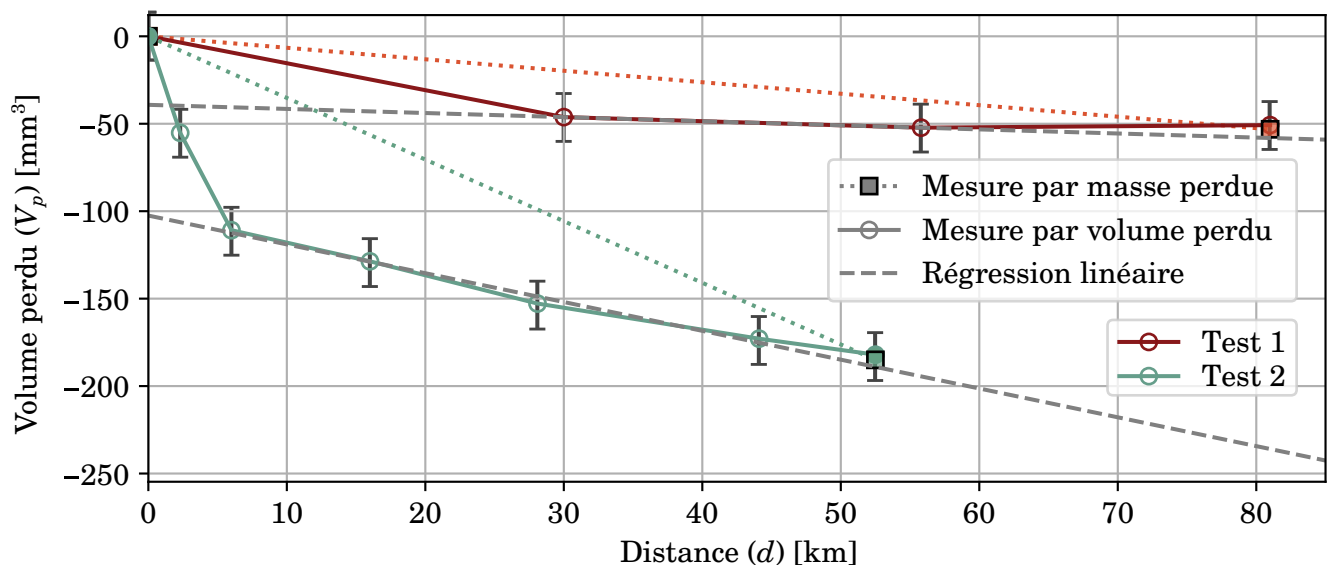


FIGURE 3.19 – Calcul du volume perdu du pion (Nuance A,  $\rho=2,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) par la mesure de la masse avant et après essai et par mesure de volume à différentes distances, en fonction de la distance. Test 1 :  $F_N=90 \text{ N}$ ,  $v_l=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $I=60 \text{ A}$ ,  $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,  $v_b=16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Test 2 :  $F_N=60 \text{ N}$ ,  $v_l=29 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $I=60 \text{ A}$ ,  $k=12 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,  $v_b=16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Pour le test 1 (courbes supérieures rouges), la régression linéaire concerne les trois derniers points situés respectivement à 30, 56 et 82 km. Pour le test 2 (courbes inférieures bleues), la régression linéaire est appliquée sur les cinq

mesures faites à une distance supérieure à 5 km. Les taux d'usure en régime stable, c'est-à-dire les pentes obtenues par régression linéaire, sont respectivement de  $0,234 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  et  $0,995 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  pour les essais 1 et 2. D'une part, l'allure de ces courbes est détaillée et approfondie dans le chapitre suivant mais il est important d'indiquer que ces valeurs sont largement différentes puisque les conditions d'essais ne sont pas les mêmes. D'autre part, on remarque pour le test 1 que trois points de mesures ne sont pas suffisants alors que le volume perdu sur les points concernés par la régression linéaire n'est seulement de  $4 \text{ mm}^3$ . Dans le cas du test 2, le volume perdu sur les points concernés est de  $72 \text{ mm}^3$  pour cinq points de mesures, ce qui permet d'avoir un résultat plus fiable.

Dans le cas où le taux d'usure serait considéré comme linéaire tout au long de l'essai, en calculant le rapport de perte de volume total sur la distance parcourue, les valeurs seraient alors de  $0,657 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  et de  $3,523 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ , soit près de 3 fois plus que les valeurs réelles. A noter que cette différence ne peut pas être prise comme une généralité puisque chaque essai a une allure d'usure différente.

---

## 3.3 Condition initiale de surface du disque

---

### 3.3.1 Traitement de la patine

Dans la bibliographie, les auteurs ne précisent généralement pas les conditions initiales de l'essai ni si le support a été préalablement poli et nettoyé. Cependant, Yang Z. *et al.* [10], dont le banc est présenté figure 1.18, section 1.4.1, indiquent que le disque sur lequel les pions en graphite frottent est poncé avec du papier de verre de grain #800 (papier très fin). En effet, la surface d'un objet est toujours recouverte d'une patine composée de débris, de poussière, de matière imprégnée d'un autre corps ou d'une couche d'oxyde. Dans notre cas, la patine peut être composée de :

- Une couche de cuivre oxydé.
- Des poussières déposées par l'usure du pion.
- Une couche de graphite imprégnée dans le cuivre.

D'après les travaux d'autres auteurs, la configuration du banc où le cuivre est l'anode et le graphite la cathode favorise la croissance d'une fine couche de cuivre [56].

Pour être représentatif du contact fil/bande, la patine ne devrait pas être enlevée puisqu'en ligne, le fil de contact n'est jamais nettoyé et une patine provenant de nombreux passages de différentes bandes de captage peut probablement y être observée. En revanche d'un point de vue scientifique, en fonction de la nuance et des conditions d'essais, il est extrêmement difficile d'obtenir une surface du disque initiale identique puisqu'elle peut présenter des propriétés différentes après chaque essai :

- La surface peut être lisse avec une patine uniforme (figure 3.20 (a)).
- La surface peut être plus localement plus rugueuse (cratères d'arcs électriques) avec une patine hétérogène (figure 3.20 (b)).

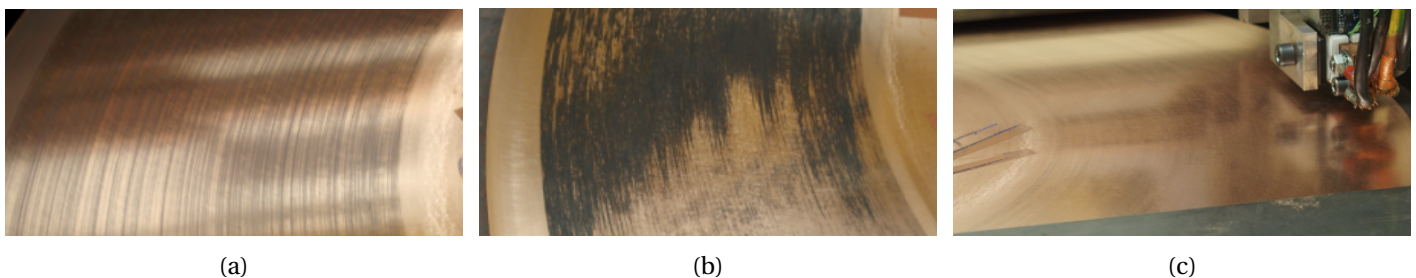


FIGURE 3.20 – Photos du disque ayant différents états de surface : **(a)** patine après essai standard, **(b)** patine présentant des dépôt par arcs électriques et **(c)** disque poli.

Il a donc été choisi de polir et nettoyer le disque avant chaque essai afin que son état de surface soit le plus similaire possible avant de lancer les tests (voir photo figure 3.20 (c)). Le polissage se déroule de la manière suivante :

1. Nettoyage à l'essence F (hydrocarbure, produit ménager utilisé pour nettoyer et dégraisser le métal) afin d'enlever la couche de poussière et de gras ainsi que les débris.

2. Premier polissage du disque avec une disquuse équipée d'un disque à lamelles de grain #80. Durant ce polissage, le disque en cuivre tourne à une vitesse constante de  $300 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$  tandis que l'utilisateur polit sa surface par un mouvement transversal sur le disque permettant un polissage homogène.
3. Toujours avec le disque tournant à la même vitesse de rotation, du papier de verre de grain #220 puis #400 est utilisé pour affiner le polissage.
4. Un dernier nettoyage à l'essence C est exécuté pour enlever le dépôt de poussière de cuivre.

### 3.3.2 Problématique du cuivre neuf

Plusieurs essais ont été menés une fois le disque nettoyé. La figure 3.21 (a) donne un exemple de tests où l'échauffement est d'origine purement mécanique (sans courant). Il représente les variations de température mesurées aux bornes des thermocouples 1, 2 et 3 et du coefficient de frottement en fonction du temps avec des données filtrées (filtre médian de taille 31), avec une fréquence d'enregistrement de 100 Hz. Les essais (a) et (b), qui ont été menés après polissage et nettoyage du disque, sont distincts et réalisés dans la même configuration (nuance A,  $v_l=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $F_N=60 \text{ N}$ ,  $v_b=12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$  et  $I=0 \text{ A}$ ).

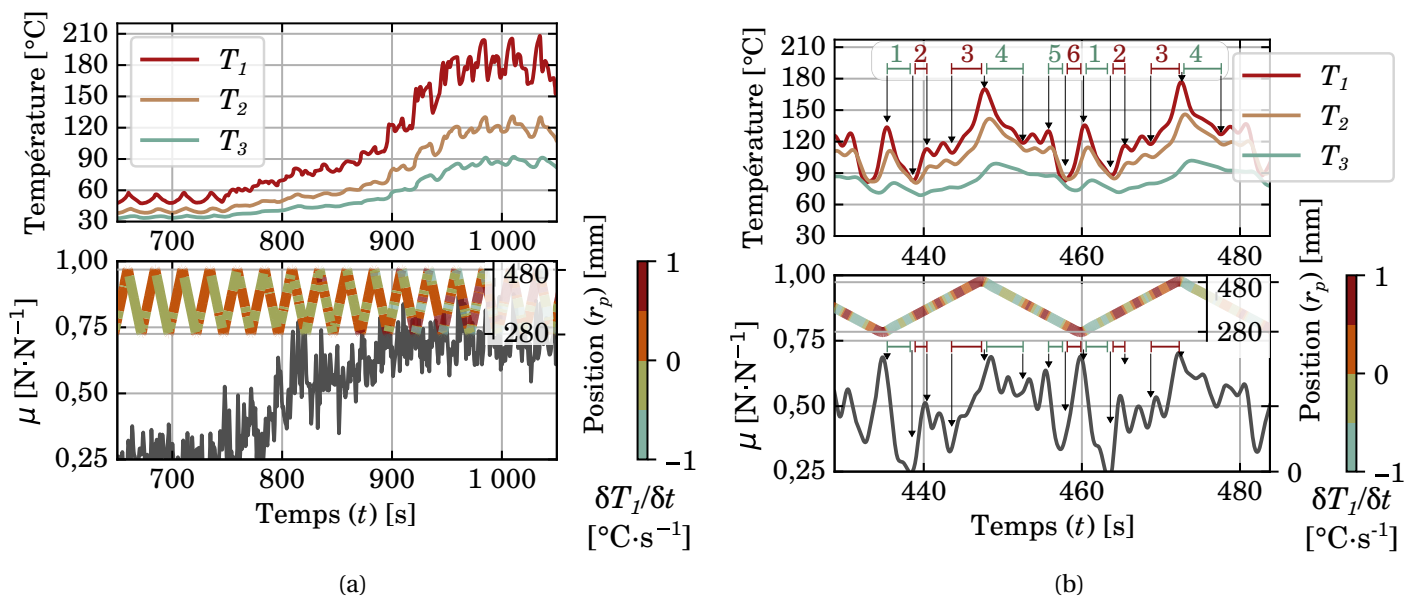


FIGURE 3.21 – Variations des températures du pion et coefficient de frottement en fonction du temps. Essais menés après polissage du disque. Les données (a) et (b) proviennent d'essais distincts réalisés dans les mêmes conditions (nuance A,  $v_l=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $F_N=60 \text{ N}$ ,  $v_b=12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,  $I=0 \text{ A}$ ).

Ces essais mettent en évidence une première phase de quelques minutes dans laquelle le coefficient de frottement est relativement constant (0,25) avec une température à 5 mm du contact de  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ , suivie d'une zone transitoire de 150 secondes pendant laquelle la température et le coefficient de frottement augmentent jusqu'à atteindre les valeurs voisines de  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  et 0,70. Cette transition est alors suivie d'une phase pendant laquelle les variations de température et du coefficient de frottement sont périodiques. Alors qu'un bruit s'apparentant à un collé-glissé peut être entendu pendant les montées, il se produit une usure très importante qui provoque l'arrêt prématuré de l'essai avec un pion totalement usé. Lorsque l'on regarde plus attentivement un autre essai (figure 3.21 (b)), où la température suit des variations allant de  $90$  à  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ , on s'aperçoit une fois de plus que les périodes d'échauffement et de refroidissement sont dépendantes de la position du pion et de sa direction. Le tableau 3.2 donne les amplitudes et la durée d'échauffement et de refroidissement en fonction de la position. Un comportement similaire est observé sur le coefficient de frottement, avec une valeur plus importante (0,7) lors des échauffements et une valeur standard (0,25-0,35) lors des refroidissements.

Cette problématique de balayage a déjà été énoncée dans la section 3.1.3 et des solutions ont été apportées. Cependant ces nouvelles données prouvent que les propriétés du contact sont différentes lorsque le balayage se fait dans un sens et dans l'autre. En effet, des zones de refroidissement dans un sens (1 et 4) peuvent devenir des zones

N°	Position et sens de balayage [mm]	Amplitude [°C]	Durée [s]
1	280 → 340	-50 °C	≈4 s
4	370 → 390	+25 °C	≈2 s
3	400 → 470	+60 °C	≈6 s
4	390 ← 460	-50 °C	≈6,5 s
5	305 ← 335	-40 °C	≈3 s
6	280 ← 300	+30 °C	≈1 s

TABLEAU 3.2 – Amplitudes et durées des phases de refroidissements et d'échauffements (température  $T_1$ ) observées sur la figure 3.21 (b).

d'échauffement (3 et 6). Plusieurs hypothèses ont été envisagées pour expliquer ce phénomène. Tout d'abord, la possibilité d'avoir des mesures bruitées est écartée puisque la période des variations correspond à la pulsation de balayage du pion et que les mesures sur les trois thermocouples présentent des tendances similaires. La source de chaleur est bien située au contact puisque  $T_1 > T_2 > T_3$ . De plus, cette source de chaleur a une origine purement mécanique puisqu'il n'y a pas de courant injecté. Comme les variations de température en fonction de la position sont souvent accompagnées de pics de coefficient de frottement et parfois d'un bruit de collé-glissé, l'hypothèse la plus plausible est que l'échauffement et l'usure proviennent d'une adhésion trop importante. En revanche, il reste difficile d'apporter une explication du comportement en fonction du sens de balayage du pion.

### 3.3.3 Oxydation du cuivre

Lorsque du cuivre pur se retrouve au contact de l'air, le processus d'oxydation commence instantanément. La couche d'oxyde est composée principalement d'oxyde de cuivre I  $\text{Cu}_2\text{O}$  (ou oxyde cuivreux, de couleur jaune, rouge ou brun), qui apparaît dans un large domaine de température et de pression. Le cuivre s'oxyde sous une deuxième forme, l'oxyde de cuivre II  $\text{CuO}$  (ou oxyde cuivrique, de couleur noire) qui apparaît à plus haute température [135]. Pour mieux comprendre le processus de formation, Rhodin T. N. [15] a analysé la croissance des couches d'oxyde sur du métal pour en déduire que la vitesse suivait l'équation suivante :

$$\frac{dx}{dt} = A \cdot \exp\left(\frac{x_1}{x} - \frac{W_a}{k_B T}\right) \quad (3.13)$$

Où  $x$  est l'épaisseur de la couche d'oxyde [Å] au cours du temps  $t$  [s],  $x_1$  est l'épaisseur critique de la couche d'oxyde [Å],  $W_a$  l'énergie d'activation [eV],  $A$  une constante de proportionnalité [ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $k_B$  la constante de Boltzmann [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ] et  $T$  la température [K].

Les figures 3.22 (a) et 3.22 (b), issues de données expérimentales des travaux de Rhodin T. N. [15], montrent que cette couche a une croissance qui suit une loi logarithmique en atteignant en quelques heures une épaisseur quasi-limite de 15 Å. Le taux de croissance et l'épaisseur limite augmentent aussi rapidement avec la température [136, 137] et l'humidité relative [138]. A plus de 350 °C, la couche d'oxyde est surtout composée de  $\text{Cu}_2\text{O}$  qui est recouverte de  $\text{CuO}$  noire [139]. Cette couche reste fragile jusqu'à 700 °C et montre une faible adhérence à la surface de cuivre. Le phénomène d'oxydation du cuivre est considérablement augmenté de 800 à 900 °C et la part de  $\text{CuO}$  dans la couche d'oxyde devient très importante à 1000 °C [140].

### 3.3.4 Altération de la surface du cuivre

De nouveaux tests ont été menés après avoir poli et nettoyé le disque et après un temps d'attente d'environ une vingtaine d'heures. Une usure prématurée et rapide du pion n'a pas été constatée lors de ces essais, ce qui a permis de parcourir plusieurs dizaines de kilomètres. Néanmoins, dans certaines conditions d'essais, la couche d'oxyde semble se détériorer partiellement voire totalement. Un exemple est donné figure 3.23 (a) qui présente les variations de températures en fonction du temps, pour un essai réalisé sans courant et à vitesse de rotation constante. On y observe cinq pics d'échauffement distincts qui se répètent tout au long du test avec une amplitude de 5 à 10 °C et à la même fréquence que le balayage. On peut remarquer visuellement sur la figure 3.23 (b) que la surface du cuivre



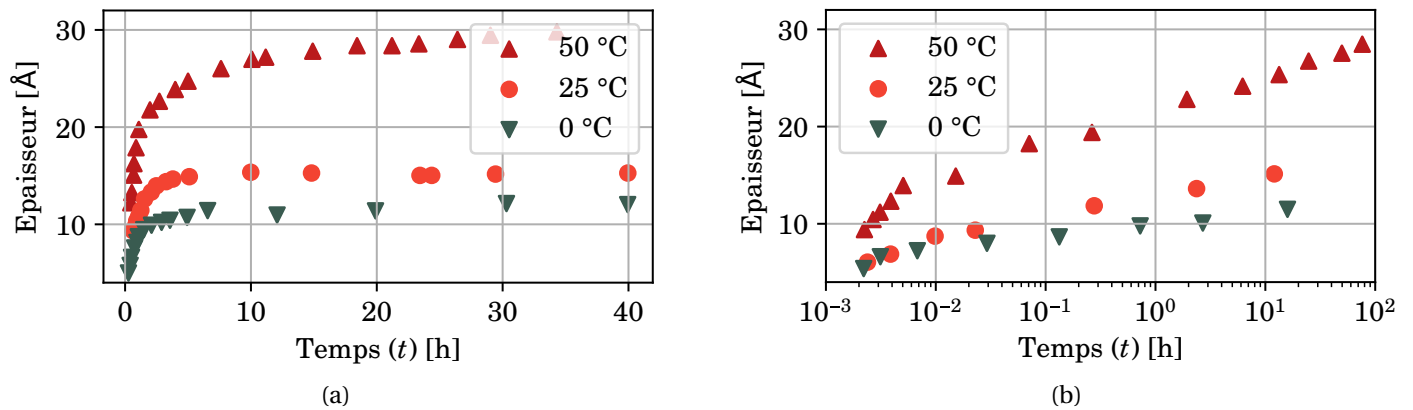


FIGURE 3.22 – Évolution de l'épaisseur de la couche d'oxyde de cuivre recouvrant une plaque de cuivre pur en fonction du temps, données expérimentales adaptées d'un article de Rhodin T. N. Jr [15], (a) avec une échelle de temps linéaire et (b) avec une échelle de temps logarithmique.

n'a pas la même couleur sur trois rayons, notés de ① à ③. Le calcul des distances séparant les pics d'échauffement correspond à la distance mesurée sur le disque, entre les rayons de détérioration ①, ② et ③. De plus, puisque le rayon ③ est localisé sur le rayon correspondant au changement de sens du pion, à l'extérieur du disque, seulement 5 pics d'échauffement sont visibles. Tout comme précédemment, il n'y a pas de courant et l'échauffement est d'origine purement mécanique, probablement provoqué par une adhésion importante entre le cuivre et le carbone.

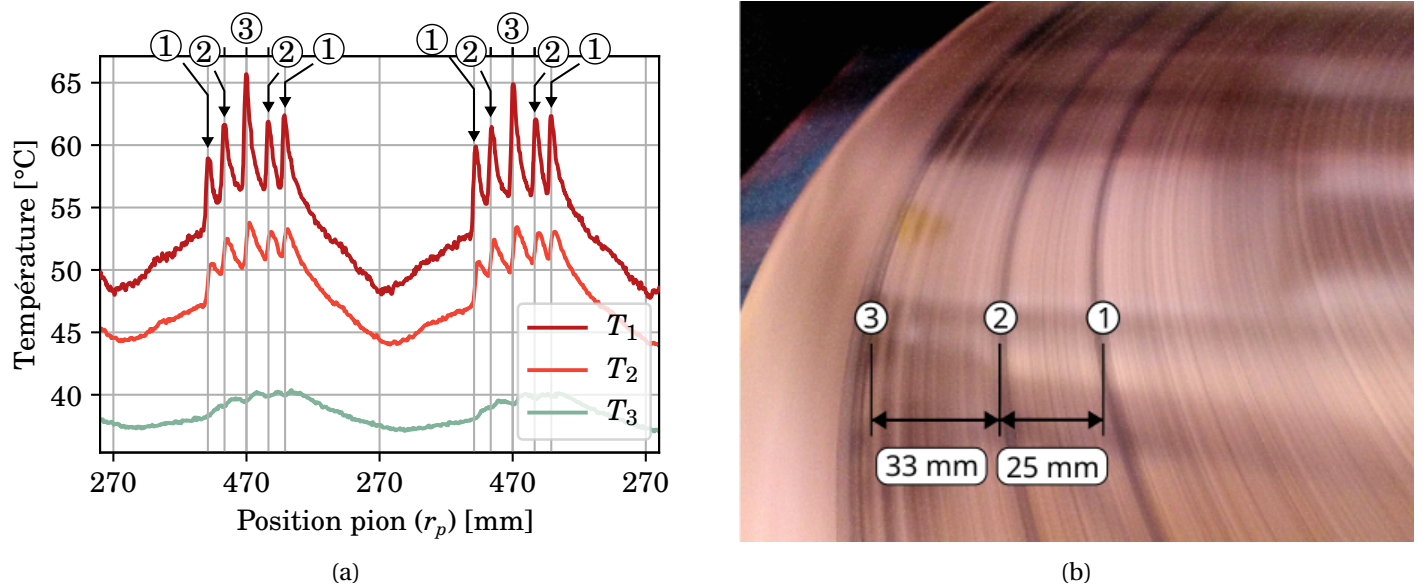


FIGURE 3.23 – Exemple de détérioration partielle de la surface du disque en cuivre sur trois rayons différents, (a) vue sous forme de pics d'échauffement et (b) observation visuelle. Essai réalisé à vitesse de rotation constante ( $\nu_{\text{rot}}=350 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $F_N=80 \text{ N}$ ,  $I=0 \text{ A}$ ,  $k=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,  $\nu_b=8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $d_b=200 \text{ mm}$ ).

Dans des conditions de contact plus sévères, notamment où les valeurs de vitesse, force de contact et courant sont plus importantes, cette dégradation apparaît plus vite et s'amplifie. Pour mettre en évidence ce phénomène, la figure 3.24 (a) représente les mesures de volume perdu en fonction de la distance parcourue pour trois essais réalisés dans les mêmes conditions. La figure 3.24 (b) représente quant à elle, pour les trois essais, les variations du coefficient de frottement  $\mu$  et de la température  $T_1$ . Il est important de préciser que les mesures ne sont pas bruitées et que ce sont les tracés qui sont horizontalement compressés. On observe que les pions utilisés dans les tests 1 et 2 ont une usure importante dans une première partie de l'essai, ce qui n'est pas le cas du test 3. Par contre, l'usure semble s'atténuer pour les tests 1 et 2 contrairement au test 3. Ce point sera développé dans le chapitre suivant. Pour estimer le taux d'usure, une régression linéaire est appliquée lorsque la variation du volume perdu semble linéaire. Les distances à

partir desquelles elles sont calculées sont, pour les tests 1, 2 et 3, respectivement de 12,3 km, 12,8 km et 0 km.

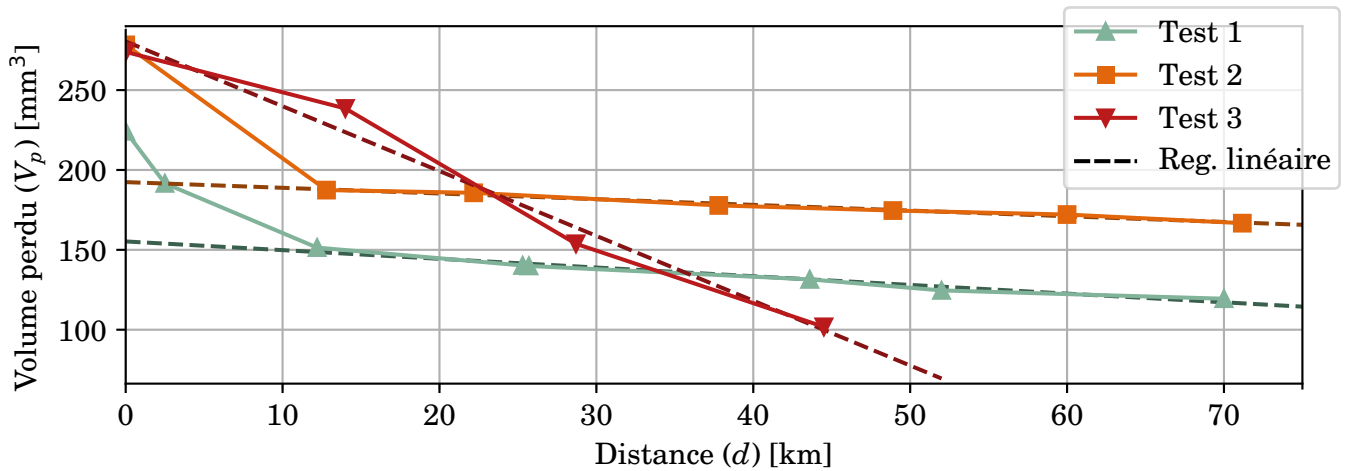


Figure 3.24(a) – Volume perdu en fonction de la distance pour trois essais réalisés dans les mêmes conditions expérimentales (Nuance A,  $F_N=90$  N,  $I=60$  A,  $k=12$  N·mm<sup>-1</sup>,  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup> et  $v_b=8$  mm·s<sup>-1</sup>).

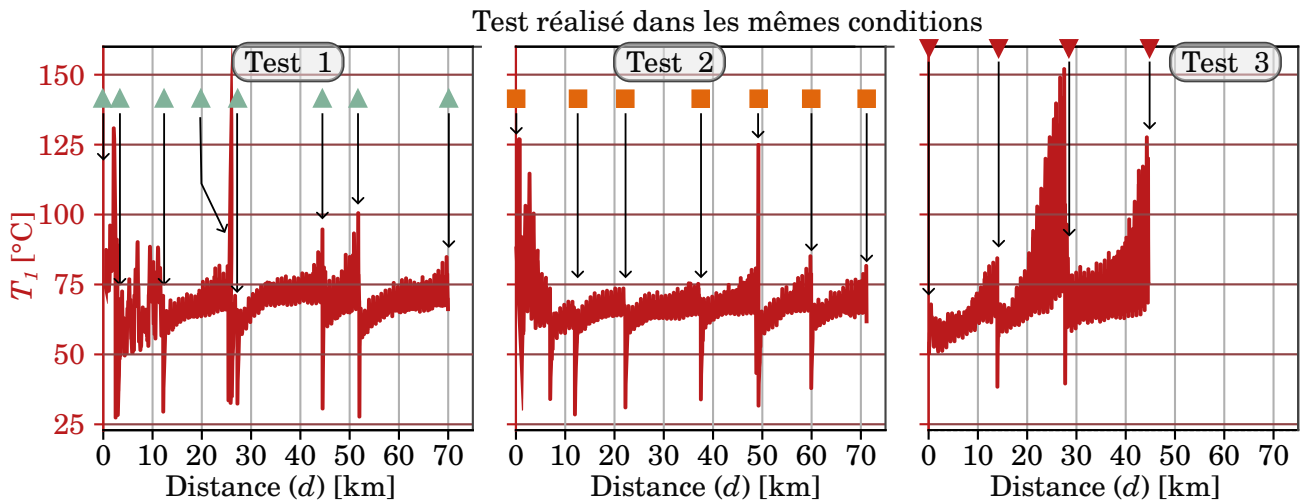


Figure 3.24(b) – Variations de la température  $T_1$  et du coefficient de frottement  $\mu$  en fonction de la distance, pour trois essais réalisés dans les mêmes conditions expérimentales. Les points  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$  et  $\blacktriangledown$  indiquent les distances de mesure de volume (Nuance A,  $F_N=90$  N,  $I=60$  A,  $k=12$  N·mm<sup>-1</sup>,  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup> et  $v_b=8$  mm·s<sup>-1</sup>).

La différence entre ces trois essais réside dans l'instant (arbitraire) des prises d'empreinte : pour les tests 1 et 2, elles ont été réalisées spécifiquement au moment où l'amplitude des pics d'échauffement et des pics de frottement augmente à chaque aller-retour du pion, alors que les empreintes réalisées pendant le test 3 ont été prises à des distances et à des moments aléatoires et moins fréquemment.

Le tableau 3.3 permet de visualiser les volumes perdus et le taux d'usure obtenus pour les différents essais sur une distance donnée. En ordre de grandeur, on observe que le taux d'usure calculé sur l'essai 3 est huit à dix fois supérieur à ceux mesurés sur les essais 1 et 2, qui ont pour leur part des valeurs de même ordre de grandeur. On peut corrélérer ce phénomène avec l'amplitude des pics d'échauffement et de frottement, le test 3 ayant des températures oscillant dans un premier temps entre 50 et 85 °C pour fluctuer après 28 km entre 70 et 150 °C. A cette distance parcourue, le coefficient de frottement atteint des valeurs de 0,75. Pour les tests 1 et 2, la température dépasse rarement 80 °C à quelques exceptions près et le coefficient de frottement reste la plupart du temps en dessous de 0,5. On peut alors très vite constater qu'après la prise d'empreinte, la température redescend au niveau des valeurs mesurées avant l'apparition des pics. Ces derniers peuvent cependant être observés de nouveau après plusieurs phases de balayage du pion.

Ces pics sont similaires à ceux mis en évidence sur la figure 3.23 (a) et leur origine est vraisemblablement identique, c'est à dire une altération partielle de la surface du disque, et plus précisément de la couche d'oxyde l'en recouvrant.



	Distance initiale pour la régression linéaire [km]	Distance parcourue [km]	Volume perdu [mm <sup>3</sup> ]	Pente rég. linéaire (W) [mm <sup>3</sup> ·km <sup>-1</sup> ]
Test 1	12,3	57,7	32,0	0,55
Test 2	12,8	58,4	20,7	0,36
Test 3	0,0	44,5	180,5	4,06

TABLEAU 3.3 – Volumes perdus mesurés et taux d’usure calculés pour trois tests réalisés dans les mêmes conditions (Nuance A,  $F_N=90$  N,  $I=60$  A,  $k=12$  N·mm<sup>-1</sup>,  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup> et  $v_b=8$  mm·s<sup>-1</sup>).

Le fait d’arrêter l’essai permet à cette couche de se reformer, *a fortiori* après plusieurs dizaines de minutes d’essai lorsque la température du disque, entre 35 et 45 °C, catalyse sa croissance (cf. figure 3.22 (b)). Le fait d’arrêter l’essai aux moments où la couche d’oxyde du cuivre est volatilisée présente donc trois avantages :

1. Permettre une re-formation de la couche protectrice du cuivre afin de garder les mêmes conditions de contact.
2. Limiter les pics d’échauffement et de frottement de grande amplitude.
3. Éviter une accélération de l’usure dont l’origine est extérieure aux conditions de contacts appliquées.
4. Rester représentatif d’une LPC où la surface de contact ne se dégrade pas à cause de passages répétés (un train ne passant pas toutes les 20 à 40 secondes sur une même portion de caténaire).

Les tests 1 et 2 sont donc ici les plus réalistes et répondent aux points ci-dessus. L’instant et la position exacte où la couche d’oxyde sera usée n’étant actuellement pas prévisible, les mesures du coefficient de frottement et de la température au plus proche du contact pion-disque, restent les seuls indicateurs permettant de déterminer les moments où il est nécessaire de mettre en pause l’essai. Le temps de pause, qui est celui nécessaire à la prise d’une empreinte, peut varier entre 10 et 20 minutes.

## 3.4 Conclusion

Ce chapitre retrace dans un premier temps les améliorations techniques apportées au banc expérimental permettant de le fiabiliser et de résoudre les différentes problématiques et casses rencontrées.

Le premier défi technique s’est concentré sur les défauts de planéité du disque et sa tenue lorsqu’il est en rotation. Les pièces de transmission situées entre le renvoi d’angle et le disque ont tout d’abord été remplacées pour être plus résistantes. De plus, le disque a subi un aplanissement par contrainte thermique et mécanique pour réduire son défaut de planéité. Enfin, une roue de luge de descente a été installée sous le disque, à son extérieur, et sous la ligne de passage du pion afin de renforcer l’appui. Cette roue est refroidie par un tube de Ranque-Hilsch pour limiter son échauffement interne provoqué par des contraintes répétées.

D’autre part, l’asservissement de vitesse mis en place à l’aide du variateur ATV320 et de son correcteur PID intégré a permis d’atteindre des vitesses de rotation plus importantes. Des couples plus élevés ont été en contrepartie imposés, ce qui a nécessité, suite à la casse du renvoi d’angle, de revoir le calcul du domaine d’étude. Les valeurs limites des paramètres mis en jeu dans les essais ont ainsi été fixées à une vitesse linéaire de 60 km·h<sup>-1</sup> pour un balayage ayant une vitesse 16 mm·s<sup>-1</sup> et une amplitude 200 mm. Le couple imposé, somme du couple de frottement et du couple d’accélération, respecte ainsi le couple limite que peuvent supporter le moteur et les éléments de la chaîne de transmission. La troisième problématique est liée à la différence de comportement thermique du pion suivant le sens du balayage. En effet, nous avons constaté un échauffement important lorsqu’il se déplaçait vers l’intérieur du disque puis un refroidissement pendant le mouvement opposé. Une des causes de ce comportement semble être le manque de maintien du bras entre le vérin de balayage et le pion. Dans un sens ou dans l’autre, une légère inclinaison du bras a été constatée, ce qui induit un angle entre les surfaces pion/disque, rompant ainsi le plan qui s’est formé et altérant la surface de contact apparente. De nombreuses pièces ont été déplacées, modifiées ou remplacées pour limiter cet effet. Les différences de comportement suivant le sens de balayage du pion ont été alors atténuées mais persistent néanmoins encore aujourd’hui.

