



HAL
open science

Caractérisation expérimentale du contact frottant disque garniture sous sollicitations sévères de freinage. Prise en compte des interactions tribologie, thermique et physico-chimie.

Anne Lise Bulthé

► **To cite this version:**

Anne Lise Bulthé. Caractérisation expérimentale du contact frottant disque garniture sous sollicitations sévères de freinage. Prise en compte des interactions tribologie, thermique et physico-chimie.. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Centrale de Lille; Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2006. Français. NNT: . tel-00161405

HAL Id: tel-00161405

<https://theses.hal.science/tel-00161405>

Submitted on 10 Jul 2007

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.

ECOLE CENTRALE DE LILLE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

THESE

présentée pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : Mécanique

par

Anne-Lise Bulthé

Caractérisation expérimentale du contact frottant disque
garniture sous sollicitations sévères de freinage.
Prise en compte des interactions tribologie, thermique et
physico-chimie

Doctorat délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Lille
et l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Soutenue le 29 novembre 2006 devant le jury constitué de :

Président

M. G. Béranger Professeur émérite - *Laboratoire Roberval, UTC*

Rapporteurs

M. E. Felder Professeur - *CEMEF, Ecole des Mines de Paris*

M. J.-P. Celis Professeur - *Department of Metallurgy and Material
Engineering, Katholieke Universiteit Leuven*

Directeurs

M. G. Degallaix Professeur - *L.M.L., Ecole Centrale de Lille*

M. Y. Desplanques Maître de conférence - *L.M.L., Ecole Centrale de Lille*

Examineurs

M. Y. Berthier Directeur de recherche - *LaMCoS, INSA Lyon*

M. J. Bertheau Ingénieur Frein Bogies - *Alstom Transport S.A.*

M. O. Martin Directeur Marketing - *Flertex S.A.*

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	3
INTRODUCTION GENERALE.....	5
CHAPITRE I. CONTEXTE DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE.....	7
I.1. Contexte industriel.....	9
I.2. Contexte scientifique.....	15
I.3. Méthodologie.....	22
I.4. Conclusion.....	34
CHAPITRE II. INFLUENCE DE LA DEGRADATION DU COMPOSITE ORGANIQUE SUR SON COMPORTEMENT EN ROTTEMENT.....	37
II.1. Dégradation en température du composite à matrice organique.....	39
II.2. Comportement en frottement du matériau au cours de sa dégradation.....	40
II.3. Comportement en frottement du matériau dégradé.....	49
II.3. Conclusions.....	57
CHAPITRE III. ETUDE DU CONTACT DISQUE GARNITURE SOUS SOLLICITATIONS SEVERES DE FREINAGE.....	61
III.1. Influence sur le contact d'une sollicitation sévère de type freinage d'arrêt isolé.....	63
III.2. Influence sur le contact d'une sollicitation sévère de type succession de freinages avec cumul	84
CHAPITRE IV. ANALYSE DES MECANISMES DE FROTTEMENT EN FREINAGE D'ARRET ISOLE A HAUTE ENERGIE.....	99
IV.1. Freinages interrompus : méthodologie pour l'analyse des mécanismes de frottement	101
IV.2. Formation et migration de la bande chaude.....	105
IV.3. Formation et expansion des points chauds.....	110
IV.4. Discussion et conclusions	117
CONCLUSION GENERALE.....	123
REFERENCES.....	127
ANNEXE A : Caractérisation du couple de matériaux étudié	133
ANNEXE B : Géométrie des éprouvettes.....	139