Enfin, la stratégie de circulation du courant a été modifiée. Initialement basé sur la mise en œuvre d'une charge à réinjection sur secteur et d'une alimentation de puissance, cet ensemble a rapidement été abandonné au profit de l'utilisation de l'alimentation seule. En effet, la configuration prévue au départ présente l'inconvénient de travailler uniquement à tension constante, ce qui provoque une chute de courant lorsque la résistance de contact augmente. Par conséquent les phénomènes d'arcs électriques et d'effet Joule sont inhibés alors qu'ils sont responsables de l'usure et de l'échauffement. De plus, les essais en ligne se réalisent à courant constant, ce qui justifie de travailler également à courant constant et d'adopter cette solution sur notre banc. Le système est constitué d'une alimentation avec entre ses bornes un ensemble de résistances électriques, composées de résistances statiques négligeables et de résistances dynamiques provenant des contacts patins/disque et pion/disque. Pour mieux évaluer la résistance de contact pion/disque, différentes configurations de câblage ont permis d'estimer les résistances patins/disque à  $10\text{ m}\Omega$ . La résistance de contact pion/disque se calcule donc par la différence entre le rapport tension/courant mesuré et la résistance estimée du contact patins/disque. Néanmoins, ce calcul manque de fiabilité du fait du manque de précision dans la mesure de la tension, ce qui reste un point à améliorer dans les travaux futurs.

La procédure de mesure d'usure constitue la deuxième partie de ce chapitre. Elle découle de l'hypothèse que la variation du volume perdu avec la distance n'est pas linéaire durant un essai et a pour ambition de mesurer le volume perdu à différents moments du test et ce, sans modifier le plan entre les surfaces pion/disque. Pour réaliser cette mesure, les pions sont découpés par électro-érosion avec deux encoches de 2 mm de large, situées à 4 mm de la surface du pion en contact avec le disque et parallèles avec cette dernière. Lorsque l'essai est mis en pause, une empreinte de haute précision du pion est réalisée. Ces empreintes sont ensuite utilisées comme moule pour obtenir des répliques à partir de résine et une étude de surface de ces répliques est réalisée à partir d'un microscope (situé à Besançon - dans les bâtiments de l'ENSMM-SUPMICROTECH). Un logiciel d'analyse de surface est enfin employé pour mesurer le volume à partir du plan de référence des encoches. L'incertitude de cette méthode a été évaluée à  $13,6\text{ mm}^3$ , ce qui est très élevé dans le cas où l'usure est faible. Ainsi, de multiples points de mesure de volume sont nécessaires pour augmenter la précision et vérifier la linéarité de l'usure au cours de l'essai. Enfin, un exemple est présenté et montre clairement que la variation du taux d'usure avec la distance n'est pas linéaire au cours d'un essai mais qu'il peut être estimé, après une phase de rodage, par une régression linéaire appliquée sur une sélection de points.

La troisième et dernière partie de ce chapitre décrit une étape clé du protocole d'essai : l'état initial et le contrôle de la patine et de l'état de surface du disque en cuivre. De fait, pour que la surface du cuivre soit dans un état initial identique, le disque est poli et nettoyé avant le début de chaque essai. Il a néanmoins été observé que le cuivre pur provoquait une adhésion très importante avec la surface du pion, ayant pour conséquence un échauffement d'origine mécanique anormal et une usure précoce qui oblige à écourter le test. Ces tests débutent donc toujours selon le même protocole, à savoir par une phase de polissage et de nettoyage du disque à l'essence F suivie d'une période de repos d'une vingtaine d'heures. Ce délai permet à la couche d'oxyde de se former et d'obtenir des résultats d'usure et d'échauffement réalistes. En effet, des travaux [135, 141, 15] ont montré qu'une couche d'oxyde de cuivre, d'une épaisseur allant de  $10\text{ \AA}$  à  $30\text{ \AA}$  suivant la température, se formait en quelques heures sur la surface du disque poli. Toutefois, cette couche d'oxyde de cuivre peut être détériorée, d'autant plus lorsque les conditions d'essais sont extrêmes. Cette détérioration de la surface du disque peut être locale et se caractérisant par des cercles ayant des aspects différents, ou générale (changement de couleur de la surface globale du disque). Dans tous les cas, un échauffement, une usure et un coefficient de frottement importants sont mis en évidence lorsque le pion glisse sur ces zones. Cette altération du disque s'annonce par une phase transitoire dans laquelle des pics d'échauffement réguliers ayant une amplitude de plus en plus importante sont observés. Il a également été montré que lorsqu'un test est régulièrement arrêté dès le début de ces phases transitoires, par exemple pour prendre une empreinte, l'usure mesurée est nettement moins importante. Des pauses de 10 à 20 minutes sont donc nécessaires dès que les pics d'échauffement s'amorcent.

Ces améliorations ou corrections, ont occupé une grande partie du temps de travail de cette thèse. Au fur et à mesure de leurs avancements, de nombreux essais ont été réalisés auxquels le chapitre suivant est consacré.



---

---

## CHAPITRE 4

---

# ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

---

### 4.1 Introduction et objectifs des essais

---

Ce chapitre traite des objectifs visés et de la méthodologie expérimentale mise en place, ainsi que de l'ensemble des résultats obtenus. Dans un premier temps, l'étude porte sur les propriétés et le comportement des nuances en décrivant d'une part, les propriétés physiques connues et d'autre part, en exploitant des données expérimentales issues de la thèse de N. Delcey et de certains essais en ligne de la SNCF. Pour compléter ces données, des mesures de diffusivité thermique sont réalisées au laboratoire. Ainsi, l'ensemble de ces résultats est utilisé comme point de repère pour le reste des essais.

Dans un deuxième temps, la méthodologie des plans d'expérience est expliquée en introduisant spécifiquement les plans factoriels complets, les plans factoriels factorisés et les notions d'effet et d'alias. Ces outils permettent notamment de faire une analyse de la variance (*Analysis of Variance*, ANOVA) pour comprendre quels sont les facteurs les plus influents sur les différentes réponses.

Ensuite, une étude thermique est menée pour comprendre le comportement thermique de l'ensemble disque/pion/pince et pour déterminer les facteurs influençant l'échauffement. Dans la première phase de l'étude, seule la hauteur du pion varie; les conditions de contact (force de contact, courant et vitesse linéaire) restent fixes et le pion est isolé du flux convectif. Tandis que la deuxième phase est composée d'un plan d'expériences complet dans lequel ces trois facteurs à trois niveaux (force de contact, courant et vitesse linéaire) forment la matrice d'expérience, la hauteur du pion reste fixe. Ces résultats permettent aussi de mieux cerner le domaine d'étude et de comprendre l'influence de ces facteurs sur l'échauffement, ceci par la réalisation d'une ANOVA.

Enfin, un plan factoriel fractionné est construit afin d'étudier l'évolution de l'usure en fonction de six facteurs présentant chacun deux niveaux (nuance, force de contact, courant, raideur, vitesse de balayage et vitesse linéaire).

### 4.2 Caractéristiques des bandes étudiées

---

Les essais réalisés pendant ces travaux se sont portés sur trois bandes de nuances différentes. Les bandes de nuance A et B ont été étudiées lors de la thèse de N. Delcey [16]. La troisième nuance, notée C, est proposée par la SNCF et a déjà été soumise à des tests d'usure en ligne, en comparaison avec la nuance A.

Les caractéristiques connues de ces nuances sont affichées dans le tableau 4.1. Tandis que le taux de métal n'a pas pu être vérifié, la masse volumique de chaque nuance a été mesurée en laboratoire en réalisant 10 pesées sur différents échantillons dont le volume est connu. Pour cela une balance de précision KERN PLS ayant une incertitude de 1 mg est

utilisée. Les résultats obtenus sont similaires à ceux trouvés par le fabricant pour la nuance A et légèrement supérieurs pour les nuances B et C.

Dénomination	Taux d'imprégnation	$\rho$ (SNCF) [ g·cm <sup>-3</sup> ]	$\rho$ (laboratoire) [ g·cm <sup>-3</sup> ]
Nuance A*	32 % Cu	2,5	2,5
Nuance B*	19 % Cu	2,1	2,2-2,3
Nuance C	> 50 % Métal**	3,4	3,4-3,6

\* Bandes étudiées pendant la thèse de N. Delcey [16].

\*\* Type de métal non précisé.

TABLEAU 4.1 – Propriétés physique connues des nuances étudiées.

#### 4.2.1 Résultats d'usure en ligne

Les tests en ligne ont été réalisés sur une rame de type TER et sur une ligne alimentée sous une tension continue de 1,5 kV. La vitesse maximale atteinte est de 160 km·h<sup>-1</sup>, en suivant des rampes d'accélération et de décélération ou en étant maintenue constante, tandis que l'intensité du courant d'alimentation varie entre 360 et 1400 A. Le pantographe est instrumenté de cellules de pesée pour mesurer la force de contact bande/fil et d'accéléromètres pour estimer les vibrations. Il est surmonté de deux bandes présentant la configuration suivante :

- Une première bande capte le courant et est instrumentée de capteurs avec des thermocouples insérés.
- Une deuxième bande est isolée et ne capte donc pas le courant, ceci dans le but de mesurer l'usure exclusivement mécanique (c'est-à-dire sans courant).
- Chaque bande est testée en position d'attaque (à l'avant) et en position de fuite (à l'arrière).

Enfin, l'usure est mesurée par la perte d'épaisseur de la bande en son centre et à 200 mm de part et d'autre de ce point.

Les résultats de ces essais sont présentés dans le tableau 4.2. Tout d'abord, pour la bande de nuance A, le taux d'usure moyen à chute en moyenne de 0,06 mm·100 km<sup>-1</sup> lorsque la bande est isolée, soit une valeur divisée pratiquement par cinq par rapport à une bande en captage. Deuxièmement, pour la nuance C, le taux d'usure moyen augmente légèrement dans le cas où elle est isolée en passant de 0,67 mm·100 km<sup>-1</sup> lorsqu'elle est en captage à 0,73 mm·100 km<sup>-1</sup> dans le cas où elle est isolée. Le courant semble donc accélérer l'usure de la nuance A, ce qui n'est pas le cas de la nuance C.

Lorsque les bandes sont sous tension, la nuance A s'use, en moyenne, deux à trois fois moins que la nuance C, tandis que lorsqu'elles sont isolées la nuance A s'use, en moyenne, douze fois moins que la nuance C. Isolée ou non, la nuance A montre donc une longévité plus importante que la nuance C.

D'autres essais en ligne réalisés par la SNCF, dont les résultats ne sont pas connus, ont montré que les bandes de nuance A et B s'usent de manière similaire. Il est donc attendu que ces deux nuances aient le même comportement.

Nuance	A		C			Val. moy. $\bar{A}$ , $\bar{C}$		
	Distance parcourue [km]		200			216	200	
Position de mesure [mm]	-200	0	200	-200	0	200		
Taux d'usure avec courant [mm·100 km <sup>-1</sup> ]	0,28	0,37	0,19	0,55	0,85	0,60	0,28	0,67
Taux d'usure, bande isolée [mm·100 km <sup>-1</sup> ]	0,09	0,05	0,05	0,30	1,10	0,80	0,06	0,73

TABLEAU 4.2 – Mesures d'usures réalisées en ligne par la SNCF, sur deux nuances différentes, isolées ou en service. Tests réalisés sur un train circulant sur une ligne alimentée en 1,5 kV continu, avec un courant d'appel se situant entre 360 et 1400 A et une vitesse maximale 160 km·h<sup>-1</sup>.

#### 4.2.2 Résultats d'échauffement sur le banc de Polimi

À partir des résultats expérimentaux obtenus par N. Delcey sur le banc de l'Université Polytechnique de Milan (POLIMI) (décrit dans le paragraphe 1.4.3), les échauffements de bandes de nuance A et B sont comparés dans cette

section.

### Caractéristiques des essais

Ces essais sont composés de trois répétitions, se déclinant par cinq facteurs prenant chacun deux à trois valeurs distinctes :

1. Vitesse  $v_l$  : 140 et 180 km·h<sup>-1</sup>
2. Force de contact  $F_N$  : 60 et 90 N
3. Courant  $I$  : 300, 500 et 700 A
4. Épaisseur des bandes : 18 et 32 mm
5. Nuance des bandes : A et B

Cependant, les essais dont la vitesse linéaire est de 180 km·h<sup>-1</sup> ou dont l'épaisseur des bandes est de 32 mm n'ont pas pu tous être réalisés. L'exploitation de ces données est donc volontairement restreinte ici aux bandes ayant une épaisseur de 18 mm et aux essais pour lesquels la vitesse linéaire est de 140 km·h<sup>-1</sup>. On prend donc en compte seulement trois facteurs : la force de contact  $F_N$ , le courant  $I$  et la nuance.

### Instrumentation et méthodologie

Dans chaque bande, 19 trous ont été percés dans lesquels sont insérés des thermocouples permettant de mesurer les températures allant de  $T_1$  à  $T_{19}$ . Ces thermocouples ont été dispersés dans la bande à différentes longueurs, largeurs et profondeurs. Cependant, les acquisitions des 19 températures ne sont pas toujours exploitables et, afin d'être symétrique par rapport au centre de la bande, cette analyse a été réalisée en utilisant les températures des capteurs 4, 5, 7, 12, 13, 15 et 16, dont la répartition est visible figure 4.1.

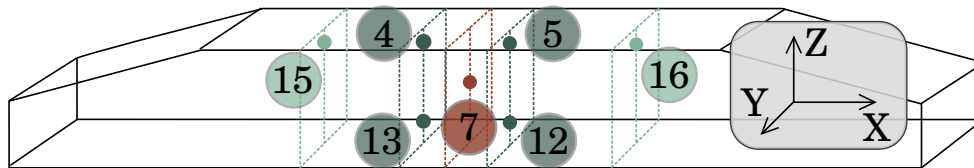


FIGURE 4.1 – Répartition dans la bande de captage et numéros des thermocouples mis en place par N. Delcey lors de ses essais à Polimi.

Chaque test se compose de cinq phases dans lesquelles le courant prend, dans l'ordre, la valeur de 0 A, 500 A, 700 A, 300 A puis 0 A. Chaque valeur de courant est appliquée suffisamment longtemps pour que la bande soit thermiquement en régime permanent. Tous les essais sont décomposés en trois parties pour obtenir des valeurs de température en régime permanent, sur plusieurs minutes et pour les trois valeurs de courant non nulles. La figure 4.2 donne l'allure du courant et des températures  $T_7$  et  $T_{12}$  (pris arbitrairement comme exemple), avec trois fenêtres permettant de calculer les températures moyennes pour chaque niveau de courant.

Pour comparer la température globale des bandes dans différentes configurations d'essais, une température moyenne totale  $T_{moy}$  est calculée à partir des températures moyennes  $T_4 .. T_{16}$ . Le tableau 4.3 montre un exemple de calcul de  $T_{moy}$  pour une configuration d'essais.

n° répétition	$T_4$	$T_5$	$T_7$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{15}$	$T_{16}$	$T_{moy}$
1	144,4	150,5	150,6	143,4	140,5	106,5	102,5	134,1
2	140,8	146,7	148,0	140,1	137,6	106,5	101,0	131,5
3	142,4	148,4	150,9	141,9	139,5	106,5	99,8	132,8
Moyenne	142,5	148,5	149,9	141,8	139,2	106,5	101,1	<b>132,8</b>

TABLEAU 4.3 – Exemple des températures moyennes (°C) mesurées en différentes positions dans la bande (nuance A;  $I=700$  A;  $F_N=60$  N; [16].

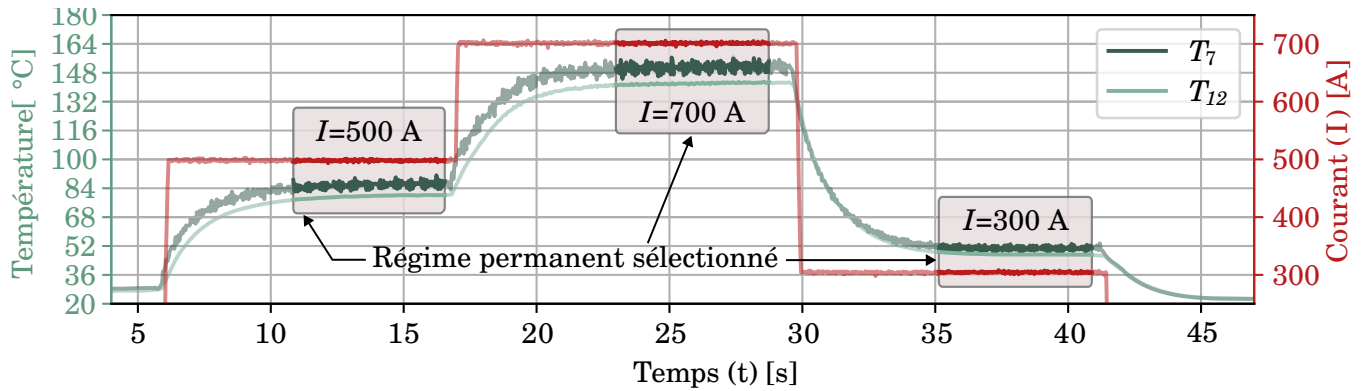


FIGURE 4.2 – Exemple de courbes d'échauffement et de courant observées pendant un essai réalisé par N. Delcey à Polimi (nuance A, bande de 18 mm d'épaisseur,  $F_N=60$  N;  $v_l=140$  km·h<sup>-1</sup>)[16].

### Comparaison des résultats

La figure 4.3 (a) compare les valeurs de température moyenne en fonction de la force de contact et du courant sous forme de diagramme en barres. Cette figure montre que, dans toutes les configurations, la bande de nuance A atteint une température plus élevée que la bande de nuance B. Pour mettre en valeur l'échauffement par effet Joule, la figure 4.3 (b) trace les températures moyennes sur le courant au carré en fonction de la force de contact et du courant, dont les valeurs numériques sont affichées dans le tableau 4.4.

Tout d'abord, la température ambiante et l'échauffement par frottement ne sont pas pris en compte dans ces calculs. Par conséquent, pour les deux bandes et pour  $F_N$  égale à 60 N, les valeurs de  $T_{\text{moy}}/I^2$  sont plus importantes pour  $I=300$  A ( $1,99 \cdot 10^{-4}$  °C·A<sup>-2</sup> pour la nuance A et  $1,81 \cdot 10^{-4}$  °C·A<sup>-2</sup> pour la nuance B), tandis qu'elles sont similaires lorsque le courant est fixé à 500 et 700 A (respectivement  $1,67 \cdot 10^{-4}$  °C·A<sup>-2</sup> et  $1,64 \cdot 10^{-4}$  °C·A<sup>-2</sup> pour la nuance A et  $1,43 \cdot 10^{-4}$  °C·A<sup>-2</sup> et  $1,39 \cdot 10^{-4}$  °C·A<sup>-2</sup> pour la nuance B). De plus, les valeurs sont plus importantes lorsque la force de contact est fixée à 60 N que lorsque sa valeur est de 90 N, ce qui est un indicateur de la qualité du captage avec un échauffement amoindri lorsque  $F_N$  augmente (résistance de contact moindre ou diminution des arcs électriques).

De façon générale, les valeurs de  $T_{\text{moy}}/I^2$  sont plus importantes pour la nuance A que pour la nuance B. De plus, la différence de température entre A et B augmente avec le carré du courant. Cette causalité suggère une résistance de contact plus importante pour la bande de nuance A que pour celle de nuance B, probablement due à la différence d'imprégnation en cuivre (19 % contre 32 %). Une deuxième hypothèse, pouvant coexister avec la première, est que les matériaux ont des propriétés thermiques différentes.

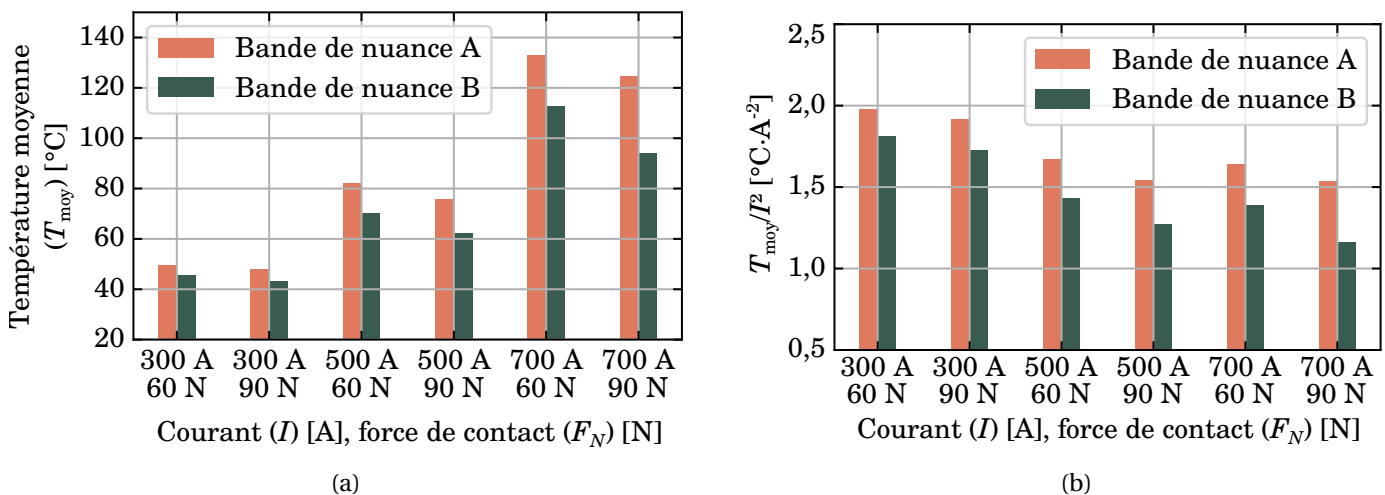


FIGURE 4.3 – (a) Températures moyennes  $T_{\text{moy}}$  et (b) températures moyennes sur le courant au carré ( $\frac{T_{\text{moy}}}{I^2}$ ) en fonction du courant et de la force de contact (pour rappel  $v_l=140$  km·h<sup>-1</sup>, bandes d'épaisseur 18 mm).

Courant ( $I$ ) [A]	$T_{\text{moy},A} / I^2$ [ $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{A}^{-2}$ ]		$T_{\text{moy},B} / I^2$ [ $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{A}^{-2}$ ]	
	60 N	90 N	60 N	90 N
$F_N$ [N]	60 N	90 N	60 N	90 N
300	1,99	1,92	1,81	1,73
500	1,67	1,54	1,43	1,27
700	1,64	1,54	1,39	1,16
Moyenne	1,77	1,67	1,54	1,38

TABLEAU 4.4 – Différence de température  $\Delta T$  entre la température globale de la bande A et celle de la bande B, pour différentes forces de contact et différents courants (figure 4.3 (b)).

### 4.2.3 Propriétés thermiques des nuances

Étudier la diffusivité thermique selon les trois axes  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  et  $\alpha_z$  (le positionnement des axes est affiché figure 4.1), pour chaque bande et à différentes températures, permet d'obtenir plusieurs informations :

1. En comparant la diffusivité intra-bande selon les trois axes, on peut estimer la direction dans laquelle le flux de chaleur sera le plus important.
2. La diffusivité thermique est une propriété dépendante thermiquement. Alors que certains matériaux voient leur diffusivité augmenter avec la température, d'autres ont plus de difficulté à évacuer la chaleur (comme le cuivre et le graphite).
3. Faire des mesures pour une même bande et dans une même direction sur différents échantillons permet de connaître l'hétérogénéité du matériau.

**Méthode Flash - Banc LFA1000** Les diffusivités thermiques sont obtenues en utilisant un diffusimètre LFA1000 (*Laser Flash Analysis*) de la marque Linseis. Le procédé consiste à :

1. Disposer jusqu'à 6 échantillons dans un carrousel se trouvant dans une chambre.
2. Chauffer la chambre à  $\pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  (valeur arbitraire) d'une température de consigne.
3. Exciter au moyen d'un laser la face supérieure d'un échantillon.
4. Mesurer la réponse en tension d'un capteur infra-rouge (IR) focalisé sur sa face inférieure.
5. Estimer le temps  $t_{1/2}$  nécessaire pour atteindre la moitié de la tension maximale  $\Delta U_{1/2}$ . Pour cela, un modèle proposé par le constructeur est utilisé (modèle *Combined*).
6. Calculer la diffusivité thermique à partir de l'équation suivante [142] :

$$\alpha = 0,1388 \cdot \frac{e^2}{t_{1/2}} \quad (4.1)$$

avec  $e$  l'épaisseur de l'échantillon [mm] et  $t_{1/2}$  le temps nécessaire au signal pour atteindre la moitié de sa valeur maximale [s].

La figure 4.4 présente un exemple de réponse temporelle du capteur. On peut y voir la réponse du capteur qui décolle peu après l'excitation du laser à  $t=0$  ms puis qui atteint la moitié de sa valeur maximale à  $t_{1/2}=40$  ms. Le modèle permet d'obtenir une courbe quasiment identique à celle de la réponse, ce qui permet de déterminer algorithmiquement le temps  $t_{1/2}$  pour calculer la diffusivité.

Les échantillons sont découpés dans des bandes sous forme de parallépipèdes de section carrée (arête 10 mm) et d'épaisseur de 2 mm. Chaque pièce est découpée avec la face carrée orthogonale à l'axe selon lequel la diffusivité est mesurée. De plus, trois échantillons sont découpés par axe pour chaque bande, et les analyses sont réalisées de la température ambiante jusqu'à  $70 \text{ } ^\circ\text{C}$  avec incrément de  $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Pour chaque palier, dix mesures successives sont réalisées afin d'avoir une meilleure précision et d'éliminer les valeurs aberrantes. Une étude plus poussée, dans laquelle 6 échantillons sont découpés par axe et la température varie de  $20$  à  $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ , a été effectuée sur la nuance B. Les valeurs des diffusivités mesurées sur les trois nuances de  $20$  à  $70 \text{ } ^\circ\text{C}$  sont tracées sur la figure 4.5 tandis que les résultats obtenus jusqu'à  $200 \text{ } ^\circ\text{C}$  sur la nuance B sont tracés sur la figure 4.6. Pour chaque axe de chaque nuance, une surface en cadran



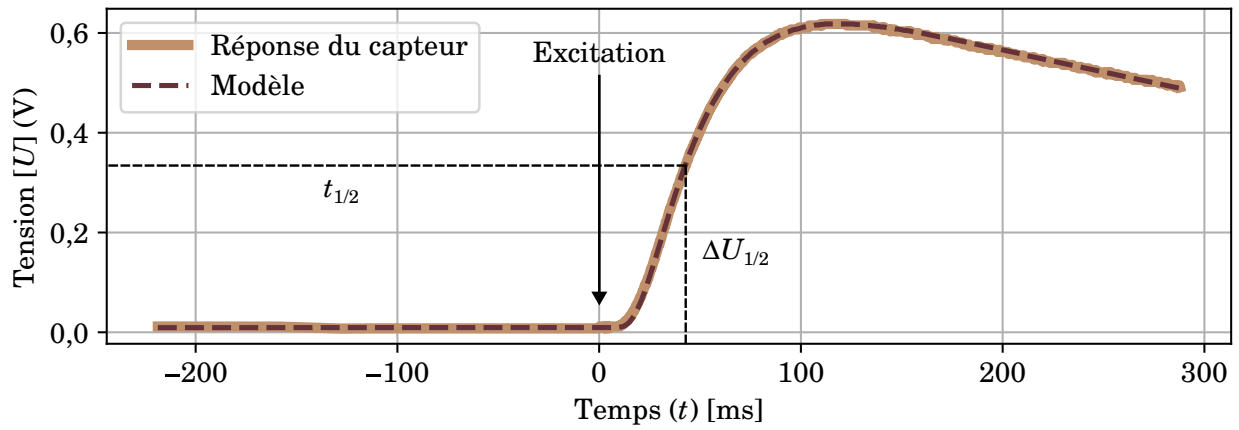


FIGURE 4.4 – Réponse du capteur infrarouge et du modèle en fonction du temps.

les points de mesures est tracée sans prendre en compte certaines valeurs aberrantes (en-dehors du 5<sup>ème</sup> et du 95<sup>ème</sup> centile).

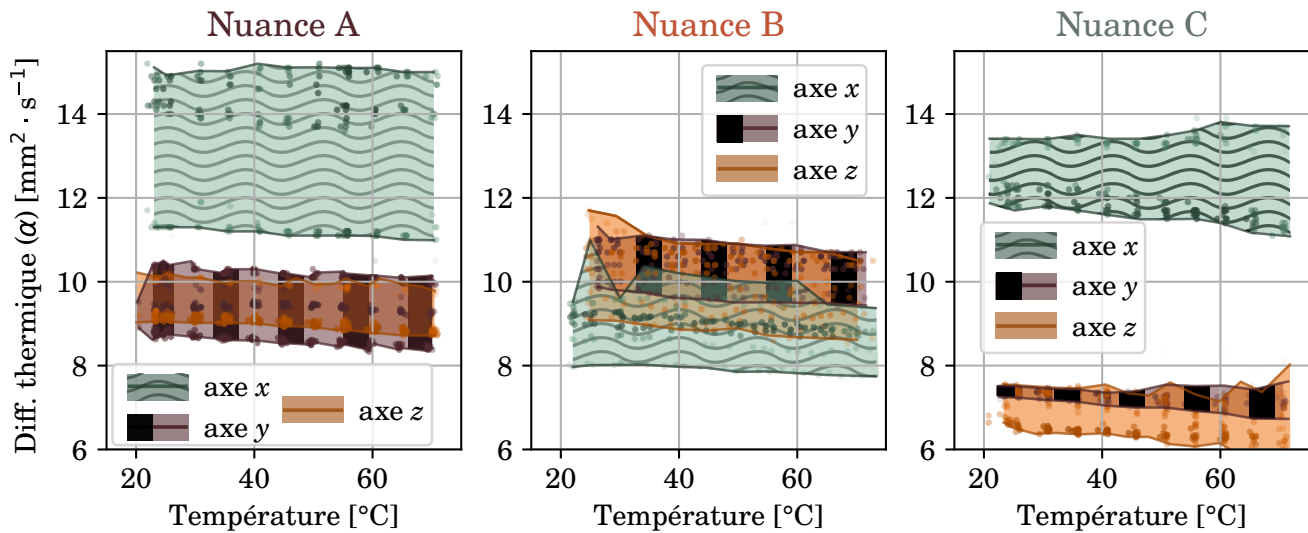


FIGURE 4.5 – Diffusivités thermiques de chaque nuance  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  et  $\alpha_z$  à différentes températures.

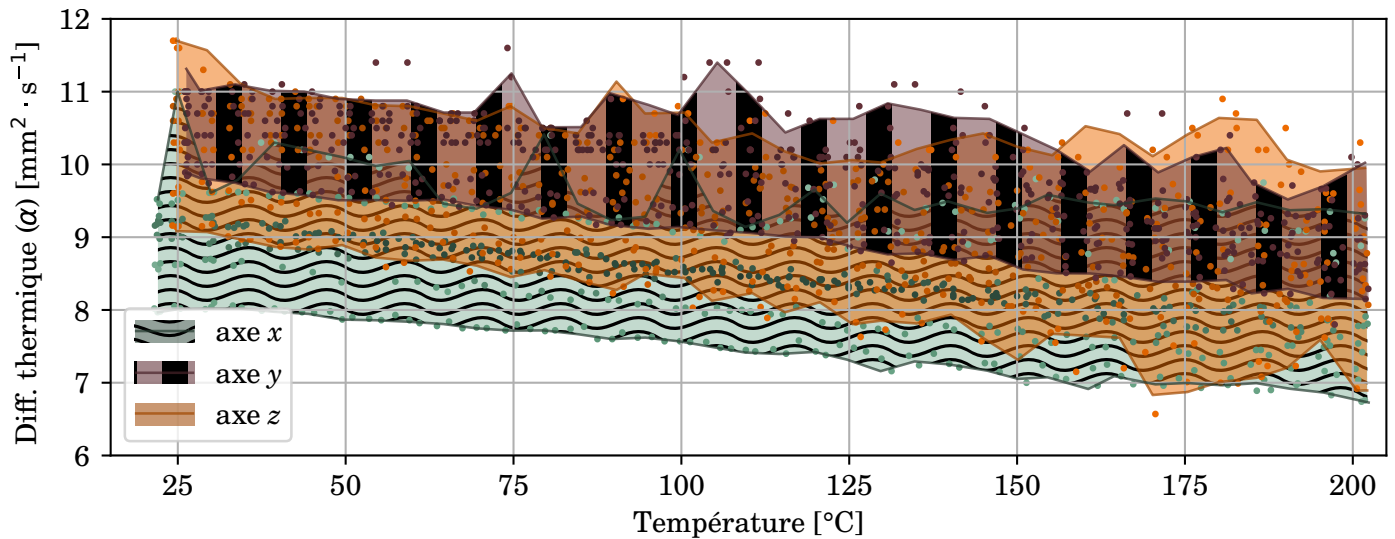


FIGURE 4.6 – Diffusivités thermiques  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  et  $\alpha_z$  de la nuance B à différentes températures.

### Comparaison des nuances

Premièrement, en regardant la figure 4.5, on observe que toutes les valeurs de diffusivité thermique ont le même ordre de grandeur, c'est-à-dire qu'elles se situent entre  $6$  et  $15 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Deuxièmement, les diffusivités sont groupées pour un même échantillon avec peu de valeurs aberrantes à supprimer. Cependant, les courbes peuvent être dispersées au sein d'un même axe et pour une même nuance. C'est le cas notamment des axes  $x$  et  $y$  de la nuance A, avec des valeurs à  $20 \text{ °C}$  comprises entre  $11,5$ - $14,5 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  dans l'axe  $x$  et  $8,5$ - $10,5 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  dans l'axe  $y$ . C'est aussi le cas pour tous les axes de la nuance B où les mesures, à  $20 \text{ °C}$ , ont une dispersion de  $2$  à  $3 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . En revanche, dans un même axe les mesures sont beaucoup plus groupées dans la nuance C, particulièrement pour les axes  $x$  et  $y$ . Cela montre que les nuances A et B ont une structure plutôt hétérogène alors que celle de la nuance C est plus homogène.

Enfin, l'anisotropie des nuances, particulièrement pour les nuances A et C, peut clairement être observée sur cette figure. Sur ces deux nuances, le diffusivité  $\alpha_x$  est nettement plus importante que  $\alpha_y$  et  $\alpha_z$ , avec une valeur  $40 \%$  plus importante pour la nuance A et  $70 \%$  pour la nuance C. Cela est moins le cas dans la nuance B, où  $\alpha_y$  et  $\alpha_z$  sont légèrement supérieures à  $\alpha_x$ . Cette notion d'anisotropie est connue dans les graphites extrudés, dont le plan des feuillets tend à être perpendiculaire au sens d'extrusion [143, 144]. Or, on a vu dans le chapitre 1 que la conductivité thermique est meilleure dans le plan des feuillets et donc que la diffusivité devrait être ici plus grande dans les axes  $y$  et  $z$  que dans l'axe  $x$ , comme c'est le cas pour la nuance B. Les valeurs obtenues pour les nuances A et C, plutôt surprenantes, peuvent alors provenir de la répartition des particules de cuivre dans le matériau.

### Régression linéaire et comparaison par axe

Une régression linéaire est réalisée pour chaque axe et pour chaque nuance en prenant la totalité des mesures réalisées dans chaque cas. La figure 4.7 en affiche les résultats sous forme de trois graphiques, dont chacun affiche les valeurs de toutes les nuances selon un axe sur les différentes plages de température de mesure. Le tableau 4.5 expose les valeurs calculées à  $20 \text{ °C}$  et  $70 \text{ °C}$  ainsi que les pentes en fonction de la température.