INTRODUCTION GENERALE

Les véhicules ferroviaires roulants sont en général équipés de plusieurs systèmes de freinage, dont le frein à friction, qui agissent conjointement pour assurer l'arrêt ou le ralentissement des trains. En cas de défaillance, le frein à friction constitue l'organe de sécurité devant à lui seul être capable d'assurer l'intégralité du freinage. Il est alors sollicité en mode dégradé. Dans une telle situation, il doit être capable d'arrêter le train en respectant une distance d'arrêt, puis d'assurer la fonction freinage au moins jusque la fin du parcours. D'autre part, dans un contexte de croissance du trafic urbain et d'augmentation des performances, le frein à friction est sollicité de manière de plus en plus sévère sur un parcours type métro, avec la réduction des durées interstations et l'augmentation du nombre de voyageurs (trains duplex à deux niveaux). De telles situations de fonctionnement peuvent conduire à des sollicitations sévères des organes de frein qui engendrent des températures élevées au contact. Les matériaux de friction sont alors utilisés à leurs limites de dégradation et une modification des phénomènes physiques mis en jeu au contact peut entraîner un phénomène de 'fade'. Le 'fade' est caractérisé par une chute du coefficient de frottement et une augmentation de l'usure engendrant des problèmes de sécurité et de coûts. L'objectif industriel de cette étude, améliorer les performances des systèmes de freinage, impose de mieux appréhender la durabilité des matériaux de frottement sous sollicitations sévères, ce qui passe par une meilleure compréhension des phénomènes physiques de frottement.

Les phénomènes physiques mis en jeu en freinage ont un caractère multiéchelle, des échelles macro du système et des composants jusqu'aux échelles micro voire nano du contact, et un caractère multiphysique, impliquant de nombreuses disciplines telles la tribologie, la science des matériaux, la thermique, la thermomécanique et la vibro-acoustique. La nature transitoire du freinage et les interactions entre les phénomènes physiques en complexifient l'étude. De nombreuses études ont été menées ces dernières années au Laboratoire de Mécanique de Lille qui s'est doté en 1998 d'un tribomètre de freinage capable de reproduire à l'échelle réduite les conditions de freinage rencontrées en service. Au sein du laboratoire, l'équipe Mécanique et Matériaux à l'Ecole Centrale de Lille s'est plus particulièrement impliqués dans l'étude tribologique du contact et le comportement des matériaux de friction. Les études déjà réalisées ont permis par une approche expérimentale la caractérisation du comportement de différents couples de matériaux utilisés en freinage ferroviaire et l'identification des mécanismes physiques de frottement associés. Ces études ont mis en évidence la présence d'un troisième corps évoluant dans le contact suivant un circuit tribologique caractérisé par la présence de plaques planes qui assurent la portance et contribuent à l'accommodation de vitesse, formées par compactage et cisaillement de lits de poudres circulant dans le contact et qui constituent l'essentiel des débits de troisième corps.

L'objectif scientifique de cette étude est ainsi l'extension de la compréhension des mécanismes physiques mis en jeu au contact aux cas de sollicitations sévères, en prenant en compte la nature transitoire du freinage, les phénomènes de localisation et les interactions entre tribologie, thermique et physico-chimie, en s'intéressant en particulier aux trois points suivants :

- caractérisation à l'échelle macro des phénomènes de localisation thermique et identification de leur influence sur le coefficient de frottement,
- corrélation à l'échelle locale de ces phénomènes aux mécanismes physiques de frottement,
- identification des conséquences de la dégradation du matériau composite organique avec la température sur le coefficient de frottement et les mécanismes physiques de frottement.

La stratégie adoptée a consisté à décomposer autant que possible les phénomènes, en complétant les essais de freinage par eux-mêmes par des essais de frottement sur un tribomètre couplé à un spectromètre, eux-mêmes complétés par une étude de la dégradation physicochimique avec la température du matériau composite organique.

Le présent mémoire est organisé en 4 chapitres :