Ces résultats mettent davantage en évidence les observations faites dans le paragraphe précédent. Par exemple, on voit plus distinctement que les nuances A et C ont des diffusivités thermiques respectives plus importantes en  $x$  qu'en  $y$  et  $z$ , alors que c'est l'inverse pour la nuance B.

Ensuite, la nuance A est celle qui, en moyenne, diffuse le mieux la chaleur (moyenne de  $10,78 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  sur les trois axes), suivie de la nuance B ( $9,98 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) puis de la nuance C ( $9,13 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). La nuance C étant enrichie dans un métal inconnu, l'hypothèse que ce métal conduise moins la chaleur, même en plus forte proportion que le cuivre, est tout à fait plausible. La nuance A étant plus enrichie en cuivre ( $32 \%$ ) que la nuance B ( $19 \%$ ), la différence de diffusivité constatée entre ces deux nuances est tout à fait logique.

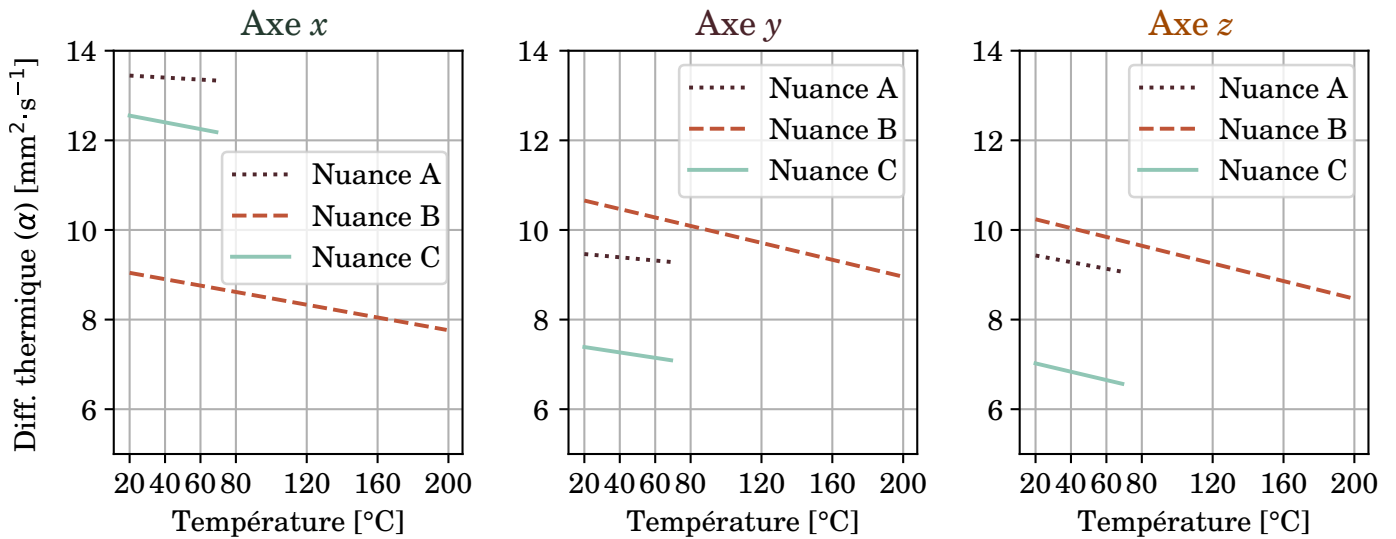


FIGURE 4.7 – Régressions linéaires des diffusivités thermiques en fonction de la température, selon les axes  $x$ ,  $y$ , et  $z$  et pour les trois nuances A, B et C.

Axe	$\alpha_{20^{\circ}\text{C}} / \alpha_{70^{\circ}\text{C}} [\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$						$d\alpha/dT [10^{-3} \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}]$		
	Nuance A		Nuance B		Nuance C		Nuance A	Nuance B	Nuance C
x	13,44	13,33	9,02	8,70	12,70	12,18	-1,9	-7,0	-7,6
y	9,47	9,29	10,65	10,19	7,51	7,01	-4,2	-9,4	-6,2
z	9,42	9,07	10,26	9,76	7,17	6,57	-7,1	-10,0	-8,3
Moyenne	10,78	10,57	9,98	9,55	9,13	8,61	-4,4	-8,8	-7,4

TABEAU 4.5 – Diffusivités thermiques des nuances A, B et C à 20 et 70 °C et pentes calculées par régression linéaire.

Il est connu, à partir de l'équation suivante, que la diffusivité thermique est proportionnelle à la conductivité :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (4.2)$$

avec  $\alpha$  la diffusivité thermique [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $\lambda$  la conductivité [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $\rho$  la masse volumique [ $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ ] et  $C_p$  la chaleur spécifique [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ].

Cependant, les tendances propres à la diffusivité thermique des nuances ne sont pas forcément les mêmes que celles de la conductivité, puisqu'on ne connaît pas la chaleur spécifique des différentes nuances. De même, comme la chaleur spécifique et la masse volumique évoluent avec la température, il est encore moins possible d'estimer la conductivité en se basant sur l'évolution de la diffusivité avec la température. Néanmoins, la diffusivité thermique peut être utilisée comme un indicateur de la conductivité et des flux de chaleur en fonction des axes  $x$ ,  $y$  et  $z$ . En effet, la chaleur spécifique et la masse volumique ne sont pas des propriétés altérées par l'anisotropie.

Les tendances des diffusivités indiquent que le gradient de température dans l'axe  $z$  pourrait être différent entre les nuances A et B : d'un côté, la nuance A diffuse en moyenne mieux la chaleur, mais la nuance B montre des valeurs plus élevées pour  $\alpha_z$ . Ainsi, les températures moyennes  $T_{\text{moy}}$  estimées dans les essais de N. Delcey (figure 4.3 (a)) indiquent seulement que, dans les mêmes conditions expérimentales, une bande de nuance A a une température globale plus élevée que celle d'une nuance B. En revanche, il est compliqué d'estimer que la température de contact soit plus importante sur l'une ou l'autre bande : d'une part les conductivités des nuances A et B ne sont pas identiques et le degré et le type d'anisotropie sont différents. D'autre part, la résistance de contact et la résistance interne sont différentes pour chaque bande du fait de leur différence d'imprégnation en cuivre.

### Comparaison avec les données des fabricants

Des mesures de conductivité thermique des nuances A et B ont été réalisées par le constructeur. Ce paragraphe a donc pour vocation de comparer les valeurs de conductivité mesurée par le fabricant avec les valeurs obtenues en laboratoire, dans le but notamment de consolider et de vérifier les propriétés anisotropiques des deux nuances (voir tableau 4.6). En revanche, comme évoquées précédemment, la diffusivité et la conductivité ne peuvent pas être directement comparées.

	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	moy.	Grandeur	Unité	Source de mesure
Nuance A	25	18,2	17,4	20,2	Conductivité $\lambda$	$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	Fabricant de bande
	13,44	9,47	9,42	10,77	Diffusivité $\alpha$	$mm^2 \cdot s^{-1}$	Laboratoire : LFA 1000
Nuance B	17,6	13,6	15,3	15,5	Conductivité $\lambda$	$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	Fabricant de bande
	9,02	10,65	10,26	9,98	Diffusivité $\alpha$	$mm^2 \cdot s^{-1}$	Laboratoire : LFA 1000

TABLEAU 4.6 – Valeurs des conductivités thermiques fournies par le fabricant et des diffusivités thermiques mesurées au laboratoire sur le banc LFA1000.

Premièrement, les mesures de conductivité et de diffusivité ont la même tendance pour la nuance A, c'est-à-dire qu'elles sont plus importantes dans l'axe *x* que dans les axes *y* et *z*. Pour la nuance B, ce n'est pas le cas. Deuxièmement, tout comme la diffusivité, les mesures de conductivité de la nuance A sont légèrement supérieures à celles réalisées sur la nuance B, ce qui est logique puisque cette nuance est plus enrichie en cuivre. De plus, le cuivre conduit beaucoup mieux la chaleur que le graphite. La nuance A diffuse et conduit aussi beaucoup mieux la chaleur que la nuance B dans l'axe *x* ( $\approx +50\%$ ). Cependant, les valeurs dans les deux autres axes sont moins évidentes à interpréter. Les résultats de conductivité du fabricant montrent que la nuance A conduit un peu mieux que la nuance B dans l'axe *y* et *z*, mais donne des résultats de diffusivité légèrement inférieurs. Or, dans notre cas d'étude, les propriétés thermiques dans l'axe *z* sont celles qui nous intéressent le plus. En effet, les dimensions des échantillons de bande utilisées comme pion sur le banc d'essais sont beaucoup plus importantes en *z* qu'en *x* et *y*.

### Incertitudes sur la mesure de diffusivité thermique

Le tableau 4.7 récapitule les principales incertitudes impliquées dans la mesure de la diffusivité thermique. Comme le montre la figure 4.8, une incertitude de dispersion  $u_{6,s}$  et de reproductibilité  $u_{6,rep}$  est calculée pour chaque palier de température et pour chaque échantillon. Enfin, la moyenne et le 95<sup>ème</sup> centile des résultats de chaque palier *y* sont également représentés. L'incertitude de dispersion et de reproductibilité retenue est la valeur maximale des 95<sup>ème</sup> centiles.

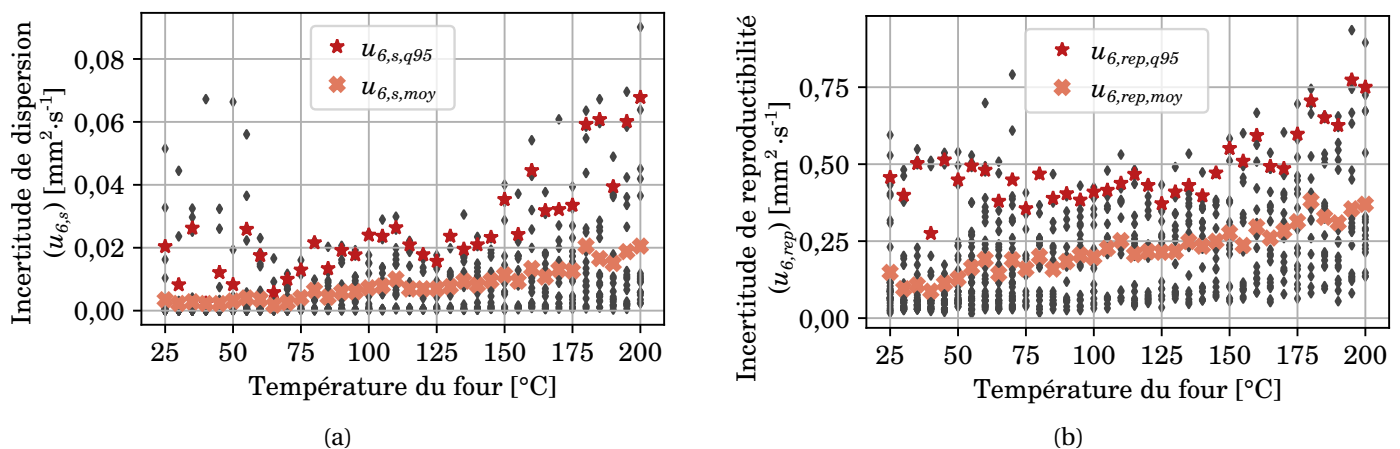


FIGURE 4.8 – Incertitudes de dispersion et de répétabilité en fonction de la température.

Comme on le voit sur l'équation 4.1, l'incertitude de mesure de l'épaisseur de l'échantillon a un impact majeur sur

Type d'incertitude	Notation	Valeur [ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	Commentaires
Dispersion	$u_{6,s,q95,max}$	0,07	Calcul sur l'ensemble des résultats (voir équations 2.17 et 2.18)
Reproductibilité	$u_{6,rep,q95,max}$	0,77	
Mesure d'épaisseur	$u_{6,ep}$	1,15	Valeur pour $\Delta e = \pm 0,05 \text{ mm}^*$ et $t_{1/2} = 0,03 \text{ s}$ (voir équation 4.1)
Totale	$u_6$	1,30	
Composée ( $k=2$ )	$U_6$	2,59	

\* avec  $\Delta e$  l'incertitude de mesure de longueur du pied à coulisse numérique [mm].

TABLEAU 4.7 – Incertitudes sur la mesure de diffusivité thermique.

le résultat de diffusivité thermique. Pour une incertitude de mesure de longueur  $\Delta e$  de 0,05 mm, indiquée sur le pied à coulisse numérique utilisé, l'incertitude de mesure de diffusivité  $u_{6,ep}$  est majoritaire sur l'incertitude totale  $u_6$ . Alors que l'incertitude composée totale s'élève à  $2,6 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , soit 15 à 25 % d'incertitude relative, cette valeur pourrait être facilement réduite en améliorant la précision de mesure d'épaisseur des échantillons (au microscope par exemple).

#### 4.2.4 Synthèse sur les nuances

Ce dernier paragraphe fait la synthèse des observations faites sur les nuances A, B et C.

##### Nuance A

Elle est un peu plus imprégnée que la nuance B en cuivre et donc plus lourde. De plus, d'après les mesures de diffusivité faites sur le banc LFA1000 et de conductivité fournies par le constructeur, c'est la nuance qui conduit le mieux la chaleur. Elle présente une anisotropie importante, notamment en conduisant beaucoup mieux la chaleur dans l'axe  $x$  par rapport aux deux autres axes ( $\alpha_x > \alpha_y, \alpha_z$  et  $\lambda_x > \lambda_y, \lambda_z$ ).

##### Nuance B

La nuance B est la moins imprégnée en cuivre et a donc la plus faible masse volumique. Elle présente une faible anisotropie, mais tend à mieux diffuser la chaleur dans les axes  $y$  et  $z$  que dans l'axe  $x$  ( $\alpha_x < \alpha_y, \alpha_z$ ). Cependant, les conductivités thermiques fournies par le fabricant sont en contradiction avec cette observation ( $\lambda_x > \lambda_z > \lambda_y$ ).

##### Nuance C

La nuance C, la plus imprégnée, mais dans un métal de composition inconnue, a la masse volumique la plus importante. En revanche, elle présente en moyenne une diffusivité thermique plus faible que les nuances A et B. C'est un matériau présentant aussi une forte anisotropie, similaire à celle trouvée dans la nuance A ( $\alpha_x > \alpha_y, \alpha_z$ ).

##### Nuance A versus nuance B

L'anisotropie de la nuance B est moins forte et inversée par rapport à la nuance A. Les essais réalisés par N. Delcey [16] montrent que la nuance A atteint un échauffement en régime permanent plus important que la nuance B, sur une moyenne de températures mesurées à différents endroits et à différentes températures.

##### Nuance A, B versus nuance C

La SNCF décrit l'usure des nuances A et B comme étant similaire. Cette entreprise a aussi mené des essais en ligne afin de comparer l'usure de la nuance A et de la nuance C. Les résultats de ces tests ont montré que la nuance C s'use beaucoup plus que la nuance A, en particulier lorsqu'il n'y a pas de courant.

## 4.3 Plans d'expériences

Lors d'essais expérimentaux, les deux questions habituelles posées sont **pourquoi** et **comment** les sorties varient en fonction des facteurs. Par la suite, les études et résultats présentés se concentrent spécifiquement sur le **pourquoi**

afin de répondre plus rapidement et plus précisément au **comment**.

### Liste des facteurs

Le pourquoi tient son importance dans la complexité du système ainsi que dans le nombre de facteurs importants ; au total sept facteurs, dont six continus et un facteur qualitatif. Les facteurs continus, c'est-à-dire ceux qui peuvent prendre une infinité de valeurs, sont les suivants :

1. la force de contact
2. le courant injecté
3. la vitesse linéaire
4. la vitesse de balayage
5. la surface de contact
6. la raideur de contact

Cette énumération est complétée par la nuance, facteur qualitatif dont les valeurs peuvent difficilement être comparées (composition, procédé de fabrication, propriétés physiques, etc.) et dont le nombre est fini.

### Objectifs

Tout en menant une stratégie d'optimisation du nombre d'essais, répondre au **pourquoi** permet dans un premier temps de répondre à trois objectifs :

1. Dessiner le domaine d'étude (DE), à savoir les bornes inférieures et supérieures des valeurs que pourront prendre les facteurs.
2. Identifier les facteurs influents pour chaque réponse sur lesquels l'étude pourra se concentrer par la suite.
3. Connaître les interactions entre les facteurs.

Les essais n'ont en revanche pas pour vocation de créer un modèle heuristique comme l'on peut en trouver dans l'état de l'art [91, 4].

### Méthode des plans d'expérience

Pour cela, la méthode des plans d'expérience mise au point dans les années 1960 par Taguchi G. [145] est utilisée. Cette méthode, souvent employée en entreprise pour améliorer un produit ou un processus, consiste à construire un plan d'expériences sous forme de matrices. Chaque facteur  $y$  est représenté en étant fixé à un certain nombre de valeurs appelées niveaux. Dans le cas où un modèle est établi, le nombre de niveaux est défini suivant l'ordre du polynôme pour chaque facteur. Par exemple, la réponse  $y$ , dépendante de trois facteurs  $x_A$ ,  $x_B$  et  $x_C$ , s'écrit sous la forme :

$$y(x_A, x_B, x_C) = a_1 \cdot x_A^3 + a_2 \cdot x_A + b \cdot x_B^2 + c \cdot x_C + d \quad (4.3)$$

alors  $x_A$ ,  $x_B$  et  $x_C$  devront prendre respectivement, au minimum, 4, 3 et 2 niveaux pour trouver les valeurs  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$  et  $c$ .

Dans le cas où l'on ne connaît pas l'ordre du polynôme, les facteurs prennent souvent deux niveaux pour limiter le nombre d'essais tout en estimant l'impact de chaque facteur. Dans ce cas, les valeurs choisies sont situées soit aux extrema permis, soit à des extrema arbitraires.

Différents plans peuvent donc être construits, notamment les plans complets et les plans factoriels qui sont utilisés pour construire les matrices d'essais.

#### 4.3.1 Plan complet

Cette partie décrit la méthodologie du plan complet, mise en place pour mener les essais décrits (section 4.5). Le plan complet a pour particularité de prendre en compte toutes les combinaisons possibles. Trois facteurs considérés comme influents, notés  $x_A$ ,  $x_B$  et  $x_C$ , ont été identifiés pour ces essais. Ils prennent chacun trois niveaux -, ~ et + (utilisation de la notation de Yates). Afin d'étudier toutes les combinaisons, la matrice d'expériences se compose de série de  $3^3$  essais dont la matrice est donnée tableau 4.8. Une fois les réponses obtenues, en l'occurrence les valeurs d'échauffement du pion en régime permanent, les effets des facteurs et de leurs interactions sont calculés.

n° test	$x_A$	$x_B$	$x_C$	n° test	$x_A$	$x_B$	$x_C$	n° test	$x_A$	$x_B$	$x_C$
1	-	-	-	10	~	-	-	19	+	-	-
2	-	-	~	11	~	-	~	20	+	-	~
3	-	-	+	12	~	-	+	21	+	-	+
4	-	~	-	13	~	~	-	22	+	~	-
5	-	~	~	14	~	~	~	23	+	~	~
6	-	~	+	15	~	~	+	24	+	~	+
7	-	+	-	16	~	+	-	25	+	+	-
8	-	+	~	17	~	+	~	26	+	+	~
9	-	+	+	18	~	+	+	27	+	+	+

TABLEAU 4.8 – Matrice d’expériences pour un plan complet de 3 facteurs à 3 niveaux.

### Notion d’effet

Pour chaque niveau  $i$ , un facteur  $f$  a un effet sur la réponse calculée ainsi :

$$E_{f,i} = \overline{y_{f,i}} - \overline{y} \quad (4.4)$$

avec  $E_{f,i}$  l’effet du facteur  $f$  au niveau  $i$ ,  $\overline{y_{f,i}}$  la moyenne des réponses lorsque le facteur  $f$  est au niveau  $i$  et  $\overline{y}$  la moyenne de tous les essais. Pour  $n$  niveaux, la somme des effets doit ensuite vérifier la relation :

$$\sum_i^n E_{f,i} = 0 \quad (4.5)$$

Calculer les effets permet de tracer une surface de réponse telle que représentée figure 4.9 (a).

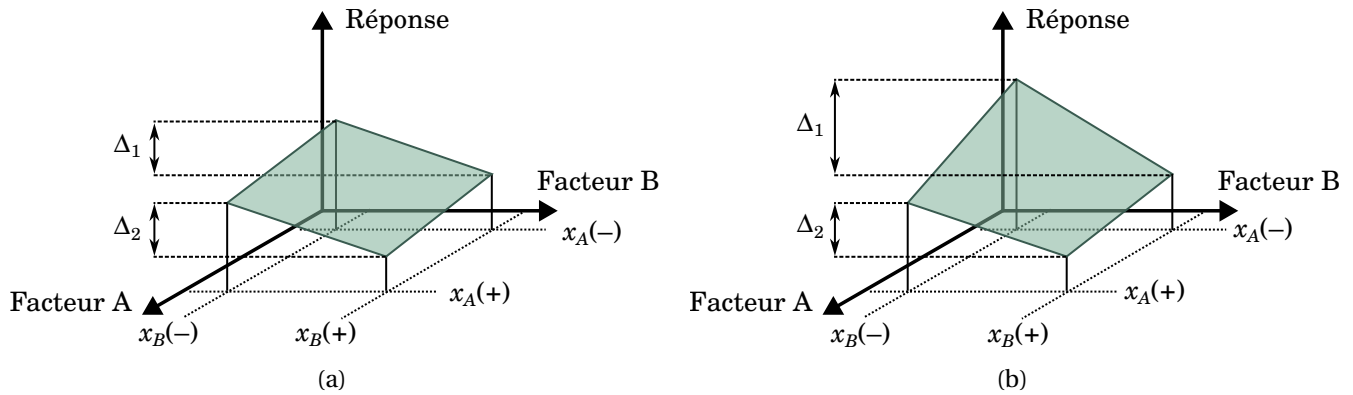


FIGURE 4.9 – Exemple d’un plan complet de deux facteurs  $x_A$  et  $x_B$  à deux niveaux : (a) pas d’interaction, (b) interaction entre  $x_A$  et  $x_B$ .

### Notion d’interaction

Cependant, les facteurs peuvent avoir des interactions entre eux, par exemple dans des configurations particulières. Pour mieux comprendre cette notion, la figure 4.9 donne un exemple de réponses observées dans le cadre d’un plan complet de deux facteurs  $x_A$  et  $x_B$  ayant chacun deux niveaux. Dans le premier cas, figure 4.9 (a), il n’y a aucune interaction entre les deux facteurs puisque l’effet calculé lorsque  $x_B$  passe du niveau – au niveau + est indépendant du niveau de  $x_A$ . L’équation suivante est alors vérifiée :

$$\Delta_1 = \Delta_2 \quad \text{avec} \quad \Delta_1 = y_{A2,B1} - y_{A2,B2} \quad \text{et} \quad \Delta_2 = y_{A1,B1} - y_{A1,B2} \quad (4.6)$$

En revanche, il y a interaction entre  $x_A$  et  $x_B$  sur la figure 4.9 (b) puisque l’équation 4.6 n’est pas vérifiée.

Une interaction est d’ordre  $n$  lorsqu’elle a lieu entre  $n$  facteurs. Les interactions d’ordre supérieur à 3 sont générale-

ment négligeables. Pour deux facteurs  $f_1$  et  $f_2$ , l'effet d'une interaction d'ordre 2 se calcule de la manière suivante :

$$E_{f_1,i;f_2,j} = \overline{y_{f_1,i;f_2,j}} - \bar{y} - E_{f_1,i} - E_{f_2,j} \quad (4.7)$$

avec  $E_{f_1,i;f_2,j}$  l'interaction entre le facteur  $f_1$  à la valeur  $i$  et le facteur  $f_2$  à la valeur  $j$  et  $\overline{y_{f_1,i;f_2,j}}$  la moyenne des réponses lorsque  $f_1 = i$  et  $f_2 = j$ .

En représentant les effets des interactions sous forme de tableau (voir tableau 4.9), et de la même manière que la somme des effets d'un facteur est nulle (eq. 4.5), la somme des effets des interactions est nulle en ligne et en colonne.

De manière analogue, l'interaction d'ordre 3 est égale à :

$$E_{f_1,i;f_2,j;f_3,k} = \overline{y_{f_1,i;f_2,j;f_3,k}} - \bar{y} - E_{f_1,i} - E_{f_2,j} - E_{f_1,i;f_2,j} - E_{f_2,j;f_3,k} - E_{f_1,i;f_3,k} \quad (4.8)$$

A \ B	-	~	+	Somme
-	$E_{A,1;B,1}$	$E_{A,2;B,1}$	$E_{A,3;B,1}$	0
~	$E_{A,1;B,2}$	$E_{A,2;B,2}$	$E_{A,3;B,2}$	0
+	$E_{A,1;B,3}$	$E_{A,2;B,3}$	$E_{A,3;B,3}$	0
Somme	0	0	0	

TABLEAU 4.9 – Effets des interactions entre les facteurs A et B.

### 4.3.2 Plan fractionnaire

Un plan complet n'est pas toujours faisable lorsque le nombre de facteurs devient trop grand et que le temps nécessaire de chaque essai est important. De plus, il offre la possibilité d'étudier l'effet des facteurs, mais aussi la totalité des interactions entre eux. Par exemple, pour des essais se basant sur six facteurs à deux niveaux,  $2^6$  essais sont à réaliser pour un plan complet, soit 64 essais. Dans cette configuration, les valeurs suivantes peuvent être calculées :

- 1 moyenne des essais
- 6 effets des différents facteurs
- 15 interactions d'ordre 2
- 20 interactions d'ordre 3
- 15 interactions d'ordre 4
- 6 interactions d'ordre 5
- 1 interaction d'ordre 6

Le plan fractionnaire est un outil permettant de réduire la charge expérimentale à partir d'un sous-ensemble du plan complet. La création d'un tel plan impose une certaine rigueur puisqu'il doit être orthogonal et respecter la règle des degrés de liberté. Construire ce type de plan demande également une bonne connaissance du système puisqu'il est nécessaire de confondre des effets, c'est-à-dire de créer des alias.

#### Règle d'orthogonalité

Une matrice d'expérience orthogonale est indispensable pour pouvoir calculer chaque effet et interaction de manière équilibrée. Cela veut dire que dans le calcul des interactions ou des effets, chaque facteur doit être autant de fois à ses différents niveaux. Prenons le cas d'un plan complet de deux facteurs A et B ayant chacun deux niveaux, 1 et 2. Dans chaque calcul des effets de A, le facteur B doit être une fois au niveau 1 et une fois au niveau 2.

#### Conditions sur les degrés de liberté

Un degré de liberté (ddl) représente le nombre de valeurs différentes que peut prendre un facteur moins un. Dans l'exemple précédent, le facteur  $x_A$  ayant deux niveaux a donc un ddl égal à 1, tandis que dans le plan du tableau 4.8 chaque facteur a un ddl égal à 2 (puisque 3 niveaux). Le nombre de degrés de liberté indique aussi le nombre de calculs nécessaires pour estimer les effets. Ainsi, pour un facteur à 2 niveaux, un seul de ces effets doit être calculé puisque



l'autre peut être déduit par l'équation 4.5. De même, si l'on reprend le tableau 4.9 où A et B ont trois niveaux, les effets des interactions entre ces facteurs peuvent être calculés à partir de quatre valeurs. Dans ce cas, l'interaction a quatre ddl et vérifie l'équation :

$$ddl_{x_A x_B} = ddl_{x_A} \cdot ddl_{x_B} \quad (4.9)$$

Dans un plan fractionnaire composé de  $n$  facteurs, un choix est fait sur la restriction des effets et interactions étudiés. Dans ce cas, le nombre d'essais minimum  $N_{\min}$  doit être supérieur à la somme des degrés de liberté de chaque facteur  $i$ , plus un (pour le calcul de la moyenne de tous les essais) :

$$N_{\min} = 1 + \sum_i^n ddl_i \quad (4.10)$$

### Notion d'alias

Dans les plans à deux niveaux, la manière la plus simple de construire un plan fractionnaire à partir d'un plan complet est de couper ce dernier en deux. Ainsi, le nombre d'essais est directement divisé par deux. Dans le cas d'un tableau de trois facteurs à deux niveaux, un plan complet nécessite huit essais. Le tableau 4.10(a) donne une représentation de la matrice des effets sous la notation de Yates (les valeurs hautes sont notées + et les valeurs basses -). Les valeurs des interactions sont le produit des valeurs des facteurs :

$$x_A x_B = x_A \cdot x_B \quad (4.11)$$

On décide arbitrairement de diviser la matrice en deux en sélectionnant les lignes où le produit  $x_A x_B x_C$  prend la valeur haute +, ce qui mène au tableau 4.10(b). L'effet de l'interaction entre  $x_A$ ,  $x_B$  et  $x_C$  ne pourra alors plus être calculé. En effet, on observe dans le tableau 4.10(a) que, pour les cases colorées, les colonnes  $x_A$  et  $x_B x_C$  ;  $x_B$  et  $x_A x_C$  ;  $x_C$  et  $x_A x_B$  sont identiques. Ces colonnes sont alors des alias, c'est-à-dire qu'elles sont confondues. Par exemple, l'effet de  $x_A$  ne pourra plus être distingué de l'effet de l'interaction entre  $x_B$  et  $x_C$ . De ce fait, il est judicieux lors de la préparation du plan factoriel de choisir les effets à éliminer et les effets à confondre.

N°	$x_A$	$x_B$	$x_A x_B$	$x_C$	$x_A x_C$	$x_B x_C$	$x_A x_B x_C$
1	-	-	+	-	+	+	-
2	-	-	+	+	-	-	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	-	+	+	+	-	+	-
5	+	-	-	-	-	+	+
6	+	-	+	+	+	-	-
7	+	+	-	-	-	-	-
8	+	+	+	+	+	+	+

(a)

N°	$x_A + x_B x_C$	$x_B + x_A x_C$	$x_C + x_A x_B$
2	-	-	+
3	-	+	-
5	+	-	-
8	-	+	+

(b)

TABLEAU 4.10 – Matrice d'expériences représentant la transformation (a) d'un plan complet  $2^3$  en (b) un plan fractionnaire avec ses alias.

### 4.3.3 Analyse de la variance

Tandis que les effets des facteurs et des interactions permettent d'estimer la variation de la réponse aux différents niveaux des facteurs ou des interactions, une analyse de la variance (ANOVA) permet de mesurer leur influence sur les variations de la réponse. Pour cela, la somme des carrés des écarts est calculée pour chaque facteur et interaction.

#### Somme des carrés des écarts

La somme des carrés des écarts d'un facteur  $SCE_f$  est calculée suivant l'équation :

$$SCE_f = \gamma_f \cdot \sum_i^{N_f} E_{f,i}^2 \quad (4.12)$$

avec  $N$  le nombre total d'essais,  $N_f$  le nombre de niveaux de  $f$  et  $\gamma_f = \frac{N}{N_f}$  le nombre d'essais pour lesquels le facteur  $f$  prend un de ses  $N_f$  niveaux.

La somme des carrés des écarts  $SCE_{f_1, f_2}$  de l'interaction de deuxième ordre entre  $f_1$  et  $f_2$  est ensuite calculée :

$$SCE_{f_1, f_2} = \zeta_{f_1, f_2} \cdot \sum_i^{N_{f_1}} \sum_j^{N_{f_2}} E_{f_1, i; f_2, j}^2 \quad (4.13)$$

avec  $N_{f_1}$  et  $N_{f_2}$  le nombre de niveaux de  $f_1$  et  $f_2$  et  $\zeta_{f_1, f_2} = \frac{N}{N_{f_1} \cdot N_{f_2}}$  le nombre d'essais pour lesquels  $f_1$  prend un de ses  $N_{f_1}$  niveaux et  $f_2$  un de ses  $N_{f_2}$  niveaux.

De manière similaire, la somme des carrés des écarts  $SCE_{f_1, f_2, f_3}$  d'une interaction de troisième ordre est calculée par l'équation suivante :

$$SCE_{f_1, f_2, f_3} = \zeta_{f_1, f_2, f_3} \sum_i^{N_{f_1}} \sum_j^{N_{f_2}} \sum_k^{N_{f_3}} E_{f_1, i; f_2, j; f_3, k}^2 \quad (4.14)$$

avec  $\zeta_{f_1, f_2, f_3} = \frac{N}{N_{f_1} \cdot N_{f_2} \cdot N_{f_3}}$  le nombre d'essais pour lesquels  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  prennent respectivement un de leurs niveaux.

Enfin, l'identité sur la somme des carrés des écarts totaux  $SCE_t$  est vérifiée :

$$SCE_t = \sum_i^{N_{f_1}} \sum_j^{N_{f_2}} \sum_k^{N_{f_3}} (y_{ijk} - \bar{y})^2 = \sum_f^{N_{SCE}} SCE_f \quad (4.15)$$

avec  $N_{SCE}$  le nombre de sommes des carrés des écarts calculé et  $SCE_f$  la somme des carrés des facteurs ayant un ordre et ciblant des facteurs spécifiques.

Cependant, dans le cas où certains effets de facteurs ou d'interactions ne sont pas calculés, un facteur résiduel  $SCE_r$  existe de manière à ce que :

$$SCE_t = \sum_f^{N_{SCE}} SCE_f + SCE_r \quad (4.16)$$

### Représentation des effets

Deux méthodes sont utilisées pour représenter les effets. La première, décrite figure 4.9, se fait sous forme de segments de droite dont le coefficient directeur vaut l'effet d'un facteur. La deuxième se base sur l'équation 4.15 et indique l'influence des facteurs et interactions  $\%_f$  :

$$\%_f = \frac{SCE_f}{SCE_t} \cdot 100 \quad (4.17)$$

avec  $\%_f$  l'influence de  $f$  sur la réponse  $y$  [%].

Les deux méthodes sont complémentaires, avec d'un côté la représentation graphique d'un effet révélant le sens de pente ainsi que son coefficient directeur, et de l'autre les influences des facteurs et des interactions donnant des valeurs comparatives. La méthode des plans complets est utilisée dans la section 4.5 tandis que celle des plans fractionnaires est mise en place dans la section 4.6.

## 4.4 Comportement thermique du pion

Cette partie traite de l'évolution de la température du pion en fonction de différents facteurs. Dans un premier temps, l'évolution de la température lue sur le thermocouple 1 est analysée en fonction de la hauteur de la sonde par rapport au contact pion/disque. Les résultats permettent ainsi d'estimer le gradient au plus proche du contact (1-5 mm). Dans un deuxième temps, l'évolution des températures des thermocouples 1, 2 et 3 en fonction du courant est étudiée pour mieux comprendre le comportement thermique du système disque/pion/pince.

### 4.4.1 Température et hauteur entre la sonde et le contact

Pour cette étude, il est tout d'abord important de prendre en compte et de définir la température du disque  $T_d$ . Rappelons que le disque est instrumenté à l'aide de thermocouples répartis selon 3 couronnes (avec  $r=25$  cm pour la couronne c1 ; 30 cm pour c2 ; 46 cm pour c3, voir figure 2.16 (a)). La chaîne d'acquisition de certaines températures ne fonctionnant plus, seulement cinq thermocouples par couronne sont utilisés pour calculer les températures moyennes de chaque couronne  $T_{c1}$ ,  $T_{c2}$  et  $T_{c3}$ . La figure 4.10 présente les températures des trois couronnes et la température moyenne du disque en fonction du temps, pour un test avec la nuance A et  $F_N=60$  N,  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup> et  $I=60$  A. D'une part, le disque subit un échauffement avec une température sur la troisième couronne  $T_{c3}$  pouvant évoluer de 20 à 40 °C. D'autre part, un gradient radial est observé selon les trois couronnes, de valeur 0,35 °C·cm<sup>-1</sup> pouvant s'expliquer ainsi :

- Le captage réalisé sur le bord du disque par les deux blocs de graphite (voir figure 2.7) génère deux points chauds.
- La bride sur laquelle est fixée le disque (voir figure 3.1 (c)) évacue un flux de chaleur.
- Le coefficient d'échange selon le rayon est plus important aux extrémités du disque qu'à l'intérieur[146].