- Le **Chapitre 1** présente le contexte de l'étude ainsi que la méthodologie mise en oeuvre. Le contexte industriel décrit l'application retenue, les sollicitations sévères correspondantes et le couple de matériaux étudié. Le contexte scientifique fait un point sur la tribologie à 3 corps telle qu'elle a été appliquée au freinage au sein du laboratoire, sur les travaux menés pour garantir la représentativité des freinages d'arrêt sur le tribomètre, et sur la dégradation avec la température des matériaux composites organiques utilisés en freinage. La méthodologie expérimentale mise en œuvre est ensuite définie selon les trois phases suivantes : étude de la dégradation du matériau composite avec la température ; essais de frottement continu pilotés en température ; essais de freinage sous sollicitations sévères, à savoir un freinage d'arrêt isolé à haute énergie et une succession de freinages d'arrêt à basse énergie avec cumul de chaleur.
- Le **Chapitre 2** traite de l'influence de la dégradation du matériau composite à matrice organique avec la température sur son comportement en frottement continu. Après une caractérisation de la dégradation du matériau par thermogravimétrie, les résultats d'essais sur tribomètre de frottement continu piloté en température sont analysés en termes de comportement tribologique et des mécanismes physiques de frottement,
- Le **Chapitre 3** présente l'étude du comportement du couple de matériaux sous les deux types de sollicitations sévères de freinage. Les évolutions du coefficient de frottement sont corrélées aux phénomènes de localisation thermique de surface observés par thermographie infrarouge pendant les essais et aux mécanismes physiques identifiés à partir d'observations et d'analyses des surfaces de frottement après freinage,
- Le **Chapitre 4** est une étude approfondie des mécanismes physiques de frottement activés pendant le freinage d'arrêt isolé à haute énergie, qui se révèle être la sollicitation la plus complexe d'un point de vue thermomécanique. Les interactions entre mécanismes physiques de frottement et phénomènes de localisation thermique sont étudiées par le biais de freinages interrompus avant l'arrêt, à des instants choisis de manière à rendre compte du caractère transitoire du freinage. Des observations in-situ en vidéo rapide et en thermographie infrarouge viennent compléter les observations et analyses des surfaces après essais.

Il est à noter que cette étude s'inscrit dans un programme scientifique du Groupement Régional pour la Recherche dans les Transports (GRRT) soutenu par la Région Nord - Pas de Calais et a fait l'objet d'une convention de thèse CIFRE entre la société ALSTOM Transport et l'Ecole Centrale de Lille. Le projet scientifique a été mené dans le cadre d'un partenariat entre le Laboratoire de Mécanique de Lille au sein de l'Ecole Centrale de Lille, la société ALSTOM Transport (Unité du Creusot) et le Laboratoire de Mécanique et Energétique de Valenciennes (LME, UVHC) ainsi qu'en association avec le Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides (LaMCoS, INSA de Lyon). Il a été soutenu financièrement par le FEDER et la Région Nord - Pas de Calais.

CHAPITRE I. CONTEXTE DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

I.1. Contexte industriel.....	9
I.1.1. Application choisie : le Z-TER.....	9
I.1.2. Définition des sollicitations sévères	10
I.1.3. Couple de matériaux étudié	11
I.2. Contexte scientifique	15
I.2.1. Tribologie à 3 corps appliquée au freinage	16
I.2.2. Représentativité de freinages d'arrêt réalisés à l'échelle réduite.....	18
I.2.3. Dégradation en température des constituants du matériau composite	20
I.3. Méthodologie	22
I.3.1. Essais de frottement continu pilotés en température.....	23
I.3.2. Essais de freinage sous sollicitations sévères	26
I.4. Conclusions	34

Ce premier chapitre traite du contexte de l'étude du point de vue industriel et du point de vue scientifique et présente la méthodologie mise en œuvre au cours de cette étude. Dans la première partie, le problème industriel à la base de cette étude est présenté : il s'agit, dans le contexte du frein à friction ferroviaire, de l'apparition de la perte d'efficacité et de l'augmentation de l'usure sous les températures élevées provoquées par des sollicitations sévères au contact disque garniture. Ces problèmes sont généralement attribués à la dégradation en température du matériau utilisé pour la garniture. Le contexte industriel est présenté au travers du choix de l'application, de la définition des sollicitations sévères en service et du couple de matériaux étudié. La seconde partie introduit le contexte scientifique dans lequel cette étude est réalisée : la tribologie à 3 corps appliquée au freinage sur laquelle notre équipe travaille et les compétences développées au sein du laboratoire pour la reproduction à l'échelle réduite de freinages rencontrés en service. Une étude bibliographique du comportement en température des constituants de la garniture est réalisée et aussi présentée dans cette partie. Dans la troisième partie, la méthodologie mise en œuvre est présentée. Dans un premier temps, des essais de frottement continu pilotés en température avec l'analyse des dégagements gazeux au contact par spectrométrie de masse sont définis et réalisés sur le tribomètre « Lorient » du LaMCoS de l'INSA de Lyon. Ces essais ont pour objectif d'étudier l'influence sur le comportement en frottement de la dégradation du matériau composite avec la température. Ces essais sont précédés d'une analyse préliminaire de la dégradation du matériau composite en température par thermogravimétrie. Dans un second temps, des essais de freinage sont réalisés sur le tribomètre de freinage du L.M.L. : un essai de freinage d'arrêt d'urgence et une succession de freinages d'arrêt rapprochés avec cumul de chaleur. L'objectif est ici d'identifier les mécanismes physiques de frottement activés au contact sous sollicitations de freinage sévères.

I.1. Contexte industriel

D'un point de vue industriel, cette étude est orientée sur le freinage mécanique à friction et plus particulièrement sur le comportement d'un couple de matériaux lorsque celui-ci est soumis à des sollicitations sévères de contact disque-garniture. Ce travail doit permettre la compréhension de phénomènes apparaissant aux températures élevées qui sont la conséquence des sollicitations sévères : une baisse du coefficient de frottement et une augmentation de l'usure. Dans cette première partie, nous verrons quelle application a été choisie en partenariat avec Alstom Transport pour cette étude, comment sont définies les sollicitations sévères pour cette application et, enfin, sur quel couple de matériaux utilisé en service va porter notre travail.

I.1.1. Application choisie : le Z-TER

L'application choisie dans cette étude est une automotrice utilisée sur le réseau SNCF des Trains Express Régionaux : le Z-TER ou Z21500 (Figure I-1).



Figure I-1 : Automotrice Z-TER

Une soixantaine de rames sont en service en France depuis mai 2002. Chaque rame se compose de deux motrices et d'une remorque. En ce qui concerne les systèmes de freinage, les motrices et la remorque possèdent des freins mécaniques à friction alors que seules les motrices sont équipées de freins dynamiques électrodynamiques rhéostatiques et à récupération. En cas de défaillance des freins dynamiques, le frein mécanique à friction doit être capable d'assurer à lui seul le freinage et permettre l'arrêt de la rame. Sur les 2 bogies des motrices, composés d'un essieu moteur et d'un essieu porteur, les freins à friction sont constitués de garnitures en matériau composite frottant sur 2 disques en acier ventilés pour les essieux moteur et sur 3 disques en fonte ventilés pour les essieux porteur. Sur les 2 bogies de la remorque, composés de 2 essieux porteur, chaque essieu porteur est équipé de garnitures en matériau composite frottant sur 3 disques en fonte ventilés.

Le Tableau I-1 présente les données d'exploitation du Z-TER nécessaire à notre étude.

Vitesse d'exploitation maximale	200 km.h ⁻¹
Pression apparente	0,65 MPa
Masse à freiner par disque	4500 kg
Décélération	1 m.s ⁻¹
Diamètre de la roue	0,885 m
Diamètre du disque	0,61 m
Rayon moyen de frottement	0,235 m
Surface de la garniture par disque	0,4134 m ²

Tableau I-1 : Données d'exploitation du Z-TER

I.1.2. Définition des sollicitations sévères

Pour le Z-TER, les sollicitations sévères correspondent à des conditions d'exploitation dégradées qui sont définies d'une part par le fait que le frein mécanique à friction doit assurer seul le freinage, et d'autre part, par une masse à freiner doublée. Ces conditions dégradées conduisent à des niveaux de température élevés au contact disque-garniture. Deux types de freinage rencontrés en service sont étudiés en conditions dégradées : un freinage d'arrêt d'urgence et une succession de freinages rapprochés.

I.1.2.1. Freinage d'arrêt d'urgence

Le freinage d'arrêt d'urgence est défini comme étant le freinage du Z-TER à 160 km.h⁻¹ en conditions dégradées. La Figure I-2 présente l'évolution de la vitesse de la rame ainsi que l'évolution de la température de surface du disque simulée sur un modèle développé par Alstom Transport. Après la montée en vitesse de l'arrêt à la vitesse maximale de 160 km.h⁻¹, la température s'élève au cours de la phase de freinage (t = 71 à 115 s) jusqu'à une valeur maximale de 260°C atteinte à t = 100 s. Après le freinage, la rame reste à l'arrêt puis redémarre et sa vitesse croît pour atteindre 160 km.h⁻¹ avant le freinage suivant ; au cours de cette phase la température diminue plus ou moins rapidement en fonction de la vitesse de la rame influant sur le refroidissement par convection.