La température du pion en régime permanent étant directement liée à celle du disque, la différence de température est donc calculée de la façon suivante :

$$\Delta T_1 = T_1 - T_d \quad \text{avec} \quad T_d = \frac{T_{c1} + T_{c2} + T_{c3}}{3} \quad (4.18)$$

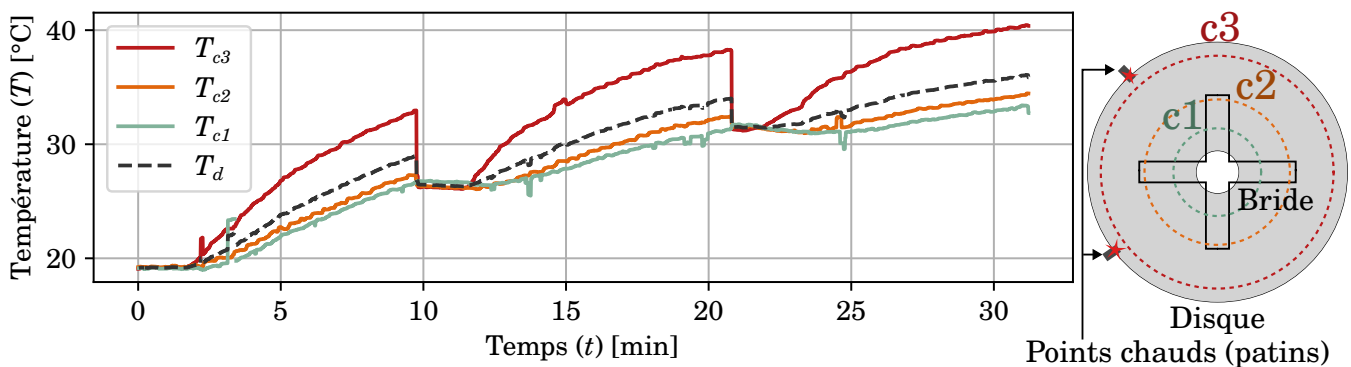


FIGURE 4.10 – Variation des températures moyennes de chaque couronne  $T_{c1}$ ,  $T_{c2}$  et  $T_{c3}$  et de la température moyenne du disque  $T_d$  en fonction du temps (voir figure 2.16 (a)).

La forme du gradient de température dans le pion reste pour le moment inconnue. Or, les températures mesurées  $T_2$ ,  $T_3$  et particulièrement  $T_1$  qui a la sonde la plus proche du contact; peuvent évoluer en fonction de leur hauteur par rapport à la surface du disque. Des essais ont donc été réalisés afin d'étudier la température  $T_1$  en fonction de la hauteur de la sonde  $h_{T_1}$  par rapport au contact.

Tout d'abord, la figure 4.11 (a) présente la distance parcourue en fonction de la hauteur du thermocouple 1 pour trois essais réalisés et pour différentes configurations. Ensuite, la figure 4.11 (b) met en évidence les variations de l'échauffement entre le pion et le disque  $\Delta T_1$  en fonction de la distance. Pour chaque test, l'évolution de la hauteur  $h_{T_1}$  en fonction de la distance parcourue est aussi tracée.

Premièrement, la hauteur du thermocouple 1 par rapport au contact, étant de 5 mm en début d'essai, atteint en fin d'essai une valeur de 2 mm pour les tests 1 et 2 et de 1,2 mm pour le test 3. Pour ce dernier, la hauteur

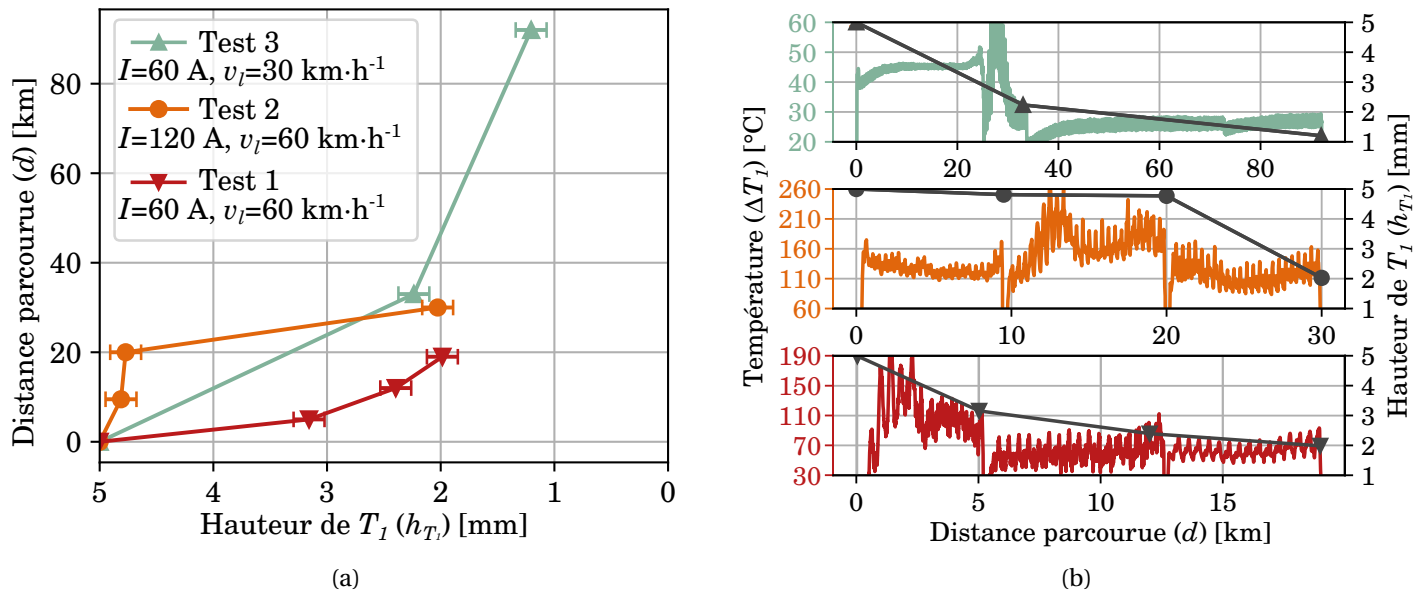


FIGURE 4.11 – Pour différents courants et vitesses linéaires ( $F_N=60$  N, Nuance A), (a) distance parcourue en fonction de la hauteur du thermocouple 1  $h_{T_1}$  et (b) température  $\Delta T_1$  en fonction de la hauteur  $h_{T_1}$ .

atteint pratiquement la hauteur limite des encoches qui sont de 4 mm. De plus, ces valeurs d'usure sont enregistrées après différentes distances : 20 km pour le test 1, 25 km pour le test 2 et 70 km pour le test 3. Au niveau des tracés de températures, différents comportements segmentés par les points de mesure de hauteur, sont observés. Ces comportements se caractérisent par des valeurs d'échauffement à régime permanent présentant des oscillations ayant des amplitudes plus ou moins importantes. Ces observations sont commentées plus tard dans la section 4.6 de ce chapitre.

Deuxièmement, il n'y a pas de nette évolution de  $\Delta T_1$  qui se dégage lorsque  $h_{T_1}$  diminue. Dans le test 1, après une période de rodage, la température fluctue périodiquement entre 40 et 90 °C alors que la hauteur passe de 3,2 à 2 mm. Pour le test 2, lorsque la hauteur chute de 4,8 à 2 mm,  $\Delta T_1$  oscille autour de 130 °C dans un premier temps, puis autour de 100 °C et enfin de nouveau autour de 130 °C. Finalement, il y a une légère évolution dans le test 3 où  $\Delta T_1$  évolue de 40 à 45 °C alors que la hauteur diminue de pratiquement 3 mm (finissant à 2 mm sur cette portion). Cependant, on voit sur la suite de l'essai que  $\Delta T_1$  décroît rapidement puis oscille autour de 27 °C.

La corrélation entre la hauteur et la température mesurée sur le thermocouple 1 est donc difficile à établir. Cependant, le gradient reste faible sur une hauteur par rapport au contact allant de 1 mm à 5 mm. De plus, on peut voir dès à présent que l'échauffement est surtout lié aux conditions de contact.

#### 4.4.2 Évolution des températures des sondes du pion

Après avoir montré que la température  $T_1$  évolue peu en fonction de la hauteur de la sonde avec le contact, cette section vise à étudier l'évolution des températures mesurées par les trois thermocouples insérés dans le pion. Afin de limiter les effets de convection, la pince est entourée de protection en aluminium et de feuilles en isolant plastique (voir figure 4.12 (a)). On rappelle que le pion est entouré de cuivre le pinçant qui permet de conduire le courant. Cet ensemble est lui-même pincé dans deux pièces de PTFE (Polytétrafluoroéthylène) jouant le rôle d'isolant électrique. Avec une conductivité de  $0,25 \text{ W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$ , le PTFE est également dans cette configuration un isolant thermique. Par ailleurs, des pions ayant une hauteur légèrement plus importante sont découpés afin d'avoir le thermocouple 2 proche de l'interface entre le pion et la pince en cuivre (voir figure 4.12 (b)).

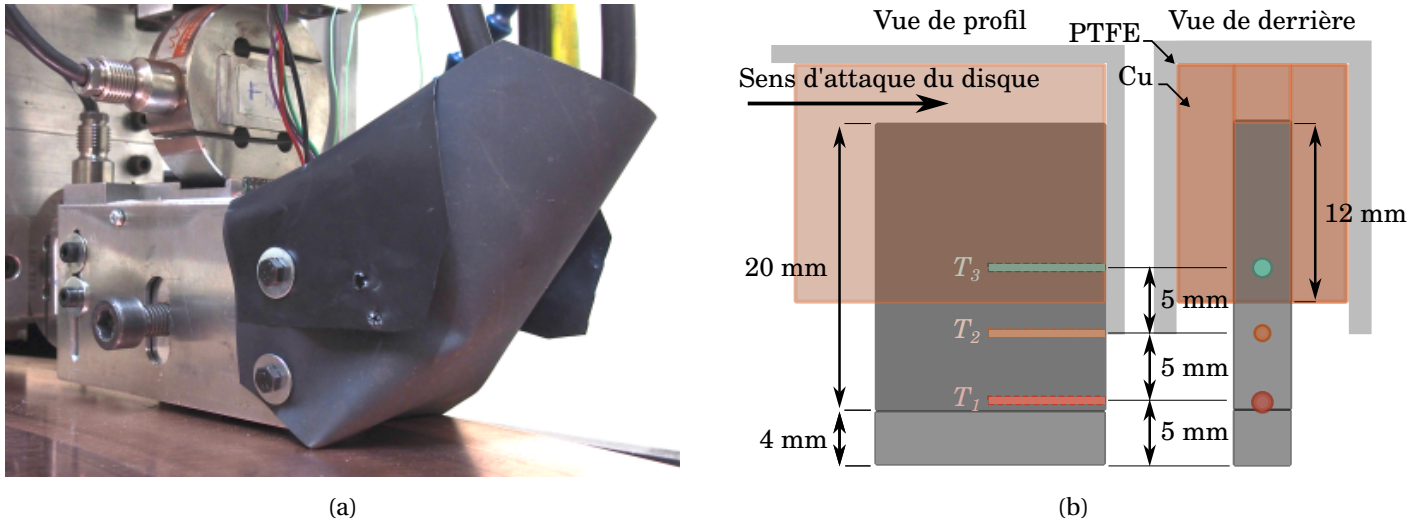


FIGURE 4.12 – (a) Pince entourée d'un cache en aluminium et de feuilles de plastique permettant de limiter la convection. (b) Géométrie du pion, de la pince en cuivre et des pièces en plastique de PTFE l'entourant.

Les températures  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  sont mesurées pour différents courants, en prenant en compte comme précédemment la température du disque  $T_d$ . Pour cela, les écarts de température  $\Delta T_2$  [°C] et  $\Delta T_3$  [°C] sont calculés de la même manière que  $\Delta T_1$  (voir équation 4.18) :

$$\Delta T_2 = T_2 - T_d \quad \text{et} \quad \Delta T_3 = T_3 - T_d \quad (4.19)$$

Des essais sont réalisés avec et sans limitation de la convection et pour différents courants. La figure 4.13 représente  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  et  $\Delta T_3$  en régime permanent en fonction du courant. Ces valeurs sont également affichées en fonction de la hauteur des thermocouples par rapport au contact  $h_c$  et du niveau de courant. De plus, les températures étant proches les unes des autres, leurs valeurs numériques sont indiquées dans le tableau 4.11.

### Résultats

À bas courant ( $I \leq 50$  A), il n'y a pas de gros écart lorsque les essais sont menés avec et sans convection. Pour  $\Delta T_1$  et  $\Delta T_2$ , les écarts de température ne dépassent pas 10 °C dans les deux configurations. En revanche,  $\Delta T_3$  est inférieur lorsque la convection n'est pas limitée et lorsque le courant est supérieur à 50 A. La convection a donc une influence limitée sur l'évacuation de la chaleur du pion.

Ensuite, on observe que la pente liée aux variations de température en fonction de la hauteur s'inverse au fur et à mesure que le courant augmente. Pour  $I=0$  A et  $I=50$  A, l'évolution des écarts de température en fonction de la hauteur semble linéaire, puis se courbe lorsque  $I > 50$  A jusqu'à s'inverser pour  $I > 150$  A avec  $\Delta T_1 < \Delta T_3 < \Delta T_2$ . Finalement, lorsque  $I=200$  A,  $\Delta T_2$  est supérieur à  $\Delta T_1$  avec un écart de 9 à 12 °C suivant si la convection est limitée ou pas.

$I$ [A]	Avec convection				Convection limitée			
	$\Delta T_1$ [°C]	$\Delta T_2$ [°C]	$\Delta T_3$ [°C]	$T_d$ [°C]	$\Delta T_1$ [°C]	$\Delta T_2$ [°C]	$\Delta T_3$ [°C]	$T_d$ [°C]
0	5,7	2,8	0,6	27,0	4,0	-1,1	-4,0	47,3
50	15,9	12,0	5,9	37,0	12,1	9,2	5,5	46,8
100	43,2	40,0	32,9	43,5	36,4	37,9	35,7	46,3
150	81,1	84,5	76,2	46,5	75,2	81,3	79,4	46,2
175	88,0	95,1	91,8	47,6	97,9	109,7	108,6	45,0
200	113,2	121,1	119,0	48,9	118,0	130,2	127,8	43,6

TABLEAU 4.11 – Écarts de température mesurés pour différents courants et extraits de la figure 4.13 (Nuance B,  $\nu_l=30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et  $F_N=70 \text{ N}$ ).

Enfin, une réponse temporelle de la montée en température du pion est affichée figure 4.14 pour un courant fixé

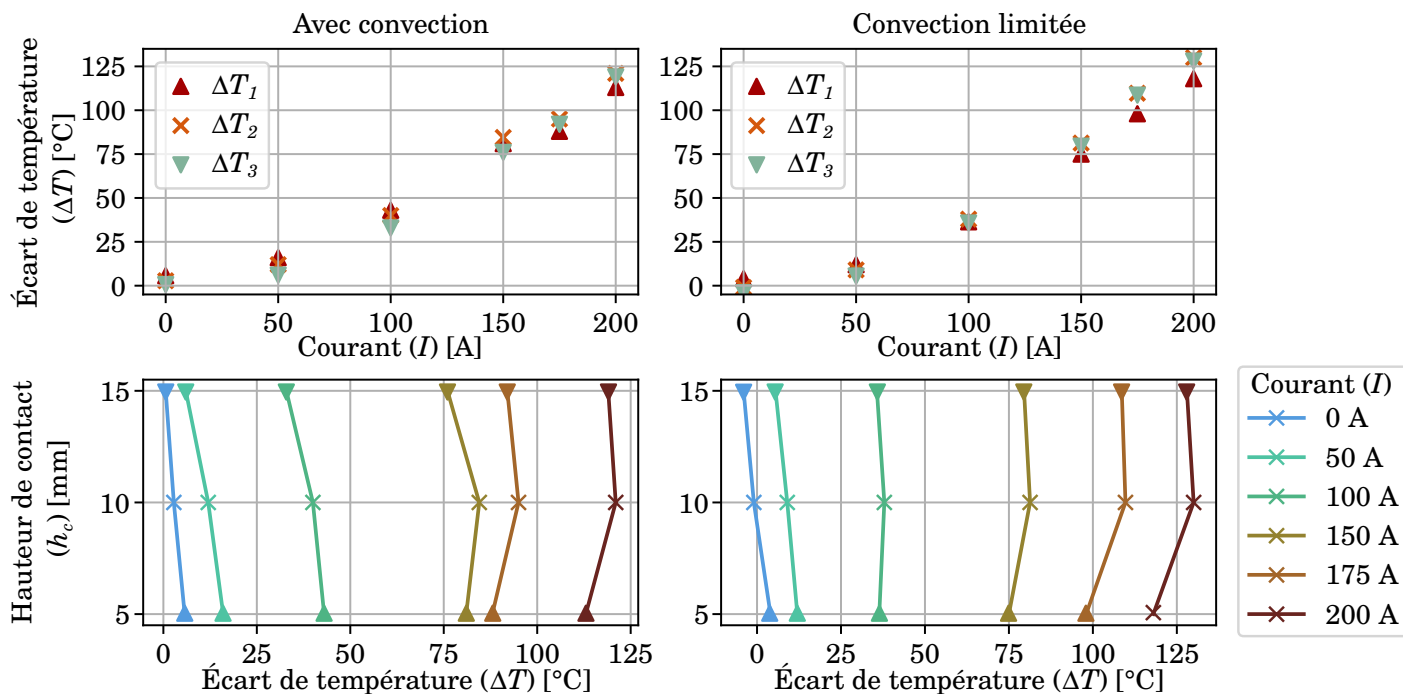


FIGURE 4.13 – Évolution de la température en fonction du courant injecté et de la hauteur des thermocouples par rapport au contact  $h_c$  (Nuance B,  $v_l=30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et  $F_N=70 \text{ N}$ ).

à 200 A. Alors que dans un premier temps  $\Delta T_1 > \Delta T_2 > \Delta T_3$ , on observe que l'écart de température  $\Delta_1$  se stabilise à 118 °C après 4 minutes, tandis que  $\Delta T_2$  et  $\Delta T_3$  continuent d'augmenter pour atteindre une valeur respective de 130 °C et 128 °C.

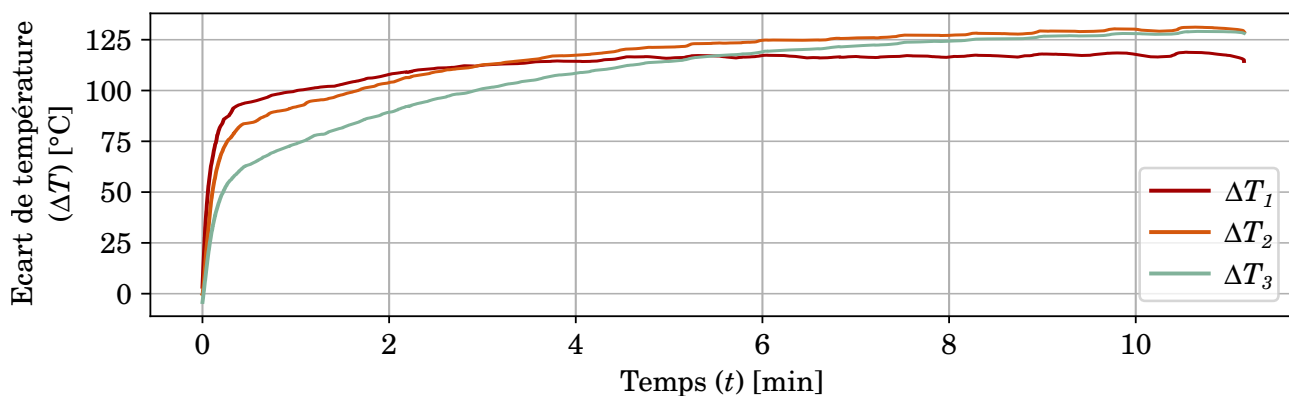


FIGURE 4.14 – Variation des écarts de température en fonction du temps (Nuance B,  $I=200 \text{ A}$ ,  $v_l=30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et  $F_N=70 \text{ N}$ ).

### Hypothèses

L'inversion de la pente des variations de températures dans le pion lors que le courant augmente a différentes causes possibles qui sont schématisées figure 4.15 :

1. Figure 4.15(a) : le volume du pion sortant de la pince en cuivre a sa surface convectée. Comme on le voit sur la réponse temporelle de la figure 4.14, le volume sortant du pion est plus réactif que celui entouré de cuivre, traduisant une différence d'inertie entre les deux volumes. Le thermocouple 1 étant positionné dans le volume à faible inertie et au plus proche de la surface convectée, le déséquilibre avec les deux autres sondes est donc d'autant plus important.
2. Figure 4.15(b) : la différence de température entre le pion et le disque croît avec le courant, ce qui a pour

conséquence d'augmenter le flux de conduction du pion vers le disque. La masse de ce dernier est beaucoup plus importante que celle du pion (80 kg *vs* 20 g), et il peut donc accumuler de la chaleur tout en étant refroidi avec sa rotation. Ce flux existe aussi dans le contact électrique glissant bande/fil. Cependant, la masse de la bande est beaucoup plus importante qu'une portion du fil de contact et le flux par conduction se propage dans deux directions dans la bande (longueur  $\vec{x}$  et hauteur  $\vec{z}$ ) et dans une direction dans le fil. C'est l'inverse dans notre système pion/disque : le flux se propage seulement dans une direction dans le pion (hauteur  $\vec{z}$ ) et principalement dans deux directions dans le disque (rayon  $\vec{r}$  et vitesse angulaire  $\vec{\omega}$ ). Un flux de chaleur s'échappe aussi de la pince de cuivre par les quatre fils d'alimentation qui y sont fixés par des cosses. Néanmoins, ce flux est uni-directionnel et les fils sont entourés d'une gaine en plastique isolante, limitant la convection.

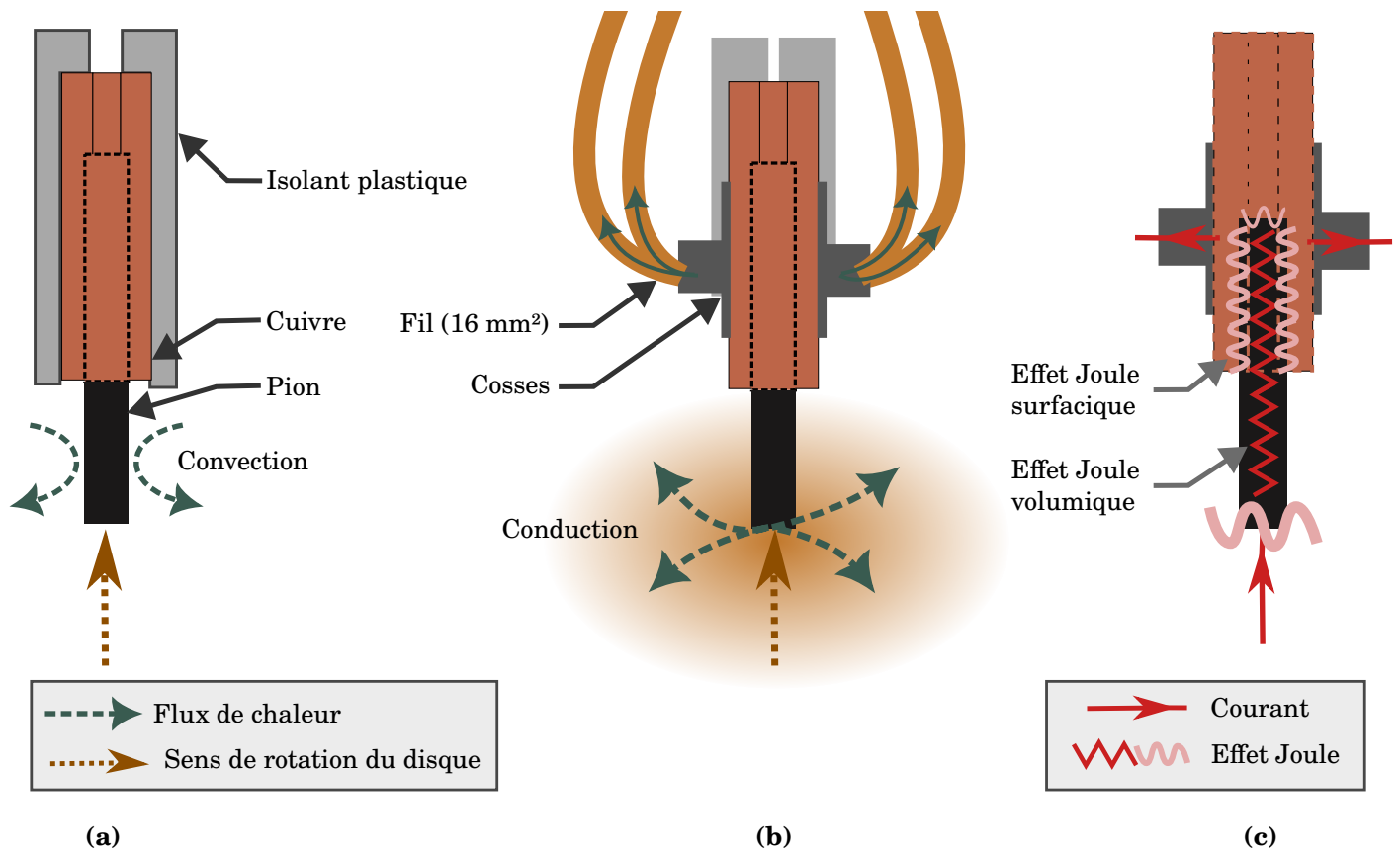


FIGURE 4.15 – Schémas explicatif du déséquilibre entre  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  : (a) convection sur la surface du pion sortante de la pince, (b) conduction dans le disque et les fils électriques et (c) échauffement interne du pion.

3. Figure 4.15(c) : par effet Joule, une source d'échauffement interne à la pince existe puisque le pion, le cuivre, et le contact entre ces deux volumes ont une résistance électrique statique. Pour un graphite imprégné de 26 % de cuivre ayant une résistivité de  $0,82 \mu m\Omega m$  [11], la résistance volumique de la partie insérée du pion a une valeur approximative de  $140 \mu\Omega$ . On approxime ensuite la résistance pion/pince en cuivre, dont les volumes ont une surface de contact de  $16,5 \text{ cm}^2$ , soit, une surface équivalente à un disque de  $2,3 \text{ cm}$  de rayon. On rappelle qu'une telle résistance est la somme d'une résistance de surface et d'une résistance de constriction. Cette dernière, d'après l'équation 1.9, peut alors être estimée à  $100 \mu\Omega$ . De ce fait, avec une résistance interne totale d'au moins  $200 \mu\Omega$ , une chaleur interne à la pince de  $10 \text{ W}$  se dégage pour un courant de  $200 \text{ A}$ . Alors que le pion est refroidi par conduction et par convection, cet échauffement suffit à créer une différence de température entre  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , d'autant plus que la pince en cuivre est relativement isolée par rapport au pion.

Ces deux parties ont montré d'une part que la température  $T_1$  n'évoluait pas en fonction de la hauteur et d'autre part que le gradient interne du pion changeait de forme en fonction du courant. Par conséquent, la température de contact ne peut pas être estimée pour le moment.

## 4.5 Échauffement du contact

### 4.5.1 Caractéristique des essais

Basés sur un plan factoriel complet, des tests ont été menés uniquement sur la nuance C pour étudier les facteurs influençant l'échauffement et pour mieux définir le domaine d'étude. Le protocole de mesure d'usure et de polissage du disque ainsi que la régulation de la force de contact pendant l'essai n'étaient pas encore définis au moment de la réalisation de ces essais. Dans ce plan, dont la matrice d'essais est représentée tableau 4.12, la force normale, le courant et la vitesse linéaire composent les facteurs de cette étude en ayant chacun trois niveaux :

- Courant : 25, 50, 75 A
- Vitesse linéaire : 38, 57, 76 km·h<sup>-1</sup>
- Force de contact : inférieure à 50 N, entre 50 et 65 N, supérieure à 75 N

n°test	$F_N$ [N]	$v_l$ [km·h <sup>-1</sup> ]	$I$ [A]	n°test	$F_N$ [N]	$v_l$ [km·h <sup>-1</sup> ]	$I$ [A]	n°test	$F_N$ [N]	$v_l$ [km·h <sup>-1</sup> ]	$I$ [A]
1	< 50	38	25	10	50 – 65	38	25	19	> 75	38	25
2	< 50	38	50	11	50 – 65	38	50	20	> 75	38	50
3	< 50	38	75	12	50 – 65	38	75	21	> 75	38	75
4	< 50	57	25	13	50 – 65	57	25	22	> 75	57	25
5	< 50	57	50	14	50 – 65	57	50	23	> 75	57	50
6	< 50	57	75	15	50 – 65	57	75	24	> 75	57	75
7	< 50	76	25	16	50 – 65	76	25	25	> 75	76	25
8	< 50	76	50	17	50 – 65	76	50	26	> 75	76	50
9	< 50	76	75	18	50 – 65	76	75	27	> 75	76	75

TABLEAU 4.12 – Matrice d'essais de l'étude de l'échauffement du pion.

Pour ces derniers niveaux, les consignes de  $F_N$  ont été fixées en début d'essai à 30 N, 60 N et 90 N sans asservissement.

Chaque combinaison de facteur est répétée trois fois, sur trois séries distinctes. Ces dernières se basent sur une matrice d'essais dont l'ordre a été modifié. De plus, un nouveau pion est utilisé pour chaque série. Un essai débute par une période d'échauffement sans courant d'une minute après laquelle la circulation du courant est activée, et se termine lorsque la température du pion est en régime permanent (soit 2 à 3 minutes d'expérience).

### 4.5.2 Résultats

La température moyenne  $\overline{T}_1$ , calculée pour chaque expérience, est affichée en fonction de la force de contact moyenne sur la figure 4.16.

#### Notion de quantile

Dans cette figure, des boîtes à moustaches (*boxplots*) encadrent chaque point pour estimer la dispersion. Cette représentation graphique utilise le quantile, outil largement employé en statistiques qui consiste à découper un jeu de données en intervalles de même probabilité. Certains quantiles portent un nom particulier parmi lequel :

- Les quartiles  $Q_i$  qui découpent un jeu de données en 4. Par conséquent,  $Q_1$  partage le jeu en 25 % des données inférieures et 75 % des données supérieures,  $Q_2$  représente la médiane et  $Q_3$  partage l'échantillon en 75 % des données inférieures et 25 % des données supérieures.
- Les centiles  $C$  (ou *percentiles*) qui divisent l'échantillon en 100 sous-ensembles de même probabilité. Ainsi,  $C_{25}$  est égal à  $Q_1$ .

De plus, on introduit ici la notion d'écart interquartile ( $EI$ ), qui équivaut à la distance entre  $Q_1$  et  $Q_3$  :

$$EI = Q_3 - Q_1 \quad (4.20)$$

Plus l'EI est important, plus la dispersion est importante. Les boîtes à moustaches se composent de deux parties : un rectangle et deux moustaches. Les extrémités du rectangle vont de  $Q_1$  à  $Q_3$ . Les moustaches, quant à elles, prennent à



l'extrémité inférieure la valeur de  $Q_1 - 1,5 \cdot EI$  et à l'extrémité supérieure celle de  $Q_3 + 1,5 \cdot EI$ . En outre, les moustaches sont des indicateurs d'asymétrie et de dispersion du jeu de données.

### Force de contact et courant

Tout d'abord, la figure 4.16 compare les valeurs de températures  $\bar{T}_1$  obtenues pour une force de contact inférieure à 50 N et celles pour une  $\bar{F}_N$  supérieure à 50 N (séparation matérialisée par deux barres verticales). A gauche de cette limite, les points sont dispersés sur l'axe  $x$ , ce qui montre que la consigne de force de contact (30 N) n'a pas été respectée. En revanche, à droite de cette limite, les points forment deux groupes distincts autour de 55 N et 84 N, ce qui traduit la consigne de force appliquée.

Les températures les plus importantes sont obtenues dans les cas où  $\bar{F}_N < 50$  N. Dans ces conditions, il est difficile de voir si la vitesse et le courant ont une quelconque incidence sur la température. Les températures sont les plus faibles lorsque  $I=25$  A.

En se concentrant sur les boîtes à moustaches, on remarque que la dispersion des mesures est généralement très importante, avec un écart interquartile dépassant souvent 200 °C. Dans ces cas, l'orientation des moustaches indique une asymétrie positive, à savoir qu'en traçant l'histogramme, les mesures s'étalent sur la droite et que l'on peut ainsi observer des mesures très élevées par rapport à la médiane.

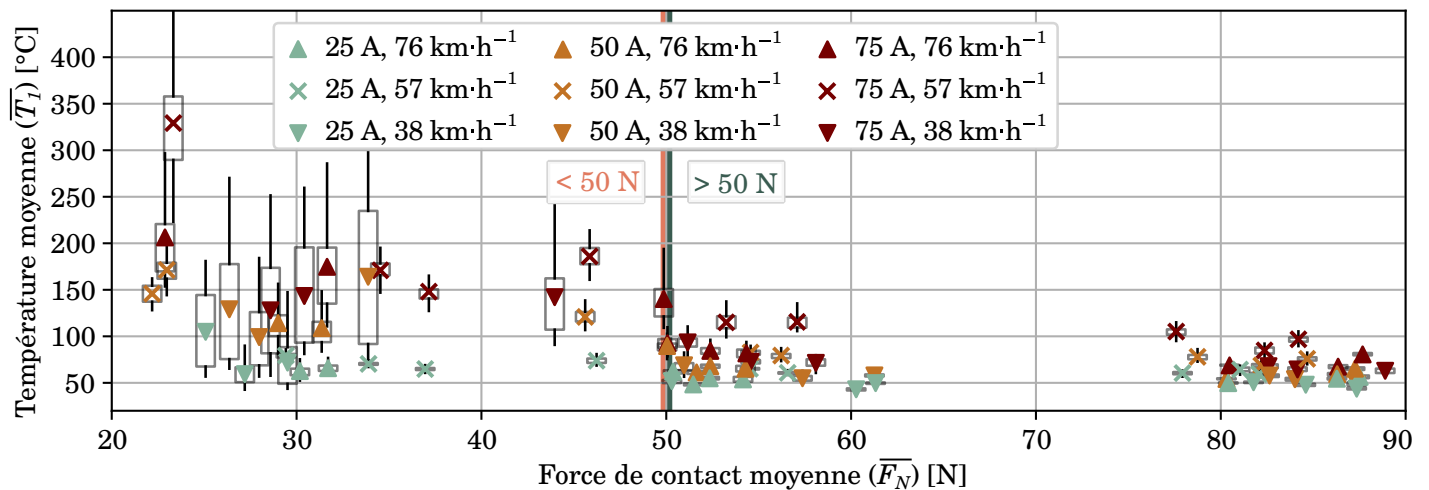


FIGURE 4.16 – Variations de la température moyenne en fonction de la force de contact pour différentes vitesses linéaires et différents courants.

Dans le cas où  $\bar{F}_N > 50$  N, l'effet du courant sur la température est nettement plus visible sous la forme de trois strates de points (bleu clair, orange et rouge foncé). En revanche, il n'y a pas de relation apparente avec la vitesse. Les boîtes à moustaches indiquent que les échantillons sont peu dispersés, avec un EI toujours inférieur à 50 °C. Les moustaches montrent aussi que la distribution est symétrique. Par conséquent, la quantité et l'amplitude des données inférieures et supérieures entourant la médiane sont similaires.

Ensuite, ces mêmes températures sont affichées en fonction du courant moyen  $\bar{I}$  (figure 4.17 (a)), puis en 3D en fonction du courant moyen  $\bar{I}$  et de la tension moyenne  $\bar{U}$  (figure 4.17 (b)). D'une part, les points se regroupent en trois colonnes, alignées respectivement à 25, 50 et 75 A, ce qui montre que la consigne de courant est respectée. Le courant a une valeur toutefois légèrement inférieure à la consigne (-2 A et -4 A lorsque les consignes sont respectivement réglées à 50 A et 75 A) pour les températures et les tensions les plus importantes. D'autre part, un échauffement de plus en plus important est constaté lorsque le courant augmente, ce qui concorde avec l'effet Joule.

Deux couleurs permettent de distinguer les essais effectués lorsque  $\bar{F}_N < 50$  N et lorsque  $\bar{F}_N > 50$  N. Tout comme sur la figure 4.16, les points orange clair ( $\bar{F}_N < 50$  N) sont ceux où  $\bar{T}_1$ , mais aussi  $\bar{U}$ , sont les plus importants. De plus, ces points sont aussi relativement dispersés sur l'axe  $y$ , ce qui témoigne de conditions de contact difficilement répétables. Lorsque  $\bar{F}_N > 50$  N (points vert foncé), les températures et tensions forment trois groupes concentrés, indiquant que les conditions de contact ont ici une meilleure répétabilité.

Enfin, la figure 4.18 présente des exemples de température et de tension en fonction du temps pour des tests

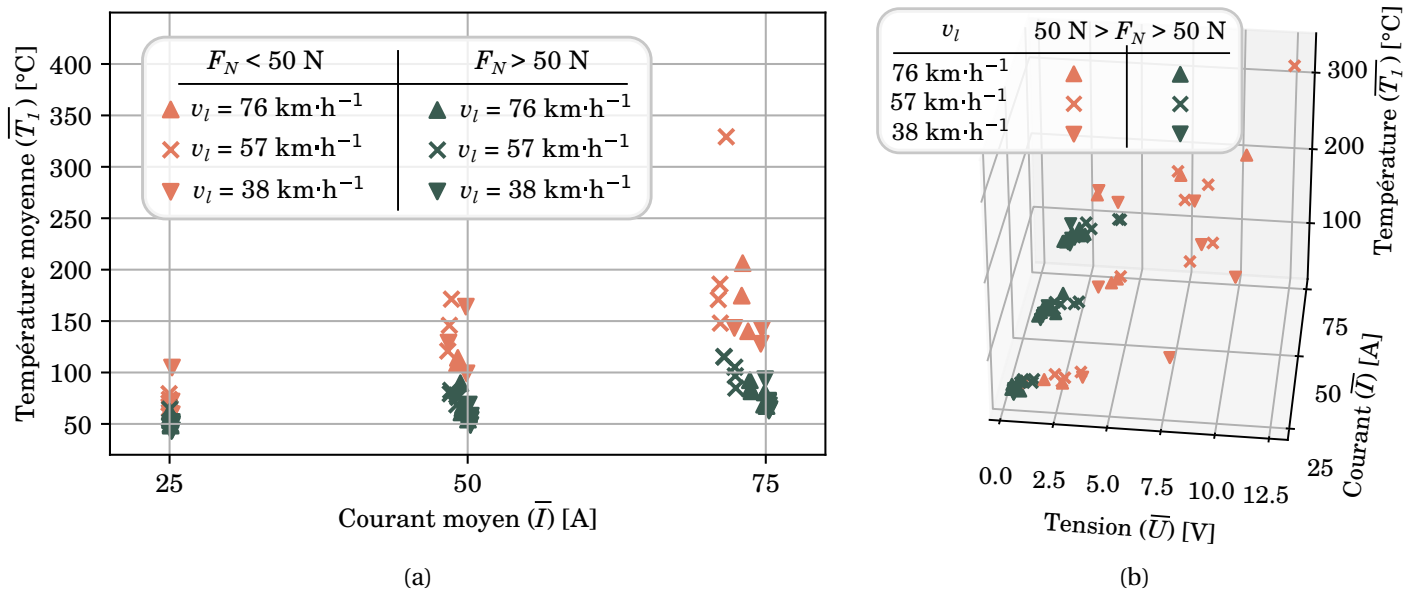


FIGURE 4.17 – (a) Valeurs de la température  $\overline{T_1}$  en fonction du courant  $\overline{I}$ , (b) vue 3D de cette même figure en fonction de la tension  $\overline{U}$ .

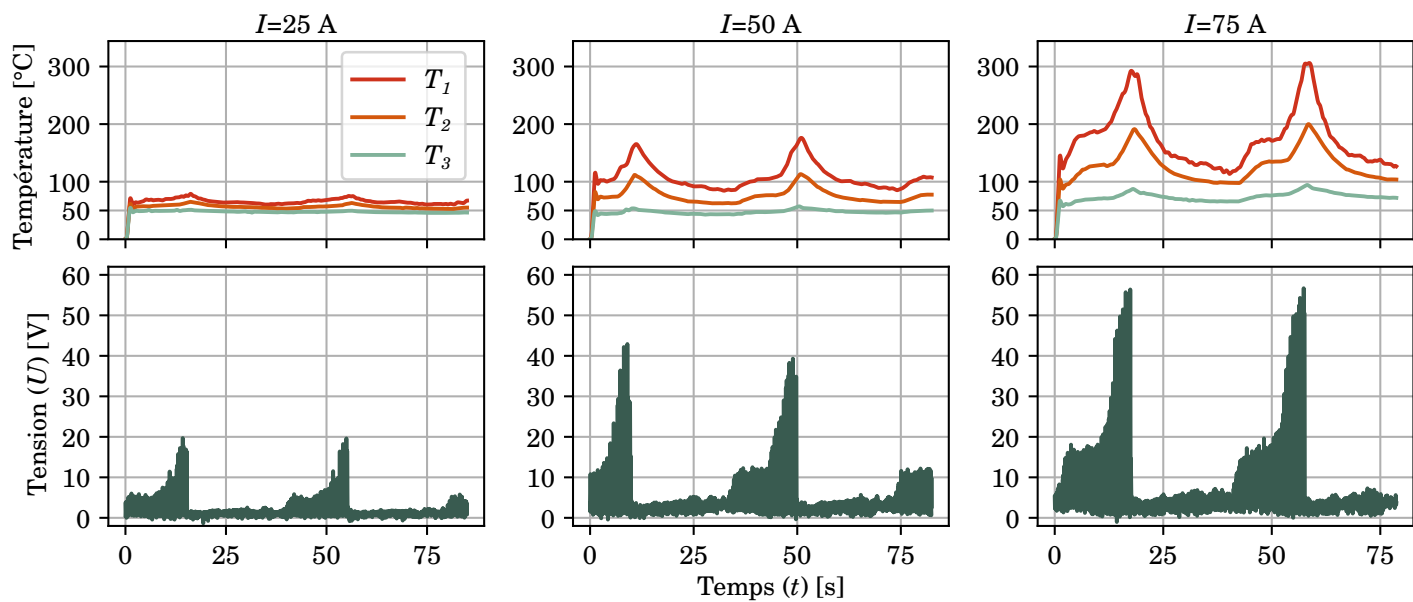


FIGURE 4.18 – Variation des températures  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  et de la tension  $U$  en fonction du temps à différents courants ( $v_l = 57 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et  $\overline{F_N} < 50$  N).

réalisés à une vitesse fixe de  $57 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et une force de contact moyenne inférieure à 50 N. Cette figure est composée par colonne, avec une consigne de courant fixée à 25 A, 50 A et 75 A, et par ligne avec la température sur les graphiques supérieurs et la tension sur les graphiques inférieurs. On observe des pics périodiques et synchronisés de température et de tension, dont l'amplitude s'accroît avec le courant. La fréquence de ces pics correspond à celle à laquelle le pion balaie le disque et leur amplitude est de moins en moins importante lorsque l'on s'éloigne du contact. Par exemple, pour un courant de 75 A, l'amplitude de variation des pics est de  $180^\circ\text{C}$  pour  $T_1$ ,  $100^\circ\text{C}$  pour  $T_2$  et  $40^\circ\text{C}$  pour  $T_3$ . Au sommet de ces pics, il y a donc un gradient de température dans le pion d'autant plus important allant dans la direction du contact. Par conséquent, la source de chaleur est positionnée à l'interface disque/pion.

Lorsque  $F_N$  est inférieure à 50 N, et suivant la position du pion sur le disque, le contact devient instable et de nombreux arcs électriques apparaissent, provoquant des pics de température et de tension. Cette instabilité a différentes sources :

- La surface de contact réelle diminue avec la force de contact ce qui augmente la résistance de contact.
- Avec une raideur fixée à  $4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$  le contact est rompu lorsque le pion descend de 10 mm pour  $F_N=40 \text{ N}$  et 20 mm pour  $F_N=80 \text{ N}$ . En dessous d'une certaine force de contact, les pertes de contact sont donc plus fréquentes à cause du défaut de planéité du disque.
- Une surface du disque localement dégradée peut être adhésive, menant à un collé/glissé qui fait sauter le pion.
- Certaines vitesses de rotation, correspondant à une fréquence proche de celle de résonance de la structure, provoquent des vibrations qui ont pour conséquence des pertes de contact pion/disque.

### 4.5.3 Analyse de la variance

#### Résultats sur l'ensemble des essais

Les influences des facteurs et des interactions sont calculées en faisant une analyse de la variance selon la méthode décrite dans la section 4.3.3. La figure 4.19 (a) représente les résultats pour l'ensemble des données sur les moyennes de trois réponses : la température  $\bar{T}_1$ , la tension aux bornes de l'alimentation  $\bar{U}$  et la puissance fournie par cette dernière  $\bar{P}$ . Les valeurs numériques de ces sorties, plus celles obtenues pour  $\bar{T}_2$  et  $\bar{T}_3$ , sont affichées sur le tableau 4.13(a). On peut en premier lieu observer que la vitesse linéaire  $v_l$  a une légère influence sur la tension (10,6 %). Mais de façon plus générale, ce facteur et ses interactions avec la force de contact et le courant ont peu d'influence sur les autres réponses (<10 %).

De plus, alors que le courant impacte fortement la valeur de la puissance dissipée (40,1 %), il a moins d'influence sur les trois températures moyennes  $\bar{T}_1$ ,  $\bar{T}_2$  et  $\bar{T}_3$  et la tension  $U$  (respectivement 30,4 %, 27,4 %, 19,2 % et 19,5 %). Enfin, la force de contact est prépondérante sur ces quatre réponses (45,5 %, 48,1 %, 53,7% et 55,1 %). Ce facteur a une influence proche de celle du courant sur la puissance dissipée (32,1 %). On note aussi que l'interaction entre  $F_N$  et  $I$  est non négligeable sur  $\bar{T}_1$ ,  $\bar{T}_2$ ,  $\bar{T}_3$  et  $\bar{P}$  (>10 %).

#### Résultats pour $F_N > 50 \text{ N}$

Le tableau 4.13(b) et la figure 4.19 (b) présentent les résultats de l'ANOVA pour les résultats obtenus lorsque  $\bar{F}_N > 50 \text{ N}$ . Alors que l'influence de la vitesse et du courant sur les cinq réponses s'amplifie, l'effet de la force de contact apparaît plutôt négligeable dans toutes les réponses, sauf la tension  $\bar{U}$  où elle a un léger impact (9,5 %). La vitesse joue un rôle mineur sur la puissance dissipée (11,1 %) et a une influence secondaire sur  $\bar{T}_1$ ,  $\bar{T}_2$  et  $\bar{U}$  (respectivement 28,3 %, 35,4 % et 27,9 %). Elle est cependant dominante sur la réponse de  $\bar{T}_3$  (59,8 %). Finalement, alors que l'influence du courant est secondaire sur  $\bar{T}_3$  (32,4 %), elle est prépondérante sur les quatre autres réponses (56,9 % pour  $\bar{T}_1$ , 54,0 % pour  $\bar{T}_2$ , 54,4 % pour  $\bar{U}$  et 76,9 % pour  $\bar{P}$ ).

#### Discussion

Une comparaison directe entre les résultats de l'ANOVA sur l'ensemble des essais (tableau 4.13(a)) et celui sur les essais réalisés à  $\bar{F}_N > 50 \text{ N}$  (tableau 4.13(b)) permet de mieux comprendre l'effet de la force de contact sur la qualité de captage du courant et sur l'échauffement. Pour appuyer ces observations, la figure 4.20 présente les températures moyennes et la tension moyenne mesurées en fonction de la force de contact et pour différents courants injectés. Ces deux grandeurs décroissent fortement avec la force moyenne  $\bar{F}_N$ , et ce, non linéairement. De plus, c'est lorsque  $\bar{F}_N$  est plus petit que 50 N que les résultats sont peu répétables et les valeurs des différentes réponses sont dispersées. Ainsi, toujours pour ces valeurs de force de contact, les pics de température et de tension coïncident. Par conséquent, les arcs

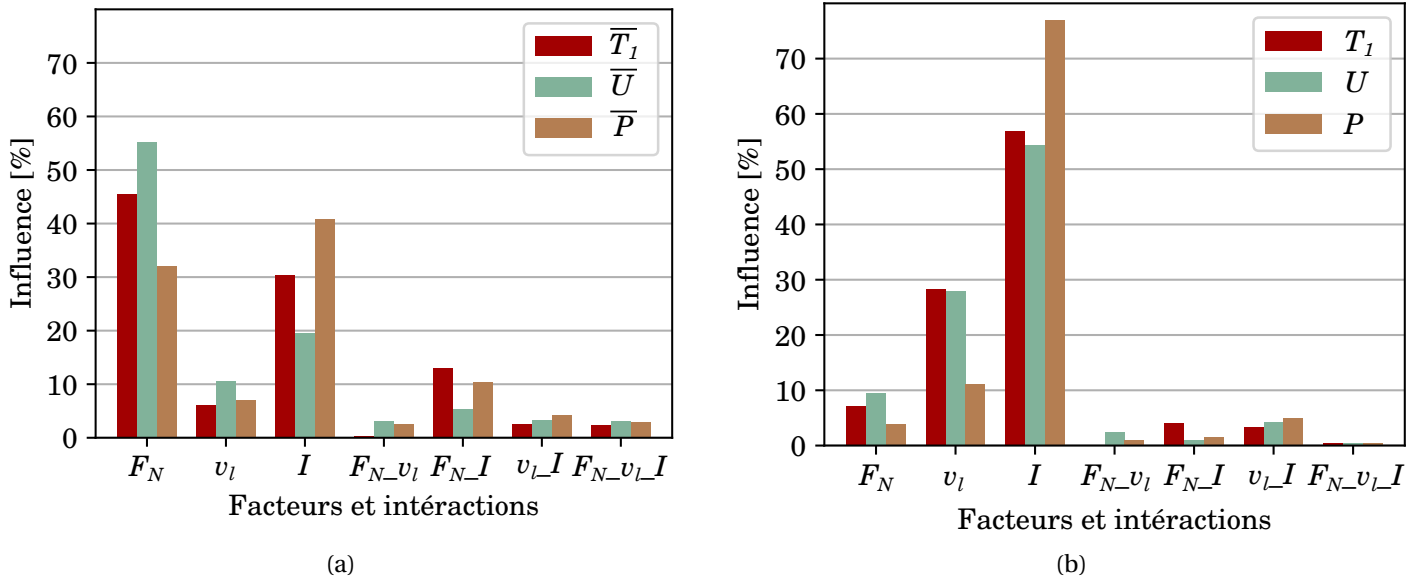


FIGURE 4.19 – Analyse de la variance de la température  $\bar{T}_1$ , de la tension  $\bar{U}$  et de la puissance  $\bar{P}$ , (a) pour le jeu de données complet et (b) lorsque  $\bar{F}_N > 50$  N.

électriques provoqués par des pertes de contact prennent une part majeure dans l'échauffement du contact et sont d'autant plus violents lorsque le courant délivré augmente, ce qui explique l'interaction entre la force de contact et le courant.

Les réponses sont en revanche répétables lorsque la force de contact est supérieure à 50 N. Pour ces valeurs,  $\bar{F}_N$  a une influence négligeable, sauf pour la tension. En effet, la force de contact est connue pour affecter la résistance de contact et donc la tension. L'impact du courant est prépondérant sur la température relevée dans les thermocouples 1 et 2, la tension et la puissance. L'échauffement au contact est donc causé par l'effet Joule, dont l'origine est la résistance de contact pion/disque. La vitesse joue aussi un rôle secondaire sur  $\bar{T}_1$  et  $\bar{T}_2$  et majoritaire sur  $\bar{T}_3$  puisque d'une part elle augmente l'échauffement mécanique et d'autre part elle amplifie le défaut de planéité du disque. Ces défauts se manifestent notamment à des vitesses de rotation spécifiques pour lesquelles la structure du banc est mise en vibration, induisant ainsi une moins bonne qualité de contact et des arcs électriques plus nombreux et intenses. Comme on le voit sur la figure 4.20, les températures moyennes de  $\bar{T}_3$ , elles-mêmes moyennées sur les essais, sont très proches les unes des autres. Les résultats statistiques peuvent donc facilement être déséquilibrés à cause du manque de précision, ce qui peut expliquer l'impact majoritaire de la vitesse linéaire qui outrepassé celui du courant.

Ces résultats sont cohérents avec divers travaux basés sur des essais similaires [88, 100, 104]. De plus, puisque le système caténaire-pantographe est construit de manière à ce que le contact fil/bande soit de bonne qualité, c'est-à-dire avec peu de perte de contact dans les conditions standards. Pour des questions de représentativité, les essais seront réalisés par la suite avec une force de contact supérieure à 60 N. De plus, alors qu'elle n'était pas opérationnelle dans ces essais, une régulation sur la force  $\bar{F}_N$  a été mise en place pour les essais ultérieurs.

## 4.6 Origine de l'usure du pion

Dans la section précédente, il a été établi d'une part que les essais devaient être effectués avec une force de contact supérieure à 60 N et d'autre part que, dans ces conditions, l'échauffement du pion est principalement causé par le courant, puis par la vitesse. Ces essais ont toutefois été réalisés sur des périodes et des distances relativement courtes par rapport à un train en circulation.

Après avoir développé un protocole d'essais permettant d'obtenir des conditions initiales identiques, un nouveau plan d'expériences a été conçu dans l'objectif de mieux connaître les facteurs influençant l'usure du contact, pour ainsi réaliser par la suite des surfaces de réponse sur les plus influents en gardant fixe les autres. Ce plan a pour deuxième objectif de comparer l'usure et l'échauffement de la nuance B et de la nuance C pour comparer les résultats à ceux

Jeu de données complet						$\overline{F_N} > 50 \text{ N}$					
	$\overline{T_1}$	$\overline{T_2}$	$\overline{T_3}$	$\overline{U}$	$\overline{P}$		$\overline{T_1}$	$\overline{T_2}$	$\overline{T_3}$	$\overline{U}$	$\overline{P}$
$F_N$	45,5	48,1	53,7	55,1	32,1	$F_N$	7,1	4,2	1,4	9,5	3,9
$\nu$	6,0	6,4	7,8	10,6	7,0	$\nu_l$	28,3	35,4	59,8	27,9	11,1
$I$	30,4	27,4	19,2	19,5	40,1	$I$	56,9	54,0	32,4	54,4	76,9
$F_N \nu$	0,4	0,2	0,3	3,1	2,5	$F_N \nu_l$	0,1	0,1	2,7	2,5	1
$F_N I$	13,0	12,7	12,6	5,4	10,3	$F_N I$	4,0	2,3	0,5	1,1	1,5
$\nu I$	2,5	2,5	2,4	3,3	4,2	$\nu_l I$	3,3	3,4	2,4	4,2	5
$F_N \nu I$	2,3	2,7	4	3	2,9	$F_N \nu_l I$	0,4	0,5	1	0,5	0,5

(a) (b)  
Code couleur : 9 % < x < 19 % 19 % < x < 40 % 40 % < x

TABLEAU 4.13 – Influences des facteurs et des interactions sur les températures  $\overline{T_1}$ ,  $\overline{T_2}$  et  $\overline{T_3}$ , la tension  $\overline{U}$  et la puissance dissipée  $\overline{P}$ , (a) pour le jeu de données complet et (b) pour les essais où  $\overline{F_N} > 50 \text{ N}$ .

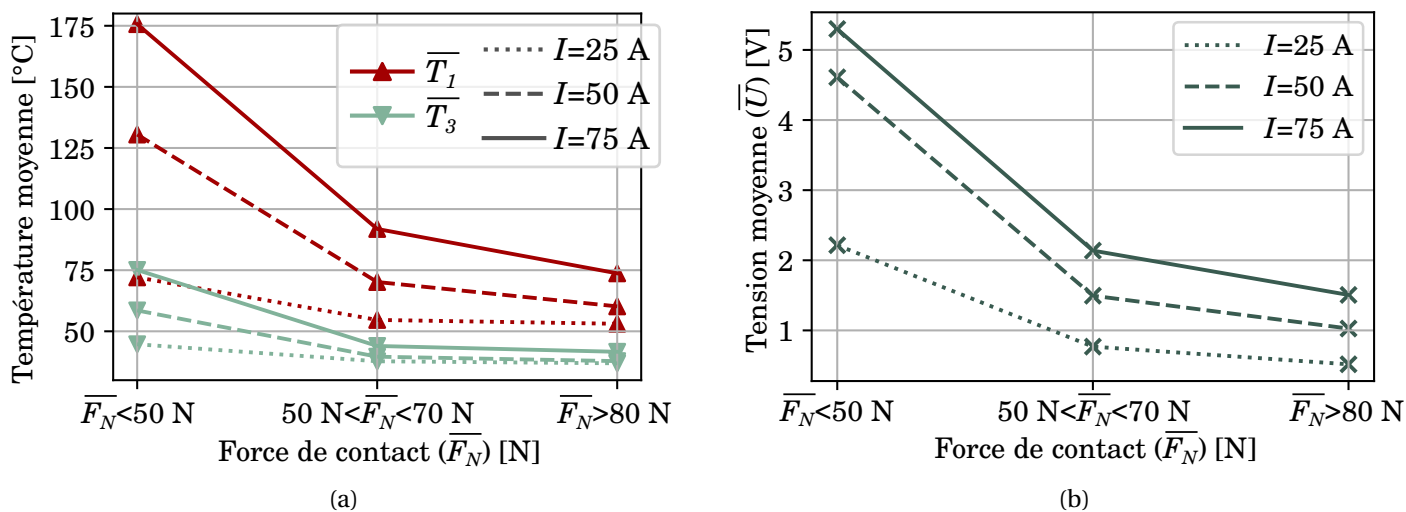


FIGURE 4.20 – (a) Réponse des températures  $\overline{T_1}$  et  $\overline{T_3}$  et (b) tension  $\overline{U}$  en fonction de la force de contact moyenne  $\overline{F_N}$  et pour différentes valeurs de courant injecté  $I$  (toutes vitesses linéaires  $\nu_l$  confondues).

obtenus en ligne par la SNCF (voir tableau 4.2). Enfin, une analyse des données sera réalisée pour établir un lien potentiel entre l'échauffement et l'usure, comme il a pu être décrit dans d'autres articles (voir figures 1.27 (a), 1.28 (a) et 1.28 (b)).

Les essais ont été menés en deux temps. Des premiers résultats, dans lesquels le volume était seulement mesuré avant et après essais à partir du pion brut, ont tout d'abord été analysés. Ces résultats ont conduit à d'une part supprimer un des facteurs, et d'autre part à mettre en place le protocole de mesure d'usure permettant d'estimer le volume perdu au cours d'un essai.

#### 4.6.1 Méthode

##### Matrice d'expérience

Comme le montre le tableau 4.14, six facteurs ayant chacun deux niveaux ont été choisis pour construire ce plan d'expériences. Dans cette étude, pas plus d'un essai ne peut être mené par jour, et pour chacun d'entre eux une préparation et une analyse de données est nécessaire (déplacement à Besançon). La méthode des plans fractionnaires, décrite dans la section 4.3.2, est donc utilisée pour réduire le nombre d'essais (au nombre de 64 pour un plan complet). Le tableau 4.15 représente la matrice d'expérience, qui est obtenue par deux simplifications du plan complet et qui aboutit à 16 combinaisons d'essais. Les alias générés entre les facteurs et les interactions d'ordre inférieur à quatre

sont indiqués tableau 4.16. Comme les interactions d'ordre trois et plus sont généralement négligeables, les effets des facteurs sont confondus avec des interactions de cette catégorie ( $\alpha_{1,\dots,6}$ ), tandis que les interactions d'ordre 2 sont comprises dans les autres alias. Par conséquent, il sera trivial de connaître les influences des facteurs seuls, mais plus compliqué de discerner les interactions de deuxième ordre.

Nom	Symbole	Niveau -	Niveau +	Unité
Force de contact	$F_N$	60	90	N
Courant injecté	$I$	60	120	A
Vitesse linéaire	$v_l$	30	60	km·h <sup>-1</sup>
Vitesse de balayage	$v_b$	8	16	mm·s <sup>-1</sup>
Raideur	$k$	4	12	N·mm <sup>-1</sup>
Nuance	$M$	B	C	-

TABLEAU 4.14 – Valeurs des différents facteurs pour chaque niveau.

n° test	$M$	$F_N$	$I$	$v_b$	$k$	$v_l$	n° test	$M$	$F_N$	$I$	$v_b$	$k$	$v_l$
1	-	-	-	-	-	-	9	+	-	-	-	+	+
2	-	-	-	+	+	-	10	+	-	-	+	-	+
3	-	-	+	-	-	+	11	+	-	+	-	+	-
4	-	-	+	+	+	+	12	+	-	+	+	-	-
5	-	+	-	-	+	+	13	+	+	-	-	-	-
6	-	+	-	+	-	+	14	+	+	-	+	+	-
7	-	+	+	-	+	-	15	+	+	+	-	-	+
8	-	+	+	+	-	-	16	+	+	+	+	+	+

TABLEAU 4.15 – Matrice d'essais du plan fractionnaire factoriel.

Nom	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$
Alias	$v_b$	$F_N$	$v_l$	$I$	$k$	$M$	$F_N-I$	$I-v_b$
	$M-F_N-k$	$M-v_b-k$	$M-F_N-I$	$M-F_N-v_l$	$M-F_N-v_b$	$F_N-v_b-k$	$M-v_l$	$k-v_l$
	$I-k-v_l$	$M-I-v_l$	$I-v_b-k$	$v_b-k-v_l$	$I-v_b-v_l$	$F_N-I-v_l$		
Nom	$\alpha_9$	$\alpha_{10}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{14}$	$\alpha_{15}$	Moyenne
Alias	$I-k$	$F_N-v_b$	$F_N-I-v_b$	$M-v_b$	$M-F_N$	$M-I$	$M-I-v_b$	$M-F_N-v_b-k$
	$v_b-v_l$	$M-k$	$M-I-k$	$F_N-k$	$v_b-k$	$F_N-v_l$	$F_N-I-k$	$M-F_N-I-v_l$
			$M-v_b-v_l$		$I-v_l$		$F_N-v_b-v_l$	$I-v_b-k-v_l$
		$F_N-k-v_l$				$M-k-v_l$		

TABLEAU 4.16 – Alias du plan d'expériences correspondant aux effets des facteurs et des interactions confondus et ne pouvant plus être distingués.

### Protocole d'essais

Le disque est préparé selon le protocole indiqué section 3.3 et un pion neuf est utilisé pour chaque essai. Les thermocouples sont insérés dans les trous prévus à cet effet et remplis de pâte thermique, après quoi l'ensemble pion et thermocouples est pesé.

Pour les premiers résultats, le pion, découpé avec les encoches adéquates, est directement analysé au microscope avant et après essais pour connaître le volume perdu. La technique de mesure d'usure où les répliques sont réalisées pendant l'essai (voir section 3.2) a ensuite été mise en place. Pour cette partie, le pion est introduit dans la pince, mis en pression contre le disque afin que les surfaces soient plan/plan, puis serré. Après avoir relevé le pion, une première

réplique est réalisée avant le début d'essai selon la méthodologie décrite section 3.2. L'essai est stoppé à diverses reprises pour effectuer des répliques, puis la masse du pion et des thermocouples est de nouveau mesurée à la fin de l'essai. Enfin, le pion dans son état final ainsi que les répliques sont analysés au microscope optique 3D confocale pour mesurer le volume perdu au cours du temps.

#### 4.6.2 Première analyse

La valeur supérieure de la force normale avait initialement été fixée à 120 N puis 100 N. Cependant, dans ces conditions, l'usure est trop grande ce qui provoque une dégradation du pion trop rapide et la force normale supérieure a été établie à 90 N.

Les données ont été analysées lorsque la moitié de la première série a été effectuée. En effet, différents types d'échauffement ont été observés et certains essais ont été répétés pour cause d'usure précoce.

##### Forme d'échauffement

La figure 4.21 expose différentes formes d'échauffement observées en fonction du temps. Au total, ces formes ont été cataloguées sous quatre types, dont deux ayant des sous-types :

**Type 1 :** Le pion est thermiquement en régime permanent du début jusqu'à la fin de l'essai. Une fluctuation périodique de l'échauffement du contact peut cependant être visible, toujours en fonction de la position du pion sur le disque et du sens de balayage.

**Type 2 :** Une forme de rodage se manifeste en début d'essai :

Type 2.1 : Le rodage dure plusieurs dizaines de minutes. Des pics d'échauffement périodiques ayant une amplitude importante peuvent subsister.

Type 2.2 : Le rodage se présente sous forme d'un pic d'échauffement bref, de moins de 10 minutes. Le test se poursuit par la suite avec un échauffement se stabilisant en type 1 ou évoluant en type 3.

**Type 3 :** La surface du disque se dégrade, modifiant les propriétés de contact. Ce phénomène est notamment décrit section 3.3.4.

Type 3.1 : La dégradation se fait localement et se manifeste par l'apparition de pics d'échauffement. Ces pics s'amplifient au cours du temps, en ayant par exemple une amplitude de variation initiale inférieure à 10 °C et pouvant évoluer jusqu'à dépasser 75 °C.

Type 3.2 : La dégradation se fait brutalement et se localise sur la surface complète du disque. La montée en température est donc brève et importante. Cette transition peut être précédée par des pics d'échauffement périodiques s'apparentant à un type 3.1.

**Type 4 :** L'échauffement est directement très important et la température du pion n'atteint pas le régime permanent. En outre, les essais présentant ce type d'échauffement ne durent jamais plus de 5 minutes puisque le volume utile entre le contact et les encoches est quasiment, voir complètement usé.

Les types 1, 2.2 et 3.1 sont les formes d'échauffement les plus souvent rencontrées dans les essais. De plus, l'observation de ces types d'échauffement a conduit à développer une méthode permettant de mesurer le volume à différents intervalles. En effet, il est peu probable que les essais dont la forme d'échauffement soit de type 2 et 3 aient une usure constante au cours de l'essai.

##### Usures et type d'échauffement

Le tableau 4.17 et la figure 4.22 présentent les premiers résultats de taux d'usure  $Tu$  mesurés par perte de masse et perte de volume (avant et après essais). De plus, une étude des profils de température a été réalisée pour chaque essai afin de les catégoriser selon le type d'échauffement observé.

Premièrement, les mesures de taux d'usure obtenues par perte de masse et par perte de volume sont, lorsque les valeurs sont supérieures à  $0,5 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ , du même ordre de grandeur avec une différence relative généralement inférieure à 20 % (sauf test 5 où elle est supérieure à 40 %). Lorsque les valeurs sont en-dessous de  $0,5 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ , une différence relative significative peut être observée, particulièrement pour les tests 1 et 8. Dans ces cas-là, le volume perdu est compris entre  $5 \text{ mm}^3$  et  $20 \text{ mm}^3$ , alors que comme on l'a vu l'incertitude de mesure de volume a été estimée

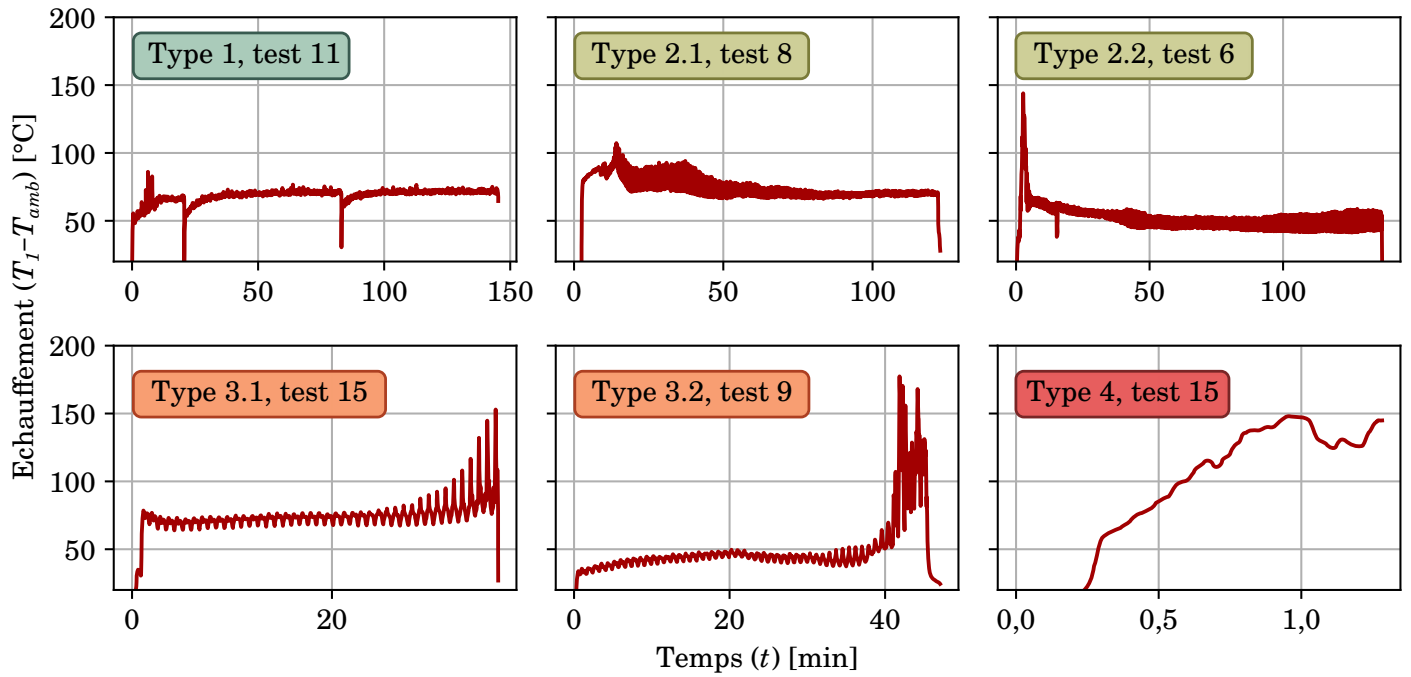


FIGURE 4.21 – Différentes formes d'échauffement observées en fonction du temps (configuration des tests tableau 4.15 et valeurs des facteurs tableau 4.14).

à  $\pm 13 \text{ mm}^3$ . De plus, la manipulation de l'échantillon lors des pesées, aussi méticuleuse soit-elle, peut provoquer des pertes de matière, avec par exemple des décrochements de fragments de pion fissurés. La mesure du volume perdu devient donc très sensible lorsque, entre deux points de mesure, le volume perdu est inférieur à  $20 \text{ mm}^3$ .