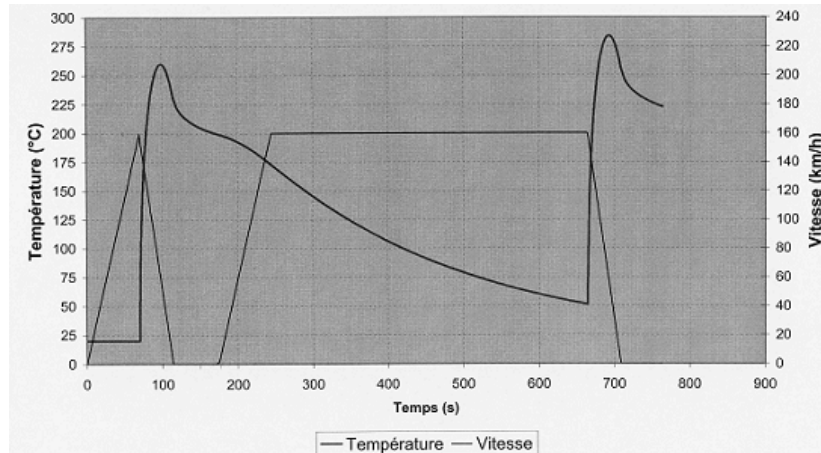


Figure I-2 : Evolutions de la vitesse et de la température de surface du disque en conditions d'exploitation dégradées pour un freinage d'arrêt d'urgence (simulation Alstom Transport)

I.1.2.2. Succession de freinages rapprochés

La succession de freinages rapprochés est définie comme une succession de 20 freinages pour une rame à 80 km.h⁻¹, deux freinages successifs étant séparés de 130 s. La Figure I-3 présente les évolutions de la vitesse de la rame et de la température de surface du disque simulées par le modèle d'Alstom Transport. Le temps entre les deux premiers freinages ne permet pas le refroidissement du disque jusque la température initiale de 20°C et entraîne une élévation des températures maximales atteintes au cours des freinages de 100°C pour le premier freinage à 142°C pour le second. Au cours de la succession des 20 freinages, ce cumul de chaleur conduit à la température maximale de 300°C lors du dernier freinage.

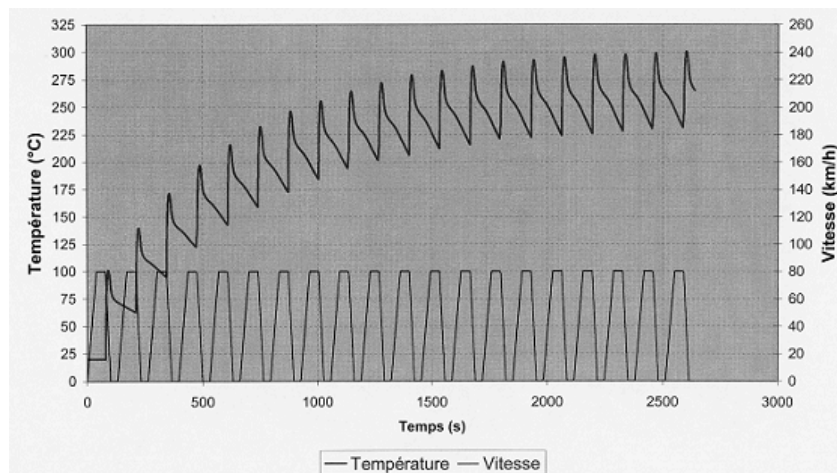


Figure I-3 : Evolutions de la vitesse et de la température de surface du disque en conditions d'exploitation dégradées pour une succession de freinages rapprochés (simulation Alstom Transport)

I.1.3. Couple de matériaux étudié

Le Z-TER présente dans ses systèmes de frein à friction deux couples de matériaux selon que l'essieu est porteur ou moteur. La présente étude s'est focalisée sur le couple de matériaux utilisé sur les essieux porteur composé d'un matériau composite à matrice organique pour la garniture et d'une fonte à graphite lamellaire pour le disque.