Deuxièmement, le taux d'usure évolue de manière croissante en fonction du type d'échauffement constaté. Il se situe entre  $0,007$  et  $0,58 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  pour le type 1;  $0,004$  et  $1,12 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  pour le type 2;  $3,5$  et  $12,6 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  pour le type 3 et  $54,8$  et  $102,0 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  pour le type 4. Dans le cas où un type 2 et un type 3 sont constatés dans un même essai, il est donc estimé que la majorité de l'usure peut être attribuée à la dégradation de la surface du disque (type 3).



Type courbe	n° test	$M$	$F_N$	$I$	$\nu_b$	$k$	$\nu_l$	Distance [km]	Usure (m.) [mm <sup>3</sup> ·km <sup>-1</sup> ]	Usure (v.) [mm <sup>3</sup> ·km <sup>-1</sup> ]	$F_N$ [N]
1	1	-	-	-	-	-	-	72,0	0,03	0,007	
1	2	-	-	-	+	+	-	112,0	0,004	0,05	
1	15	+	+	+	-	-	+	120,0	0,1	0,1	100
2	8	-	+	+	+	-	-	80,0	0,0	0,2	
1	7	-	+	+	-	+	-	75,0	0,6	0,6	
2	11	+	-	+	-	+	-	70,0	0,9	0,9	
2	6	-	+	-	+	-	+	112,0	1,1	1,2	
2, 3	5	-	+	-	-	+	+	45,0	6,2	3,5	
3	4	-	-	+	+	+	+	30,0	6,6	7,0	
2, 3	6	-	+	-	+	-	+	35,0	8,8	8,8	100
3	3	-	-	+	-	-	+	30,0	11,0	12,6	
4	15	+	+	+	-	-	+	6,5	55,9	54,8	100
4	13	+	-	-	-	-	-	4,5	64,6	61,0	
4	15	+	+	+	-	-	+	3,6	101,8	99,2	120
4	15	+	+	+	-	-	+	3,9	102,0	99,6	100

TABLEAU 4.17 – Premiers résultats d’usure triés par ordre croissant (les essais grisés sont des répétitions).

Enfin, les échauffements de types 1 et 2 peuvent être observés avec les nuances B et C. En revanche, on constate que le type 3 se produit seulement avec la nuance A et le type 4 uniquement avec la nuance C. Dans le premier cas, la dégradation de la surface du cuivre peut être anticipée et inhibée en marquant des pauses lorsque des pics d’échauffement sont observés, d’une part parce que la dégradation est progressive et d’autre part car elle s’étend sur plusieurs minutes (voir section 3.3.4). Dans le deuxième cas, la dégradation se fait spontanément et ne peut pas être inhibée comme précédemment. Le test 15 a été répété quatre fois et a pu être prolongé une seule fois sur 120 km. Dans les autres cas, la distance parcourue n’a pas dépassé 6,5 km. Un phénomène similaire a été observé pour le test 13, dans lequel les conditions d’essais sont pourtant les plus modérées. L’hypothèse émise la plus probable est que le taux d’enrichissement de cette nuance, ou même le type de métal (qui est inconnu), est abrasif pour le cuivre ce qui l’use directement. Par conséquent, la nuance C est retirée de ce plan d’expériences, car des conditions d’essais représentatives sont trop difficiles à atteindre.

### Redéfinition de la matrice d’essais

Puisque la nuance C est sortie du plan d’expériences, la matrice d’essais du tableau 4.15 est à nouveau divisée en deux en ne gardant que les lignes dans lesquelles le facteur  $M$  est au niveau -, ce qui réduit les essais au nombre de huit. Ce sont donc les tests de 1 à 8 qui sont gardés, dont le niveau des facteurs est affiché tableau 4.18(a) et les alias sont présentés tableau 4.18(b). Dès lors, avec cette combinaison d’essais, les effets des facteurs  $I$ ,  $F_N$  et  $\nu_l$  se retrouvent respectivement confondus avec l’effet des interactions  $F_N\nu_l$ ,  $I\nu_l$  et  $F_NI$ .

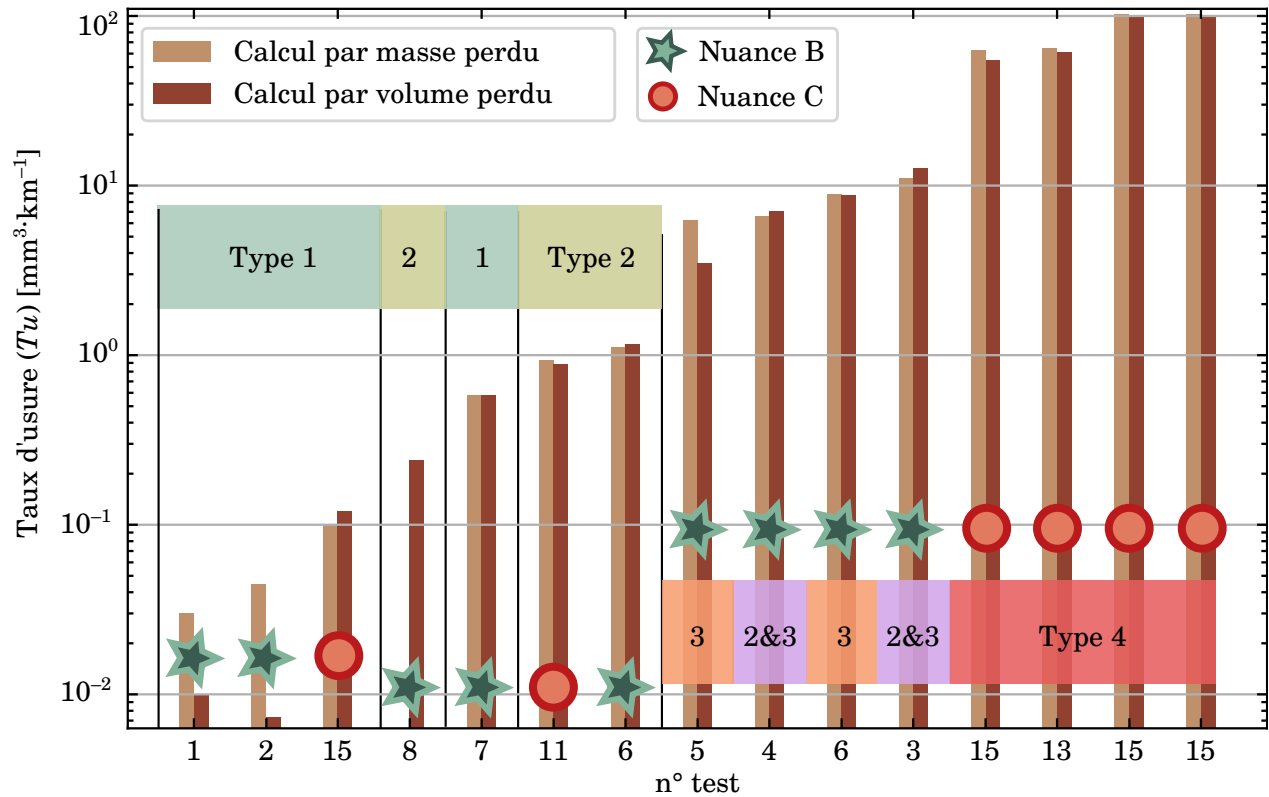


FIGURE 4.22 – Premiers résultats d’usure (échelle logarithmique) en fonction du test triés par ordre croissant, catégorisés par type de nuance et type d’échauffement observé.

### 4.6.3 Synthèse des résultats

#### Réponses étudiées

Une fois les trois séries d’essais (nommées respectivement S1, S2 et S3) achevées, les réponses traitées sont :

1. Le taux d’usure qui est la pente de la régression linéaire réalisée sur les points où la perte de volume est la plus régulière.
2. Le coefficient de frottement  $\mu$ .
3. La température mesurée au plus proche du contact et aux bornes du thermocouple 1 :  $T_1$ .
4. La résistance de contact électrique  $R_c$ .
5. La tension  $U$  aux bornes de l’alimentation.

De plus, les taux des pics de température  $T_{1,\%}$ , de coefficient de frottement  $\mu_{\%}$  et de tension  $U_{\%}$  sont estimés par l’utilisation des centiles, qui pour rappel divisent un jeu de données trié de manière croissante en cent sous-ensembles contenant le même nombre de valeurs.

Le taux des pics est calculé par le ratio entre un centile d’ordre élevé et la moyenne. Afin d’obtenir les valeurs les plus élevées, le centile  $c_{98}$  est choisi pour la tension et le coefficient de frottement, tandis que le centile  $c_{85}$  est sélectionné pour  $T_1$ . En effet, des valeurs extrêmes de température sont mesurées dans certains essais, atteignant la température maximale pouvant être mesurée (500 °C) par la carte d’instrumentation. Ainsi, le taux des pics de température du thermocouple 1  $T_1$  est par exemple calculé par l’équation suivante :

$$T_{1,\%} = \frac{T_{1,c85}}{\bar{T}_1} - 1 \quad (4.21)$$

avec  $T_{1,\%}$  le taux des pics de température [%],  $T_{1,c85}$  le 85<sup>ème</sup> centile de  $T_1$  [°C] et  $\bar{T}_1$  la moyenne de la température  $T_1$  sur le jeu de données [°C]. Les taux des pics de tension et de frottement sont calculés de la même manière.

						Nom	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
n° test	$F_N$	$I$	$v_b$	$k$	$v_l$	Alias	$v_b$	$F_N$	$I_{v_b}$	$I$
							$F_N_{k}$	$I_{v_l}$	$k_{v_l}$	$F_N_{v_l}$
							$I_{k_{v_l}}$	$v_b_{k}$	$F_N_{I_{k}}$	$v_b_{k_{v_l}}$
							$F_N_{I_{v_b_{v_l}}}$	$F_N_{I_{v_b_{k_{v_l}}}}$	$F_N_{v_b_{v_l}}$	$F_N_{I_{v_b_{k}}}$
						Nom	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	Moyenne
1	-	-	-	-	-	Alias	$v_l$	$k$	$I_{k}$	$F_N_{v_b_{k}}$
							$F_N_{I}$	$F_{v_b}$	$v_b_{v_l}$	$F_N_{I_{v_l}}$
							$I_{v_b_{k}}$	$I_{v_b_{v_l}}$	$F_N_{I_{v_b}}$	$I_{v_b_{k_{v_l}}}$
							$F_N_{v_b_{k_{v_l}}}$	$F_N_{I_{k_{v_l}}}$	$F_N_{k_{v_l}}$	
2	-	-	+	+	-					
3	-	+	-	-	+					
4	-	+	+	+	+					
5	+	-	-	+	+					
6	+	-	+	-	+					
7	+	+	-	+	-					
8	+	+	+	-	-					

(a)

(b)

TABLEAU 4.18 – (a) Nouvelle matrice d’essais et (b) effets des facteurs et des interactions confondus.

### Valeurs des réponses

Les taux d’usures mesurés pour chaque test sont représentés en échelle linéaire figure 4.23 (a) et en échelle logarithmique figure 4.23 (b), tandis que les valeurs numériques sont affichées tableau 4.19. Sur ce dernier, l’usure moyenne  $\bar{S}$  des trois séries est calculée pour chaque test. L’évolution du volume perdu en fonction de la distance calculée à partir des régressions linéaires et permettant d’aboutir à ces résultats est disponibles dans l’annexe B.

Les taux d’usure obtenus pour les tests 3-S1, 5-S1 et 8-S2 sont considérés comme aberrants, et on peut constater qu’il y a de manière générale une faible répétabilité. Par conséquent, le protocole d’essais doit être perfectionné pour obtenir des résultats moins dispersés, en allongeant le temps d’essais ou en multipliant les répliques. Toutefois, à l’exception de l’essai 2, les valeurs obtenues au sein des tests, entre les différentes séries, ont le même ordre de grandeur. De plus, la différence des valeurs moyennes entre les essais est significative. En effet, lorsque les séries sont moyennées, le taux d’usure est inférieur à  $0,24 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  lorsque la vitesse est fixée à  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  (essais 1, 2, 7 et 8). Ensuite, le taux d’usure est de  $0,82$  et  $1,16 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  lorsque la force normale et le courant sont fixés à  $90 \text{ N}$  et  $60 \text{ A}$  pour une vitesse de  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  (essais 5 et 6). Enfin pour les essais 3 et 4 ( $I=120 \text{ A}$ ,  $F_N=60 \text{ N}$  et  $v_l=60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ), les valeurs s’élèvent à  $3,64$  et  $4,38 \text{ mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ .

Test	Série	Taux d’usure [ $\text{mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ ]	Test	Série	Taux d’usure [ $\text{mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ ]	Test	Série	Taux d’usure [ $\text{mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ ]
1	S1	0,02	4	S1	7,20	7	S1	0,16
	S2	0,02		S2	2,11		S2	0,51
	S3	0,67		S3	3,84		S3	0,06
	$\bar{S}$	0,24		$\bar{S}$	4,38		$\bar{S}$	0,24
2	S1	0,01	5	S1	<b>6,03</b>	8	S1	0,12
	S2	0,38		S2	0,71		S2	<b>2,53</b>
	S3	0,16		S3	0,92		S3	0,10
	$\bar{S}$	0,18		$\bar{S}$	0,82		$\bar{S}$	0,11
3	S1	<b>0,09</b>	6	S1	0,51			
	S2	1,94		S2	1,44			
	S3	5,33		S3	1,52			
	$\bar{S}$	3,64		$\bar{S}$	1,16			

TABLEAU 4.19 – Taux d’usure calculés pour chaque test, avec en **gras** les valeurs considérées comme aberrantes.

Le tableau 4.20 montre également les moyennes du coefficient de frottement  $\mu$ , de la température  $T_1$  et de la résistance de contact  $R_c$ . Premièrement, le coefficient de frottement est d'environ  $0,33 \text{ N}\cdot\text{N}^{-1}$  lorsque la charge normale est fixée à 90 N (essais 5, 6, 7, 8) et de  $0,41 \text{ N}\cdot\text{N}^{-1}$  à 60 N (essais 1, 2, 3, 4). Ces valeurs sont similaires à celles trouvées dans la littérature avec une variation comparable [11, 102].

Deuxièmement, pour les essais avec un courant fixé à 60 A (essais 1, 2, 5 et 6), la température moyenne est inférieure à  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , puis de l'ordre de  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  lorsque  $I=120 \text{ A}$ ,  $F_N=90 \text{ N}$  et  $v_l=30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (essais 7 et 8) et enfin  $145$  et  $165 \text{ }^\circ\text{C}$  pour les essais 3 et 4 avec  $I=120 \text{ A}$ ,  $F_N=60 \text{ N}$  et  $v_l=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . En outre, l'effet Joule est déterminant dans la température moyenne alors que la force normale et la vitesse linéaire semblent jouer un rôle secondaire. La résistance de contact varie de 2 à  $7 \text{ m}\Omega$ , ce qui, bien que le contact ne soit sans doute pas le même (forme, surface), est faible par rapport à d'autres valeurs qui se situent plutôt entre 40 et  $100 \text{ m}\Omega$  pour un graphite imprégné ayant un taux de cuivre similaire [11].

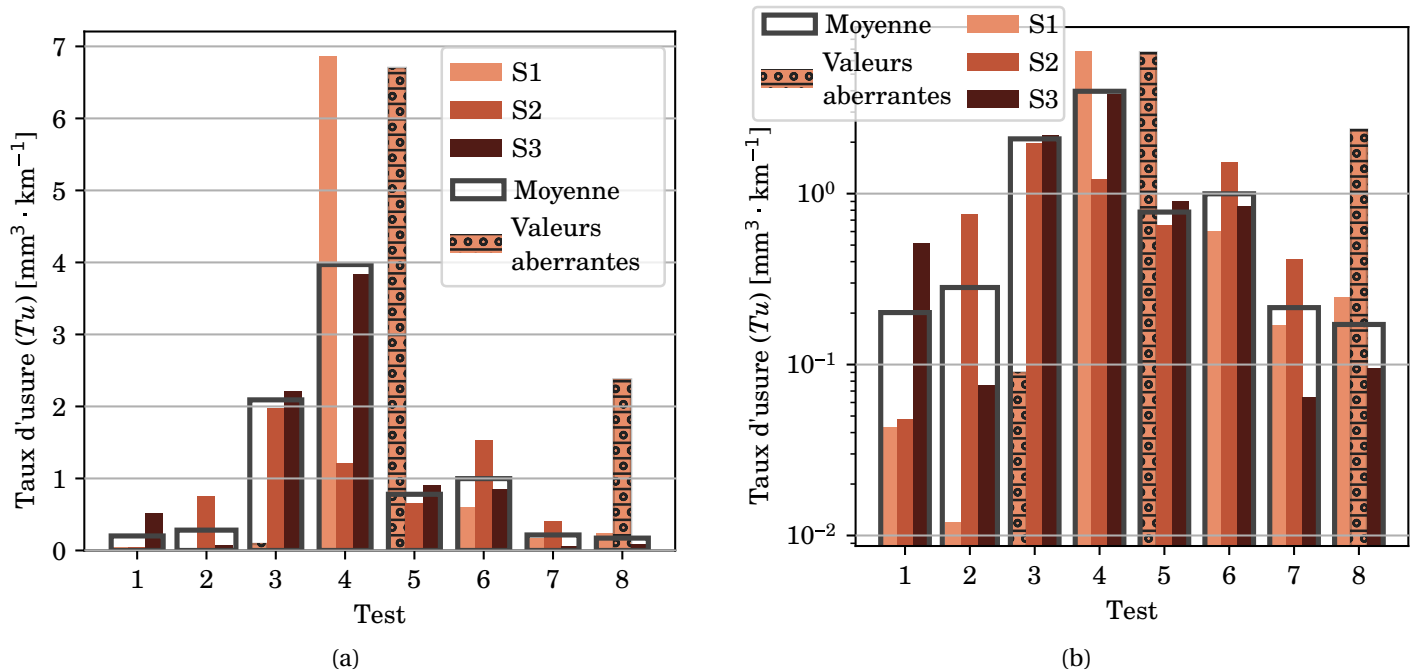


FIGURE 4.23 – Taux d'usures calculés pour chaque test, (a) échelle linéaire et (b) échelle logarithmique.

Test	$Tu$ [ $\text{mm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ ]	$\bar{\mu}$ [ $\text{N}\cdot\text{N}^{-1}$ ]	$\bar{T}_1$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$\bar{R}_c$ [ $\text{m}\Omega$ ]	$\mu\%$ [%]	$T_{1,\%}$ [%]	$U\%$ [%]
1	0,27	0,44	64,6	6,8	24,9	3,3	15,8
2	0,18	0,40	58,5	6,5	21,4	4,6	17,1
3	3,63	0,43	146,2	2,2	49,2	19,9	47,1
4	4,38	0,39	165,1	2,8	44,1	14,2	51,5
5	0,81	0,35	66,7	4,7	38,2	9,0	24,2
6	1,16	0,31	66,0	3,6	32,2	7,6	25,5
7	0,25	0,32	119,0	3,7	22,4	6,6	13,7
8	0,11	0,32	120,8	6,1	19,3	3,9	9,7

TABLEAU 4.20 – Résultats des différentes réponses, moyennées sur les trois séries.

#### 4.6.4 Résultats statistiques

La figure 4.24 et le tableau 4.21 représentent les résultats des différentes analyses de variance, pour chaque réponse et en se basant sur les valeurs du tableau 4.20. Comme décrit ci-dessus, le taux d'usure est significativement influencé

par la vitesse, c'est-à-dire  $\alpha_5$  (53,9 %), puis par  $\alpha_2$  et  $\alpha_4$  (21,0 % et 23,3 %) avec  $\alpha_2$ ,  $\alpha_4$  et  $\alpha_5$  les alias ( $F_N, I_{v_l}$ ); ( $I, F_{N-v_l}$ ) et ( $v_l, F_{N-I}$ ). Sans surprise l'échauffement est causé par  $\alpha_4$  (87,9 %), en ayant très probablement comme source l'effet Joule. De la même manière, le coefficient de frottement moyen est dû à  $\alpha_2$  (89,6 %), en ayant une valeur plus importante lorsque la force normale diminue.

Les analyses de variance des réponses  $T_{1,\%}$  et  $U_\%$  sont similaires à celles du taux d'usure, c'est-à-dire que  $\alpha_5$  a l'effet le plus important (56,7 % pour  $T_{1,\%}$  et 62,4 % pour  $U_\%$ ), suivi par  $\alpha_2$  (12,1 % et 25,1) et  $\alpha_4$  (21,8 % et 11,4 %). L'ANOVA obtenu pour la réponse  $\mu_\%$  est aussi comparable à celle du taux d'usure avec l'alias  $\alpha_5$  prédominant (80,5 %) et l'alias  $\alpha_2$  ayant une influence mineure (10,1 %). L'alias  $\alpha_1$  a peu d'impact sur les réponses, excepté pour  $T_{1,\%}$ , tandis que  $\alpha_3$ ,  $\alpha_6$  et  $\alpha_7$  sont négligeables.

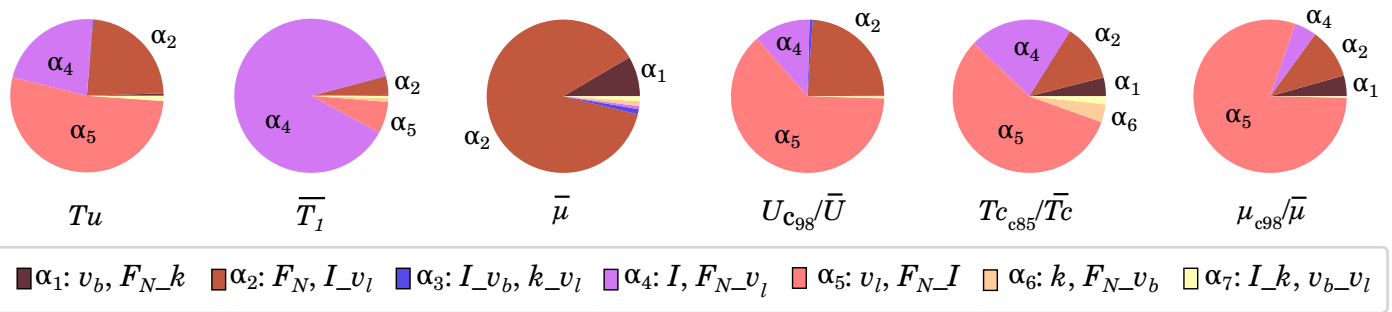


FIGURE 4.24 – Diagrammes circulaires représentant l'analyse de la variance de chaque réponse en fonction des alias.

Alias	$Tu$	$\bar{T}_1$	$\bar{\mu}$	$T_{1,\%}$	$\mu_\%$	$U_\%$
$\alpha_1$	0,77	0,19	6,78	3,92	4,12	0,06
$\alpha_2$	21,03	3,86	89,61	12,10	10,15	25,09
$\alpha_3$	0,29	0,75	0,34	3,83	0,02	0,52
$\alpha_4$	23,32	87,91	0,13	21,75	4,89	11,37
$\alpha_5$	53,89	6,63	0,40	56,69	80,46	62,42
$\alpha_6$	0,01	0,13	0,39	5,86	0,00	0,04
$\alpha_7$	0,70	0,51	2,44	2,07	1,71	0,50

Code couleur : 10 % < x < 21 %    21 % < x < 50 %    50 % < x

TABEAU 4.21 – Analyse de la variance des différentes réponses en fonction des alias [%] (valeurs de la figure 4.24).

Le taux d'usure en fonction du taux des pics d'amplitude de la température, de la tension et du coefficient de frottement est tracé sur la figure 4.25 avec une échelle logarithmique. Une régression linéaire est réalisée sur chaque ensemble de valeurs et donne des résultats corrects, avec un coefficient de corrélation  $r$  de 0,82 pour  $T_{1,\%}$ , 0,81 pour  $U_\%$  et 0,75 pour  $\mu_\%$ . En outre, le pion s'use principalement lorsque les pics de tension et de frottement ont lieu. Les pics de tension sont d'une part le résultat de la perte de contact qui génère des arcs électriques et d'autre part de la dégradation de la surface du pion et du disque qui entraîne une résistance de contact plus élevée. D'autre part, et comme nous l'avons vu précédemment, les pics de frottement sont produits lorsqu'il y a une adhésion importante du pion sur une surface du disque détériorée. Les pics de température sont le résultat de ces deux phénomènes et peuvent alors être employés comme un indicateur permettant d'anticiper une usure prématurée.

L'analyse de la variance montre clairement que ce sont  $\alpha_5$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_4$  qui sont prédominants pour l'usure et l'apparition des pics. Cependant, le plan factoriel fractionnaire présente l'inconvénient de confondre les effets des facteurs et leurs interactions, mais parmi ces différents alias, seuls la vitesse linéaire, le courant et la charge normale sont présents. Ainsi, dans le cas présent la raideur  $k$  et la vitesse de balayage  $v_b$  jouent un rôle négligeable dans l'usure, la température ou le frottement. Les impacts des autres paramètres peuvent également être trop importants pour que l'effet de ces deux facteurs soit perceptible, ou bien les valeurs choisies ne sont pas assez dispersées. Par exemple, dans le cas où le contact serait d'un côté complètement rigide ( $k$  très élevé) et d'un autre très souple ( $k$  très faible), l'influence de la raideur pourrait être beaucoup plus élevée, comme l'on montré certains auteurs [112].

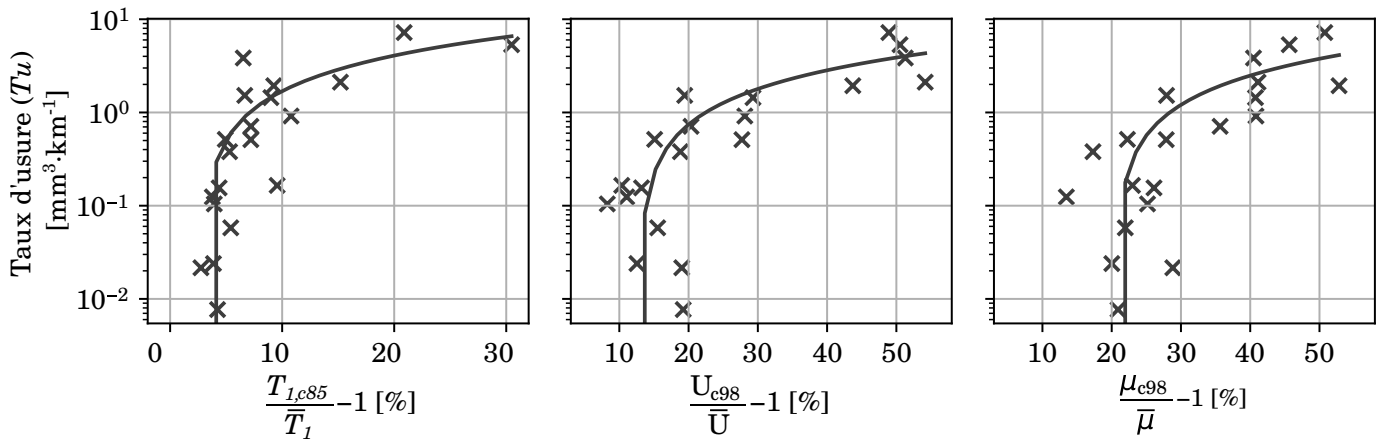


FIGURE 4.25 – Taux d'usure en fonction du ratio du centile 98 (ou 85) sur la moyenne de (a) la température  $T_1$ , (b) la tension aux bornes de l'alimentation  $U$  et (c) le coefficient de frottement  $\mu$ .

#### 4.6.5 Conclusion

Un plan factoriel fractionné composé de 16 essais et basé sur six facteurs, à savoir la nuance, la rigidité, la vitesse de balayage, le courant, la force normale et la vitesse linéaire (ayant chacun deux niveaux) a été construit. Les premiers essais réalisés ont montré que quatre types de courbe de température mesurée sur le thermocouple 1, notés de 1 à 4, pouvaient être observés. Le type 1 est le plus représentatif, suivi du type 2 qui se caractérise par un échauffement plus important pouvant évoquer une forme de rodage. Les types 3 et 4 ne sont pas représentatifs car ils ont pour origine la dégradation de la surface du disque qui devient destructive pour le pion, accélérant ainsi son usure. Dans le type 3, la dégradation de la surface du disque est souvent locale et se produit généralement après plusieurs minutes d'essais. Cette dégradation s'observe par des pics d'échauffement périodiques dont l'amplitude augmente progressivement. Elle peut être stoppée par une mise en pause de l'essai, ce qui permet également de réaliser une réplique du pion. La dégradation observée dans le type 4 est rapide (<5 minutes) et globale sur la surface du disque. Elle conduit à une usure du pion immédiate, détruisant son volume mesurable et ne permettant pas de mener à terme un essai. À cause de ce phénomène, de nombreux essais effectués avec l'une des nuances n'ont pas pu être concluants. De ce fait, le facteur nuance a été supprimé pour la suite des essais.

Un plan factoriel fractionné composé de 8 essais et basé sur cinq facteurs a donc été mis en place. Chaque essai a été répété trois fois et a montré que la répétabilité de la mesure de l'usure est difficile à obtenir. Cependant, les différences entre les résultats d'usure de chaque configuration d'essais sont suffisamment importantes pour effectuer une analyse de la variance, ceci afin de connaître les facteurs et les interactions qui ont le plus d'impact. Les réponses étudiées sont le taux d'usure, la température, la tension, la friction ou l'amplitude des pics de ces trois dernières sorties.

L'ANOVA montre que le coefficient de frottement moyen est principalement influencé par la force de contact, tandis que l'échauffement est provoqué par le courant et donc par l'effet Joule et/ou les arcs électriques. Ensuite, les analyses de la variance du taux d'usure et du taux de pics de la température, du coefficient de frottement et de la tension ont montré des résultats similaires. En effet, la vitesse linéaire et/ou l'interaction entre le courant et la force de contact, puisque ces deux grandeurs sont aliasées, sont dominantes sur ces réponses. La force de contact (aliasée à l'interaction entre le courant et la vitesse linéaire) et le courant (aliasé à l'interaction entre la force de contact et la vitesse linéaire) ont également une influence non-négligeable sur le taux d'usure. Enfin, la vitesse de balayage et la rigidité ont peu d'impact, voire aucun, sur les résultats. Par conséquent, elles seront maintenues fixes pour les futures séries d'essais.

Pour terminer, l'utilisation de régressions linéaires entre le taux des pics de tension, du coefficient de frottement et de la température, et le taux d'usure, a indiqué une bonne concordance ce qui souligne qu'une perte de volume importante se produit en même temps que les pics de tension et de frottement. Ainsi, la température peut être utilisée comme indicateur pour anticiper une perte de volume prématurée. Cependant, l'usure corrélée aux pics de tension et de frottement n'est pas représentative d'une bande de captage frottant sur le fil de contact. En effet, même si la mise en pause des essais permet à la surface du disque de s'oxyder, les passages répétés du pion dégradent trop rapidement le cuivre par rapport au passage beaucoup moins fréquent d'un train. Cette dégradation semble accélérée par des

conditions d'essais sévères, qui ont lieu lorsque le courant, la force de contact, et plus particulièrement la vitesse linéaire ont des valeurs importantes. De nouvelles conditions expérimentales sont donc à définir pour permettre de réaliser des essais longs dépourvus de pics d'échauffement. En plus de revoir les conditions expérimentales, il est envisageable de réaliser des essais sur plusieurs jours afin d'augmenter l'usure, ce qui permettra de limiter l'erreur relative de mesure de volume et d'être plus précis sur le taux d'usure calculé.

---

# CONCLUSION

Ces travaux se concentrent sur la liaison pantographe-caténaire et plus précisément, sur l'échauffement et l'usure de la bande de captage en contact avec le fil de la caténaire, train en mouvement. Dans le premier chapitre, un état de l'art est réalisé, en s'appuyant sur des travaux expérimentaux spécifiques au contact bande-fil ou aux contacts entre les balais et les bagues d'un collecteur tournant. Après une description des principaux bancs d'essais utilisés pour étudier ces système, une analyse et une synthèse des différents résultats a été réalisée. Les chercheurs s'accordent à dire que le courant est le principal acteur de l'usure et de l'échauffement, que ce soit par effet Joule, par production d'arcs électriques ou par oxydation de la surface des matériaux. D'autres facteurs tels que la force de contact, le sens de circulation du courant ou la composition de l'air influencent également l'usure et l'échauffement. Cependant, certains facteurs, notamment ceux liés aux matériaux utilisés, ne sont pas encore bien compris. Par exemple, les études portant sur le taux d'imprégnation des bandes indiquent clairement qu'il y a un point optimal où l'usure est la plus faible, sans que celui-ci puisse être défini précisément. Ces travaux bibliographiques ont permis la rédaction et la publication d'un article de synthèse [147].

Le deuxième chapitre décrit le fonctionnement d'un banc d'essais. Ce démonstrateur a pour objectif de représenter le contact entre la bande de captage et le fil de contact sous la forme d'un contact entre un pion en graphite et un disque en cuivre rotatif.

Les actionneurs sont dans un premier temps énumérés : ils se composent d'un moteur produisant la rotation du disque, d'un vérin mettant en appui le pion contre le disque, d'un deuxième vérin gérant le balayage du pion sur le disque, et d'une alimentation de puissance permettant la circulation du courant.

Dans un deuxième temps, l'instrumentation mise en place est décrite. Elle se compose d'une part de capteurs permettant de réaliser des asservissements (vitesse de rotation, courant, force de contact) et/ou de mesurer différentes valeurs (tension, force transversale, vibrations). Deux cartes réalisées au sein du laboratoire permettent de mesurer la température interne du pion avec une incertitude de  $\pm 1,2$  °C, ainsi que la température du disque avec une incertitude de  $\pm 0,94$  °C.

Enfin, le système contrôle/commande est dans un troisième temps introduit. La partie matérielle est de marque National Instruments, avec un contrôleur temps réel cRIO sur lequel quatre modules sont embarqués. La partie logicielle est quant à elle programmée en langage LabVIEW. Une stratégie d'acquisition est mise en place afin d'avoir une fréquence d'échantillonnage de valeur élevée sur les mesures dont la fréquence de variation est rapide (vibrations, tension, ..) et de valeurs plus faible sur les autres variables (températures, vitesse de rotation).

Les valeurs de courant et de vitesse linéaire atteintes sur ce banc d'essais ne sont pas aussi importantes que celles trouvées en ligne, sur un TER par exemple. Néanmoins des échantillons de bande de captage peuvent être soumis à des conditions similaires afin d'observer leur échauffement et leur usure.

Le troisième chapitre se concentre sur les travaux qui ont permis de mener des essais longues durées dans des conditions répétables. Il décrit tout d'abord les évolutions structurelles du banc d'essais. Ainsi, des révisions ont été effectuées sur plusieurs volets, à savoir :



- Le maintien du disque et la limitation des valeurs de vitesse de rotation, de l'amplitude et de la vitesse de balayage.
- La robustesse du système de balayage permettant que le plan entre les surfaces du disque et du pion soit identique dans un sens de balayage comme dans l'autre.
- La méthode d'alimentation, qui impose l'asservissement du courant avec une fluctuation de la résistance de contact et, par conséquent, de la tension.

Ensuite, une méthode de mesure de l'usure, développée en partenariat avec le département de mécanique appliquée de l'Institut FEMTO-ST, est détaillée. Le pion prend une géométrie qui permet de disposer de deux plans de référence grâce auxquels le volume perdu peut être mesuré. Pour cela, de la pâte silicone est utilisée pour réaliser des moules du pion à différents temps de trajet simulé, et sans avoir à le démonter. Une pâte de polyuréthane est ensuite employée pour obtenir des répliques du pion. Ces répliques sont ensuite analysées au microscope optique puis *via* le logiciel Gwyddion pour déduire le volume perdu avec une incertitude de  $13,6 \text{ mm}^3$ . Plusieurs points permettent de connaître le taux d'usure, lorsqu'une période de rodage est dépassée, grâce à une régression linéaire. Cette méthode nécessite néanmoins d'arrêter l'essai plusieurs fois ce qui contraint à interrompre les transferts thermiques. Enfin, un protocole de préparation de la surface du disque a été développé afin de mener des essais ayant des conditions initiales identiques, tout en étant le plus représentatif du contact bande/fil de la liaison caténaire pantographe. Pour cela, le disque est nettoyé et poli pour avoir un état de surface dénué de patine. Un temps d'attente est après coup respecté afin que la surface du cuivre s'oxyde suffisamment. En effet, l'utilisation d'un cuivre pur provoque une adhésion trop importante entre le pion et le disque. De plus, un rodage peut être observé en début d'essai. Le frottement constant appliqué sur la surface du cuivre peut provoquer une dégradation globale ou localisée sur un ou plusieurs rayons, particulièrement dans des conditions d'essais sévères. Visuellement, la surface localement dégradée présente une teinte différente du reste du disque. Ce phénomène s'observe aussi analytiquement lorsque le pion frotte au niveau d'une dégradation avec l'échauffement, le frottement et l'usure qui augmentent. Cette altération peut survenir progressivement, se manifestant dans un premier temps par de petits pics d'échauffement. Dans ce cas là, une mise en pause de l'essai, permettant de réaliser une réplique du pion, suffit parfois à interrompre le processus d'altération. Dans d'autres cas, la détérioration peut être brutale et l'essai doit alors être recommencé. Sous certaines conditions trop sévères il peut être difficile de mettre en œuvre un essai réaliste.

Le chapitre quatre s'intéresse aux résultats expérimentaux obtenus sur trois nuances de bandes de captage, notées A, B et C, dont le type de métal, le taux d'imprégnation et le fabricant différent. Des essais en ligne menés par la SNCF mettent en évidence que la nuance C s'use plus rapidement que la nuance A, tandis que les essais expérimentaux réalisés par N. Delcey sur le banc d'essais de Polimi montrent que le volume d'une bande de nuance A s'échauffe plus que celui d'une nuance B. De plus, la SNCF indique que les nuances A et B ont une résistance à l'usure similaire en ligne.

Une caractérisation de la diffusivité thermique des nuances selon les trois axes est ensuite effectuée au sein du laboratoire, sur un banc de type *laser flash*. En fonction de la température, les mesures montrent que les diffusivités suivent une pente comprise entre  $-1,9$  et  $-10,0 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ , alors que leurs valeurs à  $20 \text{ °C}$  sont toutes comprises entre  $7,17$  et  $13,44 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . De manière générale, la nuance A diffuse plus que la B, qui elle-même diffuse mieux que la C. Ces tendances ne sont pas les mêmes suivant les axes puisque les nuances A et C ont une forte anisotropie marquée par une diffusivité dans l'axe  $x$  beaucoup plus importante que dans l'axe  $y$  et  $z$ . La nuance B montre peu d'anisotropie. Ainsi, par rapport à la nuance B, les nuances A et C diffusent mieux la chaleur dans l'axe  $x$  et moins bien dans les autres axes. Cependant, des valeurs de conductivités thermiques fournies par le constructeur des bandes des nuances A et B montrent que, quel que soit l'axe, la nuance A conduit mieux la chaleur que la nuance B.

Une étude du comportement thermique du pion est après quoi présentée en deux temps. Premièrement, des travaux se concentrent sur l'évolution de la température en fonction de la hauteur du point de mesure par rapport au contact. Ils montrent que la variation de température, lorsque la sonde est située entre 1 et 5 mm de hauteur du contact, est peu élevée et présente donc un faible gradient. Deuxièmement, une étude de l'évolution des température, dont les points de mesures sont à différentes hauteurs du contact, est réalisée en fonction du courant. Au fur et à mesure que le courant augmente il y a une inversion du gradient de température, c'est-à-dire que la température au plus proche du contact est plus faible que celles qui sont plus éloignées. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce phénomène : d'une part le volume du pion sortant de la pince est refroidi par convection et d'autre part, le disque en cuivre joue le rôle de puits froid par conduction. Enfin, l'effet Joule interne à la pince et au pion apporte une source de chaleur

suffisante pour inverser le gradient de température.

Dans la partie suivante, et après avoir introduit la méthode des plans d'expériences, un plan complet a été effectué pour étudier l'impact de trois facteurs à trois niveaux, à savoir la force de contact, la vitesse linéaire et le courant, sur l'échauffement du pion. L'analyse des valeurs de température, de tension et de puissance dissipée montre qu'elles sont majoritairement dépendantes de la force de contact moyenne dès que celle-ci est inférieure à 50 N. Pour ces valeurs, la qualité du contact disque-pion n'est pas suffisante et de nombreux décrochements génèrent des arcs électriques qui sont marqués par de fortes variations de température et de tension. En revanche, lorsque la force de contact moyenne est supérieure à 50 N, les réponses sont majoritairement influencées par le courant, puis par la vitesse linéaire, ce qui est plus représentatif du contact fil-bande[148]. En effet, en ligne la force de contact de chaque bande de captage sur le fil est supérieure à 60 N.

Pour finir, une étude sur les origines de l'usure est réalisée. Elle se base sur un plan fractionné permettant de limiter le nombre d'essais tout en déterminant statistiquement quels sont les facteurs influençant l'usure du pion parmi cinq facteurs. Initialement, ce plan se composait de six facteurs à deux niveaux, à savoir : la vitesse linéaire, le courant, la vitesse de balayage, la force de contact, la raideur et le type de nuance utilisé. Cependant, l'une des deux nuances utilisées a régulièrement montré, dans des conditions d'essais sévères, des taux d'usures extrêmes qui ne permettent pas la réalisation d'essais représentatifs. Le facteur nuance a donc été enlevé en se concentrant seulement sur la nuance A. Une fois le plan d'expériences réalisé, l'analyse des résultats a montré que la température moyenne est majoritairement impactée par le courant tandis que le frottement est dépendant de la force de contact. L'usure, ainsi que les pics de température, de tension et de frottement, sont quant à eux majoritairement influencés par la vitesse linéaire et, secondairement, par la force de contact et le courant. Ainsi, la raideur et la vitesse de balayage ne jouent pas un rôle clé dans le processus d'usure et d'échauffement et pourront être conservées pour les futurs essais. Grâce à des régressions linéaires, il a été également montré que le taux d'usure était relativement proportionnel aux taux de pics de courant, de tension et de frottement. D'une part, la température, le frottement et la tension peuvent être utilisés comme indicateurs d'une accélération de l'usure. D'autre part, ces pics ont pour origine une dégradation locale de la surface du disque qui n'est pas représentative du contact pion-disque, et qui doivent de ce fait être évités.



---

# PERSPECTIVES

La conclusion de l'état de l'art, les résultats du dernier chapitre ainsi que la méthodologie mise en place ouvrent à de nombreuses perspectives industrielles, scientifiques ou les deux à la fois. Elles sont dans chaque cas classées par priorité selon le point de vue de l'auteur.

## **Perspectives scientifiques et industrielles**

1. On a vu que l'usure du contact est accélérée par une détérioration de la surface du disque. Par conséquent, l'amélioration du protocole expérimental permettant de faire des essais dans des conditions représentatives du contact fil-bande doit être prioritaire. Pour cela, les courbes de température, de tension et de frottement doivent être utilisées comme indicateur et être dénués de pics. La méthode actuelle consiste à interrompre l'essai dès que des pics de température apparaissent, en respectant des pauses d'au moins 10 minutes. Une seconde méthode pourrait être de roder longtemps la surface du disque par un frottement de pion dans des conditions expérimentales "douces".
2. Des essais de plus longues durées peuvent être mis en place pour voir l'évolution de l'usure sur plusieurs jours et sur une longue distance. Les conditions expérimentales seront maintenues constantes et le disque ne sera pas nettoyé et poli entre chaque jour.
3. Une surface de réponse se basant sur la force de contact, le courant et la vitesse linéaire peut ensuite être réalisée. Cette surface de réponse doit être déterminée au moins sur deux nuances. En effet, comme on l'a montré dans l'état de l'art, la résistance aux différents mécanismes d'usure change d'une nuance à l'autre (voir section 1.5.2).
4. L'alimentation de puissance utilisée ne permet pas d'avoir une mesure de tension précise. De plus, puisque cette mesure se fait à ses bornes, la résistance du système prend en compte toutes les résistances électriques parasites qui s'additionnent à la résistance de contact. La mesure de cette dernière manque donc de précision et est largement parasitée. La méthode de résistivité à 4 pointes entre la pince et les patins qui sont à la périphérie du disque permet d'améliorer la précision de la mesure et de restreindre le nombre de résistances parasites prises en compte.
5. Une méthode de détection des arcs électriques sera intéressante à mettre en place :
  - Des photodiodes installées de chaque côté du pion et au plus proche du contact peuvent être une première solution. Cette méthode est similaire à celle employée sur le banc d'essais utilisé par Zhang.Y et al. [8], présenté dans la section 1.4.1. La luminosité dans la salle doit être au plus bas pour augmenter la sensibilité des sondes. Cette méthode a notamment l'avantage d'être en temps réel, d'être quantitative et de nécessiter peu de puissance de calcul.
  - Comme le montre la figure 4.26, un appareil photo peut aussi être utilisé pour faire une mesure qualitative. Pour cela, la salle doit totalement être plongée dans le noir et les photos sont prises sur une longue exposition. La sensibilité ISO et l'ouverture de l'objectif doivent être réglées pour capter suffisamment la lumière sans

surexposer la photo. Cette méthode, paraissant triviale, nécessite tout de même quelques précautions. Tout d'abord l'appareil photo doit être disposé sur un trépied et à un emplacement et une hauteur gardés fixes. La durée d'exposition doit être réglée de manière à ce qu'elle soit similaire au temps d'un aller ou d'un aller-retour du pion sur le disque. Les autres paramètres doivent ensuite être fixés de sorte que la luminosité soit toujours identique.

- Enfin, deux caméras placées sur des trépieds et disposés de chaque côté du banc d'essais sont une alternative aux deux méthodes décrites ci-dessus. L'analyse du spectre des images donne une information quantitative du nombre et de l'amplitude des arcs électriques. Cependant, cette méthode nécessite une grosse puissance de calcul, ce qui la rend complexe à installer en temps réel.



FIGURE 4.26 – Exemple d'une photo, prise dans le noir pour un temps d'exposition de 25 s ( $F_N=60$  N,  $I=120$  A,  $v_b=8$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=4$  N·mm<sup>-1</sup> et  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup>).

6. Une amélioration de la partie logicielle peut permettre d'accélérer la fréquence d'acquisition des signaux liés à la tension et aux vibrations mesurées par l'accéléromètre. En effet, l'interface graphique ainsi que la partie contrôle/commande du programme LabVIEW sont pour le moment compilées et exécutées sur le contrôleur temps-réel cRIO. Les temps d'exécution des boucles sont ainsi principalement dédiés à l'interface graphique (rafraîchissement des courbes et des valeurs), et la déportation de cette interface sur l'ordinateur peut permettre d'accélérer l'exécution des boucles sur le cRIO. Cette perspective permet aussi d'intégrer plus facilement les signaux issus des photodiodes, pour lesquels la fréquence d'acquisition devra être élevée.

### Perspectives scientifiques

1. Comme le montre l'état de l'art, un sujet n'est pas encore étudié et il concerne l'impact du sens dans lequel le graphite est frotté sur l'échauffement et l'usure. Sur le banc d'essais, les pions sont pour le moment découpés de telle manière que la face qui frotte contre le disque soit identique à celle de la bande frottant contre le fil. Dans ce cas, le plan de la face en contact est orthogonal à l'axe  $z$ . Des essais comparatifs de pions ayant différents sens de découpe pourront ainsi être menés, et d'autres pions dont le plan de contact soit orthogonal à l'axe  $x$  ou à l'axe  $y$  devront être découpés. L'usure, mais aussi les courbes de température, seront intéressantes à analyser pour comprendre l'impact de l'anisotropie des nuances.
2. L'incertitude des mesures des diffusivités thermiques mesurées sur le banc *Laser Flash* pourrait largement être améliorée en étant plus précis sur la mesure de l'épaisseur des échantillons, par exemple en utilisant un microscope optique.
3. Des mesures de capacité spécifique, en utilisant par exemple un banc de calorimétrie différentielle à balayage (*Differential Scanning Calorimetry* ou DSC) pourront être réalisées. Avec les valeurs de diffusivité, elles seront utiles pour estimer la conductivité thermique des nuances dans les trois axes.
4. La surface du disque présente différents aspects après chaque essai. D'une part, le cuivre peut s'oxyder de deux manières différentes suivant la composition de l'air, la température ainsi que la pression. D'autre part, une couche de graphite peut se déposer sur le disque, voire être imprégnée dans la surface du disque. Une étude de la composition de la surface du disque permettrait de mieux comprendre les mécanismes d'usure.

### Perspectives industrielles

1. Un plus large panel de bandes pourra être testé sur le banc d'essais.

2. Afin d'améliorer la représentativité du contact, une extension du banc peut être réalisée. Une idée de développement, schématisée sur la figure 4.27, consiste à fixer par des attaches un tronçon de fil de contact à la périphérie du disque en cuivre. Une bande de captage est ensuite fixée au bout d'un ou deux vérins de pressions, eux-mêmes attachés au vérin de balayage. Cette configuration s'approche du banc d'essais à échelle un de l'université Polytechnique de Milan. D'une part, les objets en contact seront alors plus réalistes puisque le rapport de masse entre le fil et la bande de captage est quasiment inversé à celui entre le pion et le disque. De plus, les flux de chaleur sont alors identiques. D'autre part, la forme de contact est cylindre-plan au lieu d'un contact plan-plan, avec pour seul défaut de représentativité son rayon de courbure. Ce montage permet donc de tester rapidement des nuances sous forme de pions frottés sur le disque tout en validant les résultats en faisant des essais à partir de bande de captage sur fil de contact.

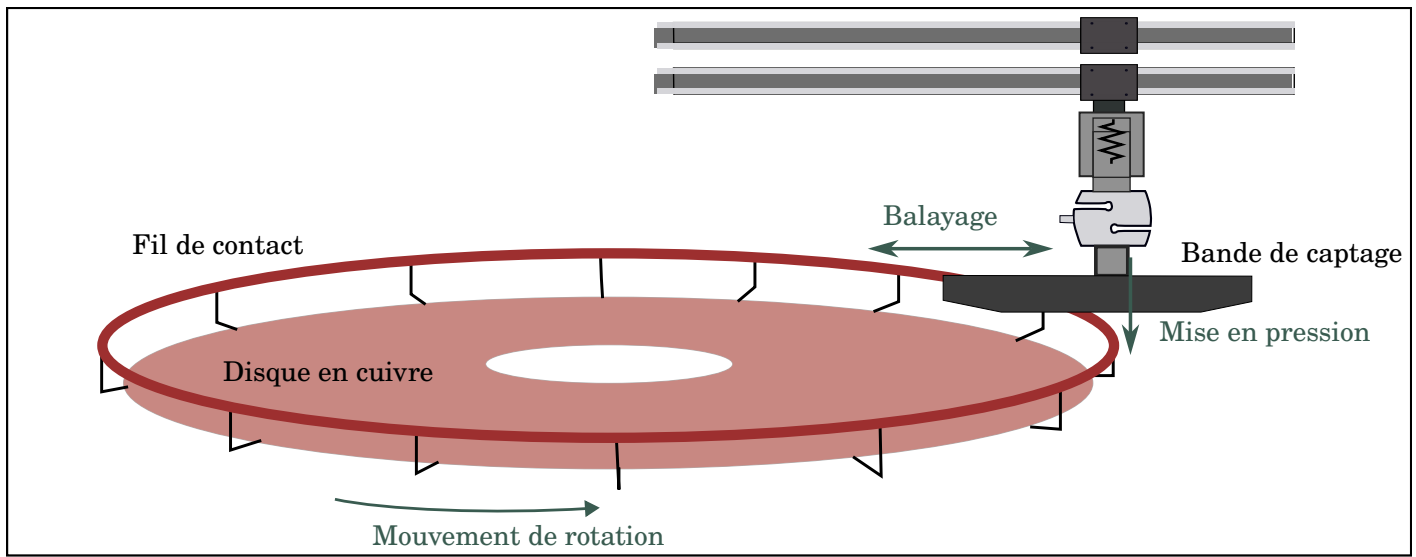


FIGURE 4.27 – Schéma d'amélioration du banc d'essais, par l'ajout d'un fil de contact à sa périphérie.



---

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mémento de statistiques des transports 2019. Technical report, Ministère de la transition écologique, 2020.
- [2] Siemens. ehighway – solutions for electrified road freight transport. <https://press.siemens.com/global/en/feature/ehighway-solutions-electrified-road-freight-transport>, 2021.
- [3] Olivier Vo-Van. Introduction of variability into pantograph-catenary dynamic simulations. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2016.
- [4] Stefano Derosa, Petter Nåvik, Andrea Collina, Giuseppe Bucca, and Anders Rønnquist. A heuristic wear model for the contact strip and contact wire in pantograph – catenary interaction for railway operations under 15 kV 16.67 Hz AC systems. Wear, 456-457 :203401, sep 2020.
- [5] Martina Grandin. Tribology of Metal-Graphite Composites : A Study of Sliding Electrical Contact Surfaces. PhD thesis, Uppsala University, Disciplinary Domain of Science and Technology, Technology, Department of Engineering Sciences, Applied Materials Sciences, Uppsala, 2017.
- [6] S.Magny. Numerical study of convection around a pantograph strip. Master's thesis, Université de France-compté, 2016.
- [7] Nicolas Delcey, Philippe Baucour, Didier Chamagne, Geneviève Wimmer, Giuseppe Bucca, Nicolas Bruyere, Odile Bouger, Gérard Auditeau, and Thomas Bausseron. Analysis of the thermal variations in a moving pantograph strip using an electro-thermal simulation tool and validating by experimental tests. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit, 234(8), oct 2019.
- [8] Yanyan Zhang, Yongzhen Zhang, and Chenfei Song. Arc discharges of a pure carbon strip affected by dynamic contact force during current-carrying sliding. Materials, 11(5) :796, may 2018.
- [9] Zhenghai Yang, Yongzhen Zhang, Fei Zhao, and Bao Shangguan. Dynamic variation of arc discharge during current-carrying sliding and its effect on directional erosion. Tribology International, 94 :71–76, feb 2016.
- [10] Zhenghai Yang, Yuexin Ge, Xu Zhang, Bao Shangguan, Yongzhen Zhang, and Junwei Zhang. Effect of carbon content on friction and wear properties of copper matrix composites at high speed current-carrying. Materials, 12(18) :2881, sep 2019.
- [11] M. Grandin and U. Wiklund. Wear phenomena and tribofilm formation of copper/copper-graphite sliding electrical contact materials. Wear, 398-399 :227–235, mar 2018.
- [12] Xinlong Liu, Mingjie Hu, Zhihao Li, Chaowei Zhou, Qian Xiao, Wenbin Yang, and Daoyun Chen. Effect of copper contents on the current-carrying wear properties of carbon brush under different temperatures conditions. Journal of Materials Research and Technology, 15 :3110–3121, nov 2021.
- [13] Stefano Derosa, Petter Nåvik, Andrea Collina, Giuseppe Bucca, and Anders Rønnquist. Contact point lateral speed effects on contact strip wear in pantograph – catenary interaction for railway operations under 15 kV 16.67 Hz AC systems. Wear, 486-487 :204103, dec 2021.



- [14] T. Ding, G.X. Chen, J. Bu, and W.H. Zhang. Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph–catenary systems. *Wear*, 271(9-10) :1629–1636, jul 2011.
- [15] T. N. Rhodin. Low temperature oxidation of copper. i. physical mechanism<sup>1a</sup>. *Journal of the American Chemical Society*, 72(11) :5102–5106, nov 1950.
- [16] Nicolas Delcey. Modélisation électro-thermique d'un pantographe pour un train en mouvement. PhD thesis, Université Bourgogne-Franche Comté, 2018.
- [17] M.Braunović, V.V.Konchits, and N.K.Myshkin. Fundamentals of Electrical Contacts. Taylor & Francis, 2006.
- [18] Z.L. Hu, Z.H. Chen, and J.T. Xia. Study on surface film in the wear of electrographite brushes against copper commutators for variable current and humidity. *Wear*, 264(1-2) :11–17, jan 2008.
- [19] Rutie Liu, Kai Cheng, Jie Chen, Xiang Xiong, and Xueyang Lin. Friction and wear properties of high temperature and low temperature sintered copper-graphite brushes at different ambient temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4) :7288–7296, jul 2020.
- [20] Julien Petitgirard. Modélisation du dimensionnement électrothermique du faisceau électrique dans son environnement véhicule. PhD thesis, Université de Franche Comté, Décembre 2022.
- [21] T.Bausseron. Etude de l'échauffement de la caténaire lors du captage à l'arrêt : Développement d'un outil informatique. PhD thesis, Université de Franche-Comte, 2016.
- [22] Morris Brenna, Federica Foadelli, and Dario Zaninelli. Electrical Railway Transportation Systems. Wiley & Sons, Limited, John, 2018.
- [23] Coralie Lemke. Les premiers camions électriques alimentés par caténaires roulent en allemagne. *Sciences et Avenir*, 2019.
- [24] Bossi Olivier. Contribution au dimensionnement et à la gestion par optimisation de systèmes de stockage d'énergie pour les réseaux électriques ferroviaires par Olivier Bossi. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [25] Hongjuan Yang, Bo Hu, Yanhua Liu, Xiaolu Cui, and Gang Jiang. Influence of reciprocating distance on the delamination wear of the carbon strip in pantograph–catenary system at high sliding-speed with strong electrical current. *Engineering Failure Analysis*, 104 :887–897, oct 2019.
- [26] Montserrat Simarro, Juan J. Castillo, Juan A. Cabrera, and S. Postigo. Evaluation of the influence of the speed, preload and span length on the contact forces in the interaction between the pantograph and the overhead conductor rail. *Engineering Structures*, 243 :112678, sep 2021.
- [27] Guiming Mei and Yang Song. Effect of overhead contact line pre-sag on the interaction performance with a pantograph in electrified railways. *Energies*, 15(19) :6875, sep 2022.
- [28] Tong-Jin Park, Chang-Soo Han, and Jin-Hee Jang. Dynamic sensitivity analysis for the pantograph of a high-speed rail vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 266(2) :235–260, 2003.
- [29] J. Pombo and J. Ambrósio. Influence of pantograph suspension characteristics on the contact quality with the catenary for high speed trains. *Computers & Structures*, 110-111 :32–42, nov 2012.
- [30] Zhiyuan Dai, Tian Li, Jian Deng, Ning Zhou, and Weihua Zhang. Effect of the strip spacing on the aerodynamic performance of a high-speed double-strip pantograph. *Vehicle System Dynamics*, 0(0) :1–17, 2021.
- [31] J.P.Massat. Modélisation du comportement dynamique du couple pantographe-caténaire. PhD thesis, Ecole centrale de Lyon, 2007.
- [32] Chaimaa Belkhir. Modélisation et simulation du pantographe. PhD thesis, Ecole Supérieur en Sciences Appliquées d'Alger, 2020.
- [33] Applications ferroviaires -systèmes de captage de courant -critères techniques d'interaction entre le pantographe et la ligne aérienne de contact (réalisation du libre accès - nf en 50367. 2013.
- [34] Zefeng Yang, Pan Xu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao, Ning Zhou, and Guangning Wu. Influence of the crosswind on the pantograph arcing dynamics. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48(8) :2822–2830, aug 2020.
- [35] Zhiyuan Dai, Tian Li, Ning Zhou, Jiye Zhang, and Weihua Zhang. Numerical simulation and optimization of aerodynamic uplift force of a high-speed pantograph. *Railway Engineering Science*, 30(1) :117–128, 2022.
- [36] Yang Song, Zhigang Liu, Hongrui Wang, Xiaobing Lu, and Jing Zhang. Nonlinear analysis of wind-induced vibration of high-speed railway catenary and its influence on pantograph–catenary interaction. *Vehicle System Dynamics*, 54(6) :723–747, 2016.

- [37] J. D. Bernal. The structure of graphite. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 106(740) :749–773, dec 1924.
- [38] D. D. L. Chung. Review graphite. Journal of Materials Science, 37(8) :1475–1489, 2002.
- [39] M.F.C. Ordoñez, M.C.M. Farias, S. Descartes, I.F. Machado, and R.M. Souza. Tribofilm formation during dry sliding of graphite- and MoS<sub>2</sub>- based composites obtained by spark plasma sintering. Tribology International, 160 :107035, aug 2021.
- [40] Frank Philip Bowden. The friction and lubrication of solids. Clarendon Press, 2001.
- [41] Nam P. Suh and Sin H-C. The genesis of friction. Wear, 1981.
- [42] J.D. Byerlee. The mechanics of stick-slip. Tectonophysics, 9(5) :475–486, may 1970.
- [43] Xueyang Lin, Rutie Liu, Jie Chen, Xiang Xiong, and Ning Liao. Study on current-carrying friction and wear properties of copper-graphite brush material reinforced by organosilicon. Journal of Materials Research and Technology, 12 :365–375, may 2021.
- [44] Youcef Mouadji. Effets du courant électrique sur le mécanisme de croissance de la couche d'oxyde à l'interface des contacts électrodynamiques cuivre-graphite et graphite-graphite. PhD thesis, Université constantine 1, 2013.
- [45] Xiu zhou LIN, Min hao ZHU, Ji liang MO, Guang xiong CHEN, Xue song JIN, and Zhong rong ZHOU. Tribological and electric-arc behaviors of carbon/copper pair during sliding friction process with electric current applied. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21(2) :292–299, feb 2011.
- [46] Onur Güler, Temel Varol, Ümit Alver, and Serkan Biyik. The wear and arc erosion behavior of novel copper based functionally graded electrical contact materials fabricated by hot pressing assisted electroless plating. Advanced Powder Technology, 32(8) :2873–2890, aug 2021.
- [47] Jin-Kun Xiao, Lei Zhang, Ke-Chao Zhou, and Xin-Ping Wang. Microscratch behavior of copper-graphite composites. Tribology International, 57 :38–45, jan 2013.
- [48] Nam P. Suh. An overview of the delamination theory of wear. Wear, 44(1) :1–16, aug 1977.
- [49] San Ming Du, Fei Zhao, and Yong Zhen Zhang. Friction and wear behavior of copper-graphite composite material in high-speed sliding with current. In Emerging Materials and Mechanics Applications, volume 487 of Advanced Materials Research, pages 411–415. Trans Tech Publications Ltd, 4 2012.
- [50] W.T. Clark and J.K. Lancaster. Breakdown and surface fatigue of carbons during repeated sliding. Wear, 6(6) :467–482, 1963.
- [51] Hans Jörg Mathieu, , Erich Bergmann, and René Gras. Traité des matériaux : Analyse et technologie des surfaces : couches minces et tribologie. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003.
- [52] Qin Deng, Wenfu Wei, Guofeng Yin, Wenhan Xie, Zhanglin Huang, Junwen Ren, Yan Yang, Qichen Chen, and Guangning Wu. The effect of thermal shock temperature difference on the structural, dynamics and mechanical properties of carbon materials characterized by ultrasonic test technology. Journal of Materials Science, 56(33) :18522–18533, 2021.
- [53] G.Wu, Y.Zhou, G.Gao, J.Wu, and W.Wei. Arc erosion characteristics of cu-impregnated carbon materials used for current collection in high-speed railways. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 8 :1014–1023, 2018.
- [54] X.C. Ma, G.Q. He, D.H. He, C.S. Chen, and Z.F. Hu. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system. Wear, 265(7-8) :1087–1092, sep 2008.
- [55] Ribbing C.G and Roos A. Copper oxides (cu<sub>2</sub>o, cuo). Handbook of Optical Constants of Solids Volume II, Pages 875-882, 1997.
- [56] A.Senouci, J.Frene, and H.Zaidi. Wear mechanism in graphite-copper electrical sliding contact. Wear, 225 :949–953, 1999.
- [57] T.F.J. Quinn. The role of oxide films in the friction and wear behaviour of metals. In Microscopic Aspects of Adhesion and Lubrication, Proceedings of the 34th International Meeting of the Société de Chimie Physique, pages 579–597. Elsevier, 1981.
- [58] A. Bouchoucha, E.K. Kadiri, F. Robert, H. Zaidi, and D. Paulmier. Metals transfer and oxidation of copper—steel surfaces in electrical sliding contact. Surface and Coatings Technology, 76-77 :521–527, 1995. International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films.

- [59] Maurice Godet. The third-body approach : A mechanical view of wear. Wear, 100(1-3) :437–452, dec 1984.
- [60] R.D. Malucci. Characteristics of films developed in fretting experiments on tin plated contacts. In Electrical Contacts - 1999. Proceedings of the Forty-Fifth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (Cat. No.99CB36343), pages 175–185, 1999.
- [61] M.A.Beloufa. Investigation on contact surface damage of automotive connector by fretting corrosion. WIT Transactions on Engineering Sciences, 66, 2010.
- [62] Eric Chapteuil, Mathieu Renouf, Chaoqun Zeng, and Yves Berthier. Influence of copper/graphite properties on the tribological and electrical behavior of copper-graphite third body layer. Lubricants, 6(4) :109, dec 2018.
- [63] Linlin Su, Fei Gao, Xiaoming Han, Rong Fu, and En Zhang. Tribological behavior of copper–graphite powder third body on copper-based friction materials. Tribology Letters, 60(2), oct 2015.
- [64] Paul G. Slade. Electrical Contacts Principles and Applications, Second Edition. Taylor & Francis Group, 2017.
- [65] Linlin Su, Fei Gao, Xiaoming Han, and Jiguang Chen. Effect of copper powder third body on tribological property of copper-based friction materials. Tribology International, 90 :420–425, oct 2015.
- [66] Linlin Su, Fei Gao, Hualong Tao, Xiaoming Han, and Rong Fu. Influence of third body evolution on tribological property of copper-matrix friction material by surface treatment. In AIP Conference Proceedings. Author(s), 2017.
- [67] Ragnar Holm. Electric Contacts - Theory and Application. Springer Berlin Heidelberg, 3rd edition, 1967.
- [68] T. Ueno and N. Morita. Influence of surface roughness on contact voltage drop of sliding contacts. In Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2005. IEEE, 2005.
- [69] M. Grandin and U. Wiklund. Friction, wear and tribofilm formation on electrical contact materials in reciprocating sliding against silver-graphite. Wear, 302(1-2) :1481–1491, apr 2013.
- [70] Guangning Wu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao, Jie Wu, and Yue Zhou. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. Journal of Modern Transportation, 24(2) :132–138, apr 2016.
- [71] Pascal L. RATOVOSON. Caractérisation expérimentale d'un arc impulsif. PhD thesis, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2015.
- [72] J. R. Barber. Distribution of heat between sliding surfaces. Journal of Mechanical Engineering Science, 9(5) :351–354, dec 1967.
- [73] J. Bos and H. Moes. Frictional heating of tribological contacts. Journal of Tribology, 117(1) :171–177, jan 1995.
- [74] Hisham A. Abdel-Aal. Division of frictional heat : The dependence on sliding parameters. International Communications in Heat and Mass Transfer, 26(2) :279–288, feb 1999.
- [75] Brian Vick and Michael J. Furey. A basic theoretical study of the temperature rise in sliding contact with multiple contacts. Tribology International, 34(12) :823–829, dec 2001.
- [76] Ling He and Timothy C. Ovaert. Heat partitioning coefficient calculations for sliding contacts with friction. Tribology Transactions, 51(1) :12–18, jan 2008.
- [77] R. Bosman and M. B. de Rooij. Transient thermal effects and heat partition in sliding contacts. Journal of Tribology, 132(2), mar 2010.
- [78] Y. Waddad, V. Magnier, P. Dufrénoy, and G. De Saxcé. Heat partition and surface temperature in sliding contact systems of rough surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer, 137 :1167–1182, jul 2019.
- [79] R W Powell and F H Schofield. The thermal and electrical conductivities of carbon and graphite to high temperatures. Proceedings of the Physical Society, 51(1) :153–172, jan 1939.
- [80] Adam Mańka, Andrzej Hełka, and Janusz Cwiek. The influence of pantograph carbon–metal composite slider thermal properties on the railroad wire temperature. Energies, 14(23) :7940, nov 2021.
- [81] Costica Nituca. Thermal analysis of electrical contacts from pantograph–catenary system for power supply of electric vehicles. Electric Power Systems Research, 96 :211–217, mar 2013.
- [82] Adrian Plesca. Thermal analysis of sliding electrical contacts with mechanical friction in steady state conditions. International Journal of Thermal Sciences, 84 :125–133, oct 2014.
- [83] Song Xiao, Yuanpei Luo, Jingchi Wu, Can Zhang, Yang Rao, Guangning Wu, and Jan Sykulski. Multi-physics analysis of a novel circular pantograph catenary system for high-speed trains. COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 40(2) :95–108, January 2021.