I.1.3.1. Matériau composite à matrice organique

I.1.3.1.a. Composition et microstructure

Un matériau de friction composite à matrice organique conçu pour des applications de type freinage ferroviaire est typiquement composé :

- de fibres qui donnent au matériau ses propriétés mécaniques, thermiques et tribologiques [Satapathy 2004, Jang 2004, Ho 2005],
- de particules qui améliorent le coefficient de frottement en l'augmentant (particules abrasives) et en le stabilisant (lubrifiants solides), qui modifient les propriétés thermiques et qui limitent l'usure [Kato 2003],
- d'une matrice qui assure la cohésion de l'ensemble.

La composition simplifiée du matériau étudié a été fournie par le fabricant (Tableau I-2). Dans une matrice en résine phénolique, des fibres et des particules sont présentes respectivement pour 32,5 et 35,5 % du volume total. Les fibres sont de trois natures différentes : minérales, métalliques et organiques. Les particules présentes dans le matériau sont également de trois natures : lubrifiants solides, abrasifs et particules métalliques.

Forme	Nature	Vol. (%)
Fibre	Minérale	20
	Métallique	8,5
	Organique	4
Particule	Lubrifiant solide	18
	Abrasive	12
	Métallique	5,5
Matrice	Résine phénolique	32

Tableau I-2 : Composition simplifiée du matériau composite à matrice organique

Afin de déterminer la composition des différents constituants du matériau composite, un échantillon poli a été observé en microscopie électronique à balayage (MEB) et analysé par spectroscopie à énergie dispersive (EDS). Les résultats de ces analyses, présentés dans leur intégralité en Annexe A, ont permis de montrer que :

- les fibres minérales sont formées de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), de chaux (CaO) et de magnésie (MgO) (longueur maximale de 300 μm),
- les fibres métalliques sont constituées d'acier contenant une faible quantité de Mn (longueur comprise entre 100 à 300 μm),
- les particules de lubrifiants solides sont d'une part, sous forme de stibnite (Sb_2S_3) et de molybdénite (MoS_2) et, d'autre part, sous forme de graphite,
- les particules abrasives sont des particules minérales sphériques (d'un diamètre maximal de 400 μm) de la même composition que les fibres minérales,
- les particules métalliques sont en laiton (formes découpées pour des tailles variables pouvant dépasser 1 mm), en cuivre (sous forme de sphères ou de particules plus allongées d'une taille moyenne de 100 μm) et en étain (particules de faible taille de l'ordre d'une vingtaine de μm).

Les fibres organiques n'ont pas été identifiées aux cours de analyses mais leur nature est connue, il s'agit de fibres d'aramide. La nature de la résine a été fournie par le fabricant : il s'agit

d'une résine phénolique novolaque produite par réaction du phénol avec le formaldéhyde en milieu aqueux acide.

La Figure I-4 présente une observation au MEB réalisée en électrons rétrodiffusés : les nuances de gris du plus clair au plus foncé correspondent aux éléments des plus lourds aux plus légers. La figure montre l'hétérogénéité du matériau avec une répartition non-homogène des constituants. Cette observation au MEB est complétée par l'indication de la nature des constituants du matériau.