- [84] X.K. Wei, H.F. Meng, J.H. He, L.M. Jia, and Z.G. Li. Wear analysis and prediction of rigid catenary contact wire and pantograph strip for railway system. *Wear*, 442-443 :203118, feb 2020.
- [85] Eddy Chevallier. Mechanical model of the electrical response from a ring-wire sliding contact. *Tribology Transactions*, 63(2) :215–221, oct 2019.
- [86] Thomas Bausseron, Philippe Baucour, Raynal Glises, Sylvain Verschelde, and Didier Chamagne. Experimental study and modelling of overheating of electrical catenary-pantograph interface for trains supplied with power in station. *The European Physical Journal Applied Physics*, 70(3) :30901, jun 2015.
- [87] G.Wu, J.Wu, W.We, Y.Zhou, Z.Yang, and G.Gao. Characteristics of the sliding electric contact of pantograph/contact wire systems in electric railways. *Energies*, 11(1) :17, 2017.
- [88] Guangxiong Chen, Hongjuan Yang, Weihua Zhang, Yuting Lu, Saidan Zhang, and Zhongrong Zhou. Effect of the strip inclination angle on the friction and wear behavior of contact strip against contact wire with electric current. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*, 227(12) :1406–1417, aug 2013.
- [89] GX.Chen, Y.Hu, BJ.Dong, HJ.Yang, GQ.Gao, GN.Wu, W.Zhang, and ZR.Zhou. Experimental study on the temperature of the contact strip in sliding electric contact. *Engineering Tribology*, pages 1–8, 2017.
- [90] Giuseppe Bucca and Andrea Collina. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system. *Wear*, 266(1-2) :46–59, jan 2009.
- [91] G.Bucca, A.Collina, R.Manigrasso, F.Mapelli, and D.Tarsitano. Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph–catenary interaction. *J.Rail and Rapid Transit*, 225 :483–499, 2011.
- [92] G.Bucca, A.Collina, and E.Tanzi. Experimental analysis of the influence of the electrical arc on the wear rate of contact strip and contact wire in a.c. system. In *Advances in Italian Mechanism Science*, 2016.
- [93] J.A. Bares, N. Argibay, N. Mauntler, G.J. Dudder, S.S. Perry, G.R. Bourne, and W.G. Sawyer. High current density copper-on-copper sliding electrical contacts at low sliding velocities. *Wear*, 267(1-4) :417–424, jun 2009.
- [94] Da Hai He and Rafael Manory. A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors. *Wear*, 249(7) :626–636, jul 2001.
- [95] Li B. et al. Qian G., Feng Y. Effect of electrical current on the tribological behavior of the cu-ws<sub>2</sub>-g composites in air and vacuum. *Chin. J. Mech. Eng.* (2013), 26(384–392), 2013.
- [96] A Senouci, H Zaidi, J Frene, A Bouchoucha, and D Paulmier. Damage of surfaces in sliding electrical contact copper/steel. *Applied Surface Science*, 144-145 :287–291, apr 1999.
- [97] Selim Burak Cantürk and Jaroslav Kováčik. Review of recent development in copper/carbon composites prepared by infiltration technique. *Energies*, 15(14) :5227, jul 2022.
- [98] S.F Moustafa, S.A El-Badry, A.M Sanad, and B Kieback. Friction and wear of copper–graphite composites made with cu-coated and uncoated graphite powders. *Wear*, 253(7-8) :699–710, oct 2002.
- [99] Jaroslav Kováčik, Štefan Emmer, Jozef Bielek, and L’ubomír Keleši. Effect of composition on friction coefficient of cu–graphite composites. *Wear*, 265(3) :417–421, 2008.
- [100] Wae-Gyeong Shin and Soo-Hong Lee. An analysis of the main factors on the wear of brushes for automotive small brush-type DC motor. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(1) :37–41, jan 2010.
- [101] G.X.Chen, F.X.Li, L.Dong, M.H.Zhu, and Z.R.Zhou. Friction and wear behaviour of stainless steel rubbing against copper-impregnated metallized carbon. *Tribology international*, 42(6) :934–939, 2009.
- [102] Tao Ding, Wenjing Xuan, Qiudong He, Hao Wu, and Wei Xiong. Study on friction and wear properties of pantograph strip/copper contact wire for high-speed train. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 8(1) :125–128, apr 2014.
- [103] Guiming Mei. Impact of voltage on the electric sliding tribological properties of current collectors against overhead lines. *Wear*, 474-475 :203868, jun 2021.
- [104] Dejan Poljanec, Mitjan Kalin, and Ludvik Kumar. Influence of contact parameters on the tribological behaviour of various graphite/graphite sliding electrical contacts. *Wear*, 406-407 :75–83, jul 2018.
- [105] Mitjan Kalin and Dejan Poljanec. Influence of the contact parameters and several graphite materials on the tribological behaviour of graphite/copper two-disc electrical contacts. *Tribology International*, 126 :192–205, oct 2018.

- [106] W.Wang, A.Dong, G.Wu, G.Gao, L.Zhou, B.Wang, Y.Cui, D.Liu, D.Li, and T.Li. Study on characterization of electrical contact between pantograph and catenary. In IEEE, 2011.
- [107] Milenko Braunovic, Nikolai K. Myshkin, and Valery V. Konchits. Electrical Contacts. Taylor & Francis Ltd., December 2017.
- [108] Y.A. Wang, J.X. Li, Y. Yan, and L.J. Qiao. Effect of electrical current on tribological behavior of copper-impregnated metallized carbon against a cu–cr–zr alloy. Tribology International, 50 :26–34, jun 2012.
- [109] H Zhao, G.C Barber, and J Liu. Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current. Wear, 249(5-6) :409–414, jun 2001.
- [110] Giuseppe Bucca and Andrea Collina. Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire : A heuristic wear model. Tribology International, 92 :47–56, dec 2015.
- [111] Yanyan Zhang, Conghui Li, Xianjuan Pang, Chenfei Song, Feng Ni, and Yongzhen Zhang. Evolution processes of the tribological properties in pantograph/catenary system affected by dynamic contact force during current-carrying sliding. Wear, 477 :203809, jul 2021.
- [112] T. Ding, G.X. Chen, M.H. Zhu, W.H. Zhang, and Z.R. Zhou. Influence of the spring stiffness on friction and wear behaviours of stainless steel/copper-impregnated metallized carbon couple with electrical current. Wear, 267(5) :1080–1086, 2009. 17th International Conference on Wear of Materials.
- [113] Youcef Mouadji Abdeldjalil Benfoughal, Ali Bouchoucha. Effect of electrical current on friction and wear behavior of copper against graphite for low sliding speeds. U.P.B. scientific bulletin Series D Mechanical Engineering, 2018.
- [114] T.Ding, G.X.Chen, X.Wang, M.H.Zhu, W.H.Zhang, and W.X.Zhou. Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under ac passage at high speeds. Tribology International, 44 :437–444, 2011.
- [115] Yoshitaka Kubota. Relationship between wear profile of pantograph contact strip and arc discharge energy distribution. In 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. IEEE, oct 2018.
- [116] A.Turel, J.Slavic, and M.Boltezar. Electrical contact resistance and wear of a dynamically excited metal–graphite brush. Advances in Mechanical Engineering, 9, 2017.
- [117] S. Jia, P. Liu, Fengzhang Ren, B.-H Tian, M. Zheng, and G. Zhou. Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways. Wear, 262 :772–777, 03 2007.
- [118] E. Csapo, H. Zaidi, D. Paulmier, E.K. Kadiri, A. Bouchoucha, and F. Robert. Influence of the electrical current on the graphite surface in an electrical sliding contact. Surface and Coatings Technology, 76-77 :421–424, dec 1995.
- [119] A. Bouchoucha, S. Chekroud, and D. Paulmier. Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper–stainless steel. Applied Surface Science, 223(4) :330–342, 2004.
- [120] Mengzhe Jin, Man Hu, Hao Li, Yixuan Yang, Weidong Liu, Qingyuan Fang, and Shanghe Liu. Experimental study on the transient disturbance characteristics and influence factors of pantograph–catenary discharge. Energies, 15(16) :5959, aug 2022.
- [121] S.Kubo and K.Kato. Effect of arc discharge on wear rate of cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against cu trolley under electric current. Wear, 216 :172–178, 1997.
- [122] Yoshitaka Kubota, Sei Nagasaka, Toru Miyauchi, Chikara Yamashita, and Hideshi Kakishima. Sliding wear behavior of copper alloy impregnated c/c composites under an electrical current. Wear, 302(1-2) :1492–1498, apr 2013.
- [123] M El Mansori, D Paulmier, J Ginzler, and M Horvath. Lubrication mechanisms of a sliding contact by simultaneous action of electric current and magnetic field. Wear, 225-229 :1011–1016, 1999.
- [124] A. Bouchoucha, H. Zaidi, E.K. Kadiri, and D. Paulmier. Influence of electric fields on the tribological behaviour of electrodynamic copper/steel contacts. Wear, 203-204 :434–441, 1997. 11th International Conference on Wear of Materials.
- [125] E. Hounkponou, H. Nery, D. Paulmier, A. Bouchoucha, and H. Zaidi. Tribological behaviour of graphite/graphite and graphite/copper couples in sliding electrical contact : influence on the contact electric field on the surface passivation. Applied Surface Science, 70-71 :176–179, 1993.
- [126] Surajit Midya, Dierk Bormann, Anders Larsson, Thorsten Schutte, and Rajeev Thottappillil. Understanding pantograph arcing in electrified railways - influence of various parameters. In 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, aug 2008.

- [127] Surajit Midya, Dierk Bormann, Thorsten Schutte, and Rajeev Thottappillil. Pantograph arcing in electrified railways—mechanism and influence of various parameters—part i : With DC traction power supply. IEEE Transactions on Power Delivery, 24(4) :1931–1939, oct 2009.
- [128] Guiming Mei, Wenming Fu, Guangxiong Chen, and Weihua Zhang. Effect of high-density current on the wear of carbon sliders against cu–ag wires. Wear, 452-453 :203275, jul 2020.
- [129] Shunichi Kubo and Koji Kato. Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk. Tribology International, 32(7) :367–378, 1999.
- [130] Guangning Wu, Guoqiang Gao, Wenfu Wei, and Zefeng Yang. Friction and wear of pantograph and catenary. In The Electrical Contact of the Pantograph-Catenary System, pages 71–107. Springer Singapore, 2019.
- [131] Hongjuan Yang, Kai Wang, Yanhua Liu, Lin Fu, Xiaolu Cui, Gang Jiang, and Bo Hu. The formation of the delamination wear of the pure carbon strip and its influence on the friction and wear properties of the pantograph and catenary system. Wear, 454-455 :203343, 2020.
- [132] Hongjuan Yang, Chao Li, Yanhua Liu, Lin Fu, Gang Jiang, Xiaolu Cui, Bo Hu, and Kai Wang. Study on the delamination wear and its influence on the conductivity of the carbon contact strip in pantograph-catenary system under high-speed current-carrying condition. Wear, 477 :203823, 2021. 23rd International Conference on Wear of Materials.
- [133] Abdérafî Charkiand Denis Louvel, Eliane Renaot, André Michel, and Teodor Tiplica. Incertitudes de mesure - Tome I, Applications concrètes pour les étalonnages. PROfil, 2012.
- [134] E. N. Pinson M. D. McIlroy and B. A. Tague. Unix time-sharing system forward. The Bell System Technical Journal, 57(6) :4, 1987.
- [135] G. Garnaud. Determination thermogravimétrique des énergies d'activation de l'oxydation d'un métal présentant deux formes oxydées : Le cuivre. Journal of Thermal Analysis, 8(2) :279–287, oct 1975.
- [136] Jari Aromaa, Marko Kekkonen, Mehrdad Mousapour, Ari Jokilaakso, and Mari Lundström. The oxidation of copper in air at temperatures up to 100 °C. Corrosion and Materials Degradation, 2(4) :625–640, oct 2021.
- [137] M.R. Pinnel, H.G. Tompkins, and D.E. Heath. Oxidation of copper in controlled clean air and standard laboratory air at 50°C to 150°C. Applications of Surface Science, 2(4) :558–577, may 1979.
- [138] Z. Feng, C. R. Marks, and A. Barkatt. Oxidation of Metals, 60(5/6) :393–408, 2003.
- [139] Kouji Mimura, Jae-Won Lim, Minoru Isshiki, Yongfu Zhu, and Qing Jiang. Brief review of oxidation kinetics of copper at 350 °C to 1050 °C. Metallurgical and Materials Transactions A, 37(4) :1231–1237, apr 2006.
- [140] Víctor-Hugo Castrejón-Sánchez, Antonio Coyopol Solís, Roberto López, Cecilia Encarnación-Gomez, Francisco Morales Morales, Orlando Soriano Vargas, Jorge Edmundo Mastache-Mastache, and Gerardo Villa Sánchez. Thermal oxidation of copper over a broad temperature range : towards the formation of cupric oxide (CuO). Materials Research Express, 6(7) :075909, apr 2019.
- [141] N Cabrera and N F Mott. Theory of the oxidation of metals. Reports on Progress in Physics, 12(1) :163–184, jan 1949.
- [142] Linseis. The flash method - thermal diffusivity determination. <https://www.linseis.com/en/methods/flash-method/>.
- [143] S. Ragan and H. Marsh. Science and technology of graphite manufacture. Journal of Materials Science, 18(11) :3161–3176, nov 1983.
- [144] G. E. Bacon. A method for determining the degree of orientation of graphite. Journal of Applied Chemistry, 6(11) :477–481, may 2007.
- [145] Maurice Pillet. Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi. Editions d'Organisation, 1994.
- [146] G. Cardone, T. Astarita, and G. M. Carlomagno. Heat transfer measurements on a rotating disk. International Journal of Rotating Machinery, 3(1) :1–9, 1997.
- [147] Théo Kziazyk, Eric Gavignet, Pierre-Henri Cornuault, Philippe Baucour, and Didier Chamagne. Review on test benches studying sliding electrical contact and synthesis of experimental results. Energies, 16(3) :1294, jan 2023.
- [148] Theo Kziazyk, Eric Gavignet, Philippe Baucour, Adrien Pedron, Gerard Auditeau, and Didier Chamagne. Thermal study of an electrical sliding link representing a catenary pantograph system. In Fifth conference on railway technology : research, development and maintenance, 2022.



---

---

# ANNEXE A

---

## ÉTAPES SUIVIES SUR LE LOGICIEL GWYDDION

La figure A.1 contient un ensemble de captures d'écran décrivant les étapes réalisées pour mesurer le volume. Ces étapes sont ainsi détaillées en indiquant entre crochets les commandes utilisées sur le logiciel (en anglais) et les étapes suivies :

1. Une fois le fichier ouvert dans gwyddion (fig. A.1 (a)), la gamme des couleurs est concentrée sur les deux niveaux de hauteur (les deux surfaces de référence et la surface de frottement, voir fig. A.1 (b)). Cela permet d'avoir une meilleure visualisation de la qualité de la mesure. [`stretch color range to part of data` → `adaptive nonlinear color mapping` → OK].
2. Figure A.1 (c), un masque sélectionnant tous les points en-dessous d'une certaine hauteur est appliqué [`Data Process` → `Grains` → `Mark by Threshold` → réglage de la hauteur pour que seulement tous les points noirs soient en rose) → OK].
3. Figure A.1 (d), seuls les points se trouvant dans la surface du pion sont gardés [`Edit mask` → `Erase continuous parts of mask` → sélection du masque à l'extérieur du volume].
4. Figure A.1 (e), comme montré sur la figure 3.17 (a), les points noirs sont remplacés par une interpolation des points qui leurs sont adjacents [`Interpolate data under mask by solution of Laplace equation`].
5. Pour éviter les problématiques de contour, le volume est mesuré sur une fraction de la surface réelle. Intra-test, un cadrage est donc réalisé pour que les topographies aient la même taille et le même positionnement par rapport aux encoches [`crop`] → [`change physical dimensions, units, or value scale`].
6. Figure A.1 (f), les surfaces de référence sont utilisées pour faire un nivellement puis pour calculer le volume :
  - (a) Deux masques (rectangles roses) sont tracés sur les deux encoches pour établir le plan de référence [`Edit mask` → `Add selection to mask` → tracé d'un rectangle sur chaque encoche englobant une bonne partie de leur surface].
  - (b) Ces masques sont dupliqués sur toutes les autres topographies pour avoir la même taille et le même positionnement sur chaque encoche [`Distribute mask to other channels`].
  - (c) Les données sont nivelées à partir des masques, comme sur le tracé bleu foncé de la figure 3.17 (b) [`Level data by mean plane subtraction` → `Include only masked region` → OK].
  - (d) Le plan de référence est maintenant parallèle au zéro de la hauteur. Les deux masques tracés sur les encoches sont toujours visibles et une soustraction permettant de mettre le plan de référence au niveau zéro est faite sur l'ensemble de la surface (la hauteur moyenne du plan est alors nulle, comme sur le tracé rouge clair de la figure 3.17 (b) [`Data process` → `Level` → `Zero mean value` → `Include only masked region` → OK].



(e) Le volume est calculé pour aboutir au volume total par l'équation suivante :

$$V = V_{\text{partiel}} \cdot \frac{S_c}{S_{\text{partiel}}} \quad (\text{A.1})$$

avec  $V$  la mesure du volume total [ $\text{mm}^3$ ],  $V_{\text{partiel}}$  celle du volume partiel [ $\text{mm}^3$ ] sur la surface  $S_{\text{partiel}}$  [ $\text{mm}^2$ ] et  $S_c$  la surface de contact apparente [ $\text{mm}^2$ ].

[Statistical quantities → entrée d'une largeur de 3,5 mm et d'une longueur de 17,5 mm → centrage du rectangle sur la surface de contact du pion → Update → lecture de la valeur "Volume"].

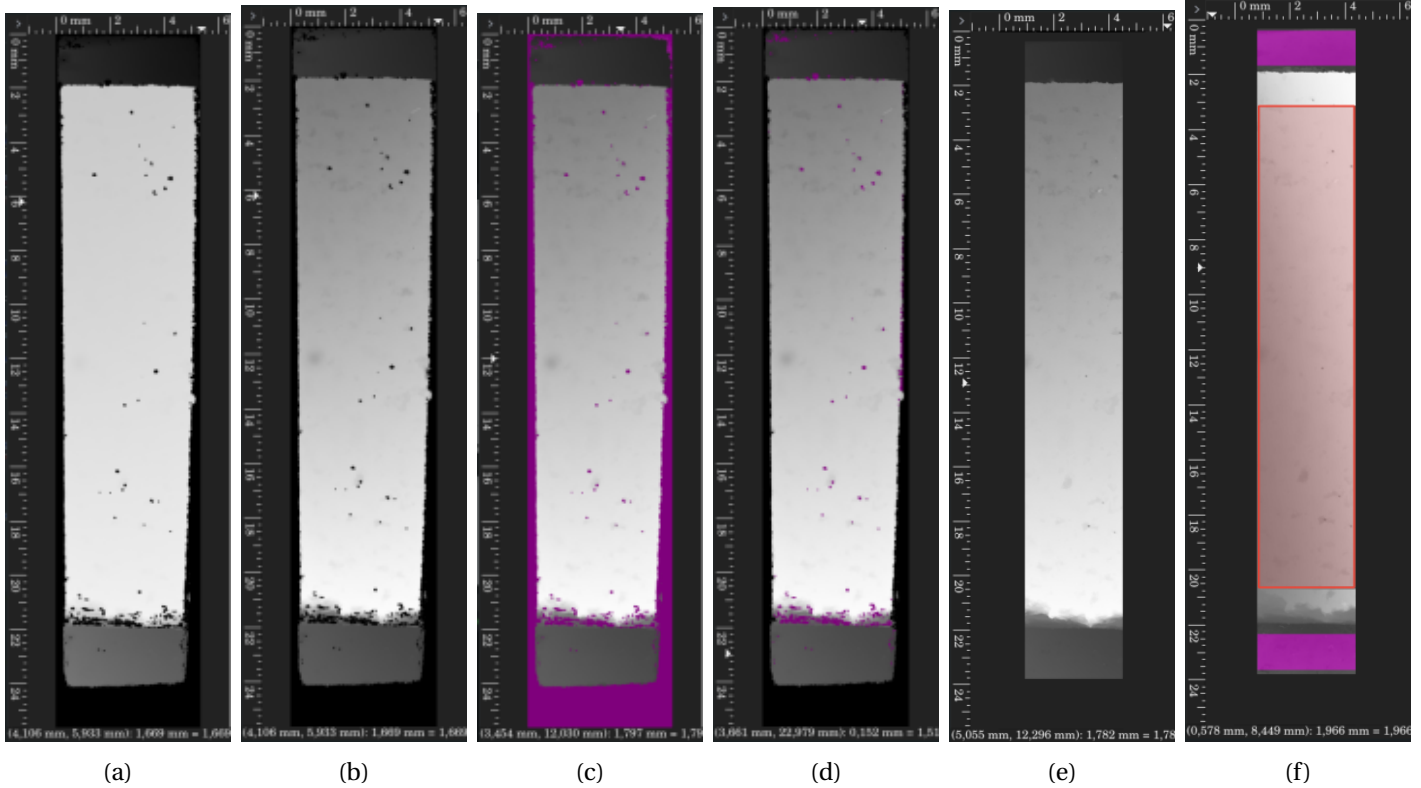


FIGURE A.1 – Captures d'écran des différentes étapes suivies pour mesurer les volumes : **(a)** visualisation brute, **(b)** mise à niveau des couleurs sur deux niveaux, **(c)** masque rose des points en-dessous d'un seuil, **(d)** suppression du masque extérieur, **(e)** rendu après interpolation des points noirs et cadrage **(f)** masques (roses) tracés sur chaque surface de référence, et rectangle (rouge) de mesure de volume tracé après nivellement.

---

---

## ANNEXE B

---

# RÉSULTATS D'USURES

Les figures suivantes sont les résultats du volume perdu en fonction de la distance parcourue, pour chaque configuration d'essai et chaque série. Dans chaque cas, une ligne pointillée représentant une régression linéaire est tracée. Ces résultats sont exploités dans la section 4.6.3.

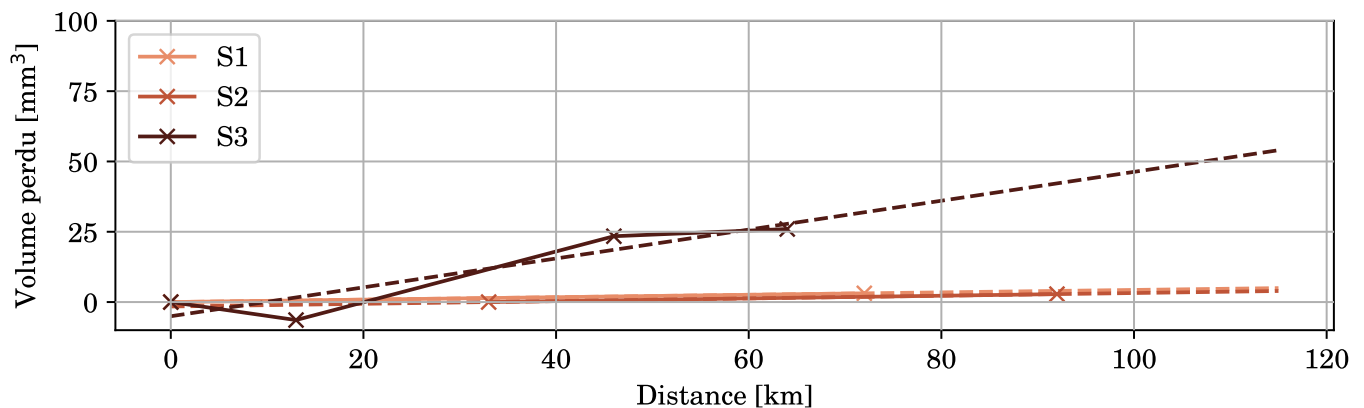


FIGURE B.1 – Test 1 :  $F_N=60$  N,  $I=60$  A,  $v_b=8$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=4$  N·mm<sup>-1</sup> et  $v_l=30$  km·h<sup>-1</sup>.

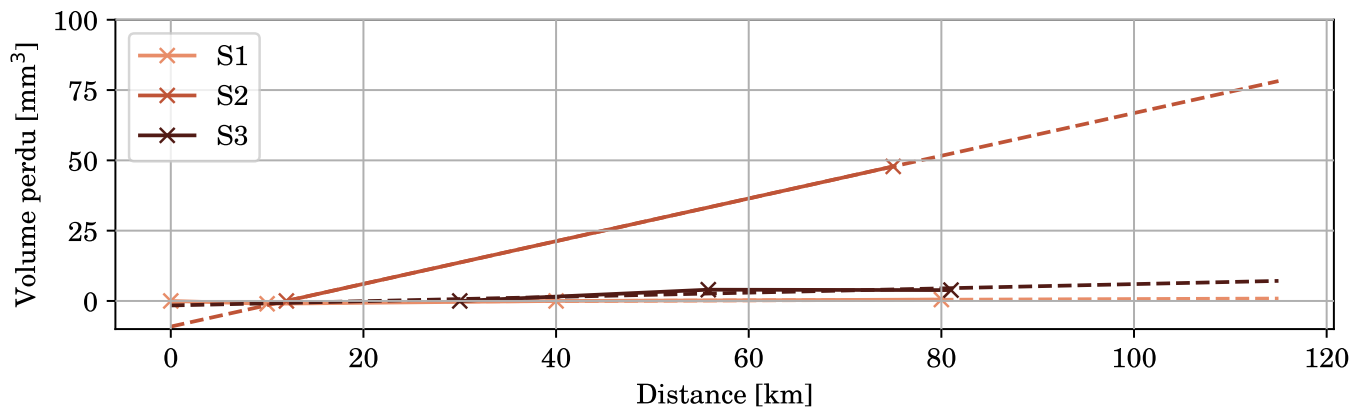


FIGURE B.2 – Test 2 :  $F_N=60$  N,  $I=60$  A,  $v_b=16$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=12$  N·mm<sup>-1</sup> et  $v_l=30$  km·h<sup>-1</sup>.

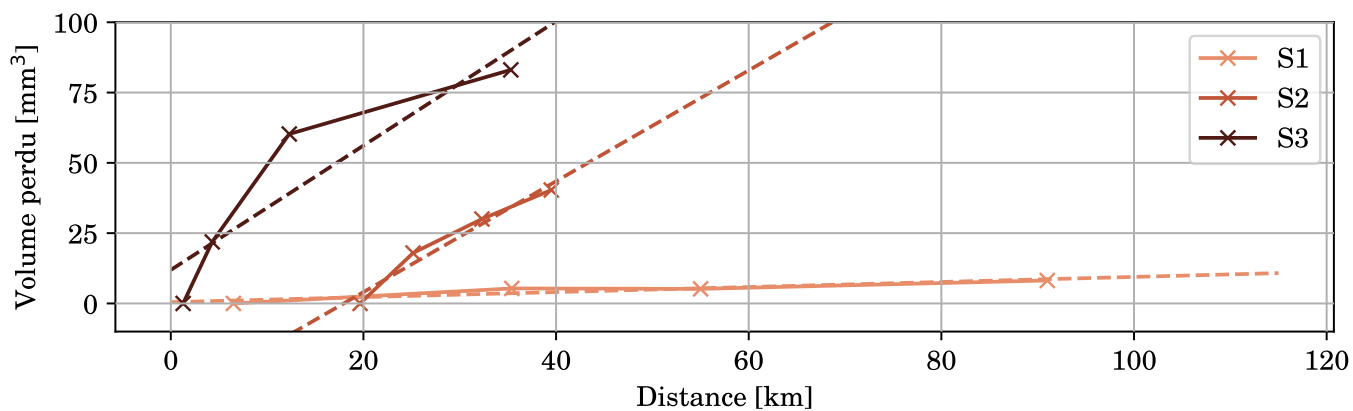


FIGURE B.3 – Test 3 :  $F_N=60$  N,  $I=120$  A,  $v_b=8$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=4$  N·mm<sup>-1</sup> et  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup>.

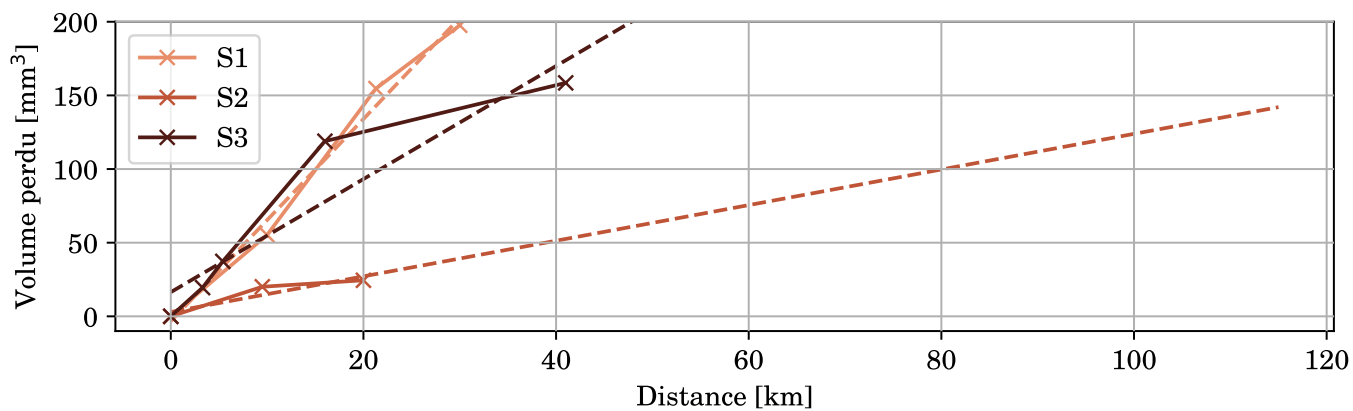


FIGURE B.4 – Test 4 :  $F_N=60$  N,  $I=120$  A,  $v_b=16$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=12$  N·mm<sup>-1</sup> et  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup>.

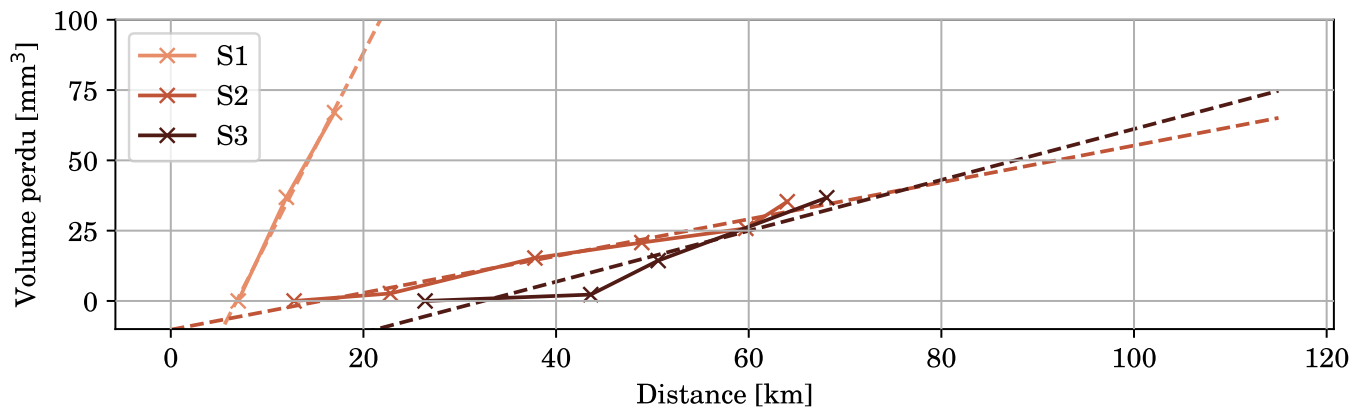


FIGURE B.5 – Test 5 :  $F_N=90$  N,  $I=60$  A,  $v_b=8$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=12$  N·mm<sup>-1</sup> et  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup>.

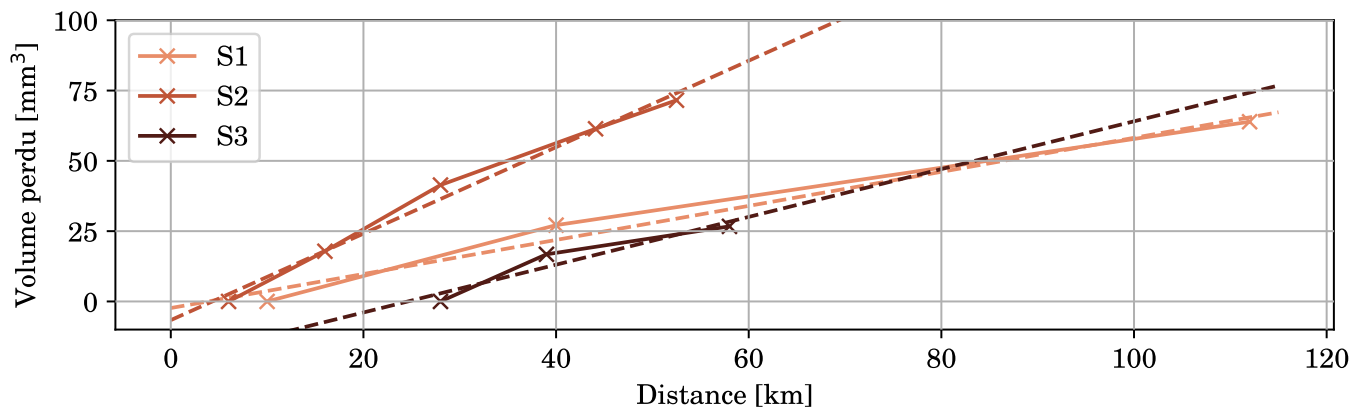


FIGURE B.6 – Test 6 :  $F_N=90$  N,  $I=60$  A,  $v_b=16$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=4$  N·mm<sup>-1</sup> et  $v_l=60$  km·h<sup>-1</sup>.

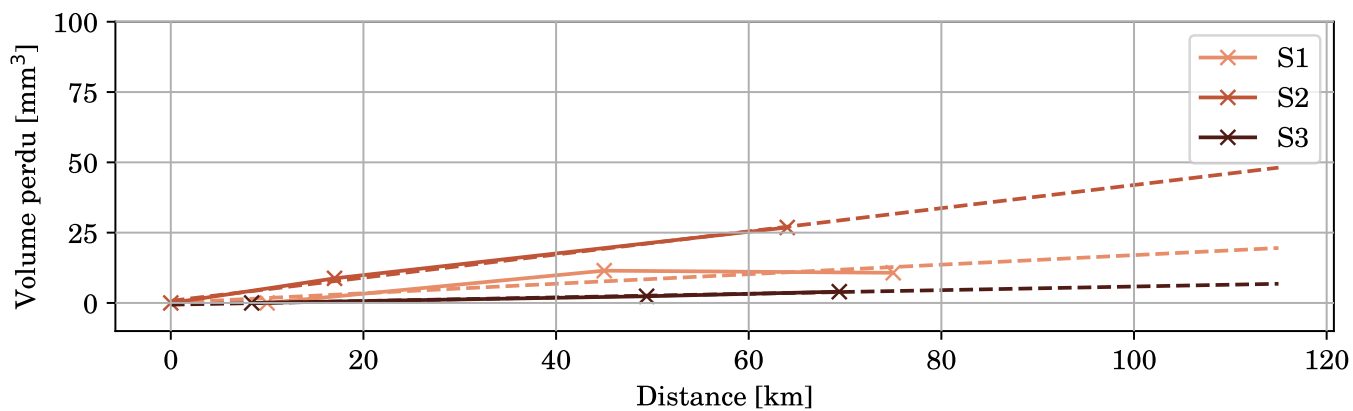


FIGURE B.7 – Test 7 :  $F_N=90$  N,  $I=120$  A,  $v_b=8$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=12$  N·mm<sup>-1</sup> et  $v_l=30$  km·h<sup>-1</sup>.

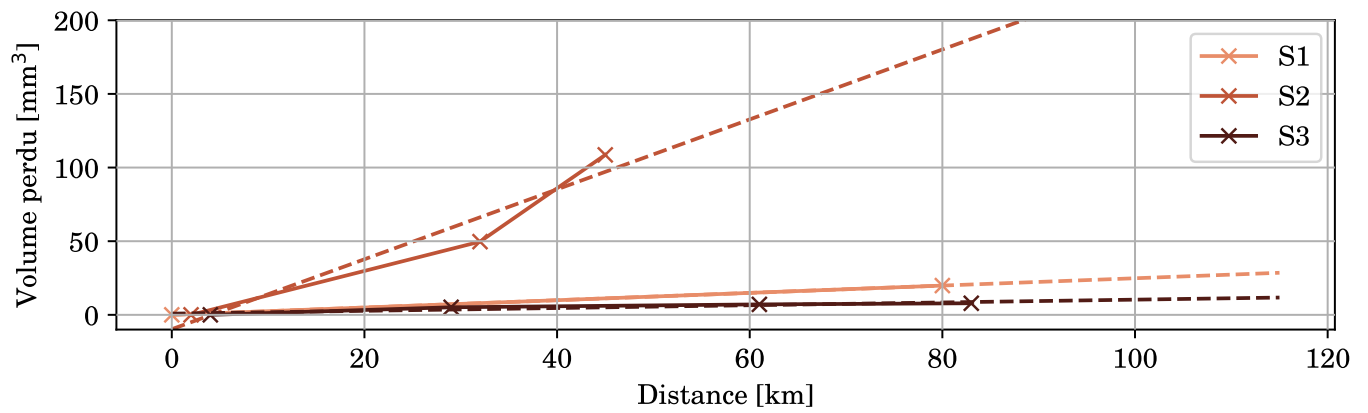


FIGURE B.8 – Test 8 :  $F_N=120$  N,  $I=120$  A,  $v_b=16$  mm·s<sup>-1</sup>,  $k=4$  N·mm<sup>-1</sup> et  $v_l=30$  km·h<sup>-1</sup>.