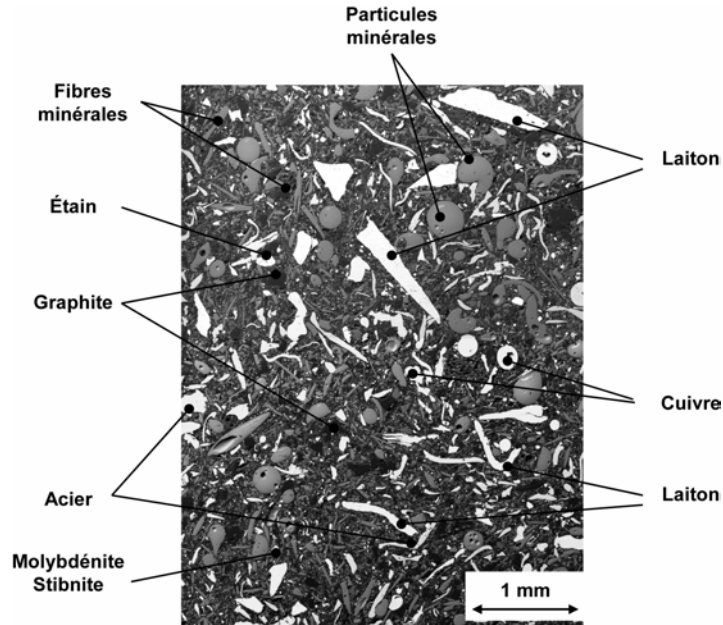


Figure I-4 : Observation des différents constituants du matériau composite à matrice organique au MEB en électrons rétrodiffusés

I.1.3.1.b. Propriétés

Quelques propriétés du matériau composite à matrice organique sont présentées dans le Tableau I-3. Ces données ont été fournies par le fabricant ou mesurées spécifiquement au cours de différentes études menées au laboratoire [Dufrénoy 1995].

	à 20°C	à 250°C
Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2500	2300
Capacité thermique massique ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	500	450
Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	12	10
Effusivité ($\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$)	3872	3217
Module d'Young (MPa)	3000	2200

Tableau I-3 : Propriétés du matériau composite à matrice organique

I.1.3.2. Fonte à graphite lamellaire

I.1.3.2.a. Composition chimique

Deux techniques d'analyse complémentaires ont été utilisées pour déterminer la composition de la fonte à graphite lamellaire étudiée : la spectroscopie à décharge lumineuse et l'analyse par

combustion. Les résultats complets de ces analyses menées dans le laboratoire de la fonderie de la Française de Mécanique sont présentés en Annexe A. La composition élémentaire de la fonte à graphite lamellaire étudiée est donnée dans le Tableau I-4.

Symbole	Composition (%)
Fe	92,41
C	3,41
Si	2,23
Mn	0,68
Cu	0,62
Cr	0,37
S	0,13
Ni	0,06
P	0,04
Ti	0,02
Mo	0,02

Tableau I-4 : Composition de la fonte à graphite lamellaire en % massique

I.1.3.2.b. Microstructure

La préparation de l'échantillon pour l'observation des particules de graphite se compose de polissages métallographiques successifs jusqu'au grade 3 μm et d'un rinçage final à l'eau déminéralisée. Les normes utilisées pour la détermination de la forme, de la répartition et de la dimension des particules de graphite sont les normes AFNOR NF A 32-100 (Association Française de Normalisation) et ISO 945 (Organisation Internationale de Normalisation).

L'observation micrographique révèle la Forme I, i.e. sous forme de lamelles, des particules de graphite (Figure I-5a). La répartition des lamelles se fait sans orientation préférentielle. Cependant, des lamelles de graphite en rosettes sont observables, traduisant l'utilisation d'inoculant (Figure I-5b). Les lamelles sont de dimension 3 à 4, ce qui correspond à une dimension maximale de 0,12 à 0,5 mm.

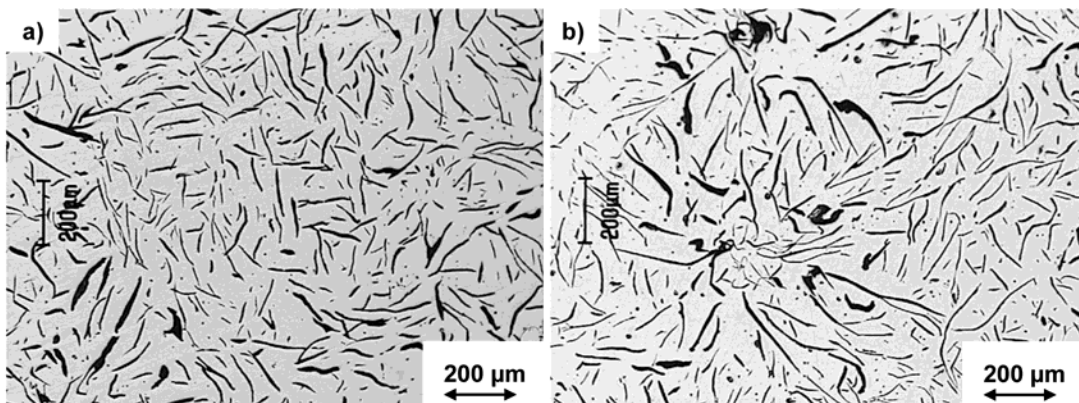


Figure I-5 : a) Observation des lamelles de graphite de la fonte, b) Orientation en rosette de lamelles

L'observation de la microstructure nécessite une attaque chimique de l'échantillon, celle-ci a été réalisée au Nital à 4%. L'attaque révèle une microstructure à majorité perlitique. La perlite se

présente sous la forme de couches alternées de ferrite (en blanc) et de cémentite (en noir) (Figure I-6a) qui lui confèrent une grande résistance mécanique. Une faible quantité de ferrite est présente au sein de la matrice perlitique. La ferrite est concentrée au voisinage des lamelles de graphite au cœur des rosettes (Figure I-6b). Des inclusions de sulfures de manganèse et d'eutectique phosphoreux sont également observées.

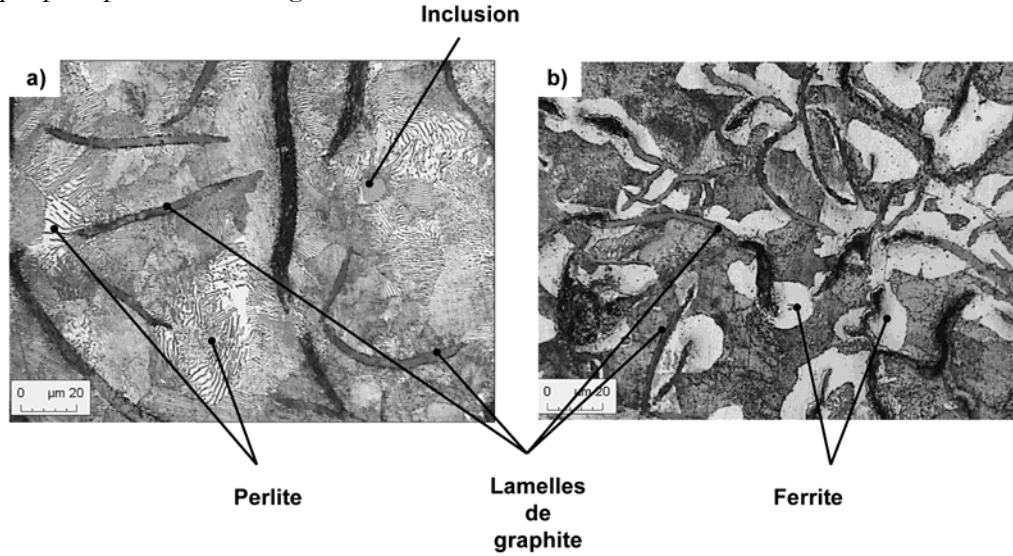


Figure I-6 : a) Perlite et lamelles de graphite de la fonte, b) Ferrite au voisinage des lamelles de graphite

I.1.3.2.c. Propriétés

Le Tableau I-5 présente quelques propriétés de la fonte GL à matrice perlito-ferritique à 20 et à 250°C [EMS 1991, MFM 1983].

	à 20°C	à 250°C
Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7340	7200
Capacité thermique massique ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	438,7	471,8
Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	46,5	44,2
Effusivité ($\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$)	12236	12253
Module d'Young (MPa)	3000	2200

Tableau I-5 : Propriétés de la fonte GL à matrice perlito-ferritique à 20 et à 250°C

Cette première partie a permis de poser le problème industriel à l'origine de cette étude : sous sollicitations sévères, conduisant à des températures élevées, le coefficient de frottement chute et l'usure augmente, ces problèmes étant souvent attribués à la dégradation du matériau composite de la garniture avec la température. En collaboration avec notre partenaire industriel, le Z-TER a été choisi comme objet de notre étude. Pour cette application, les conditions d'exploitation sont connues, les sollicitations sévères ont été définies et le couple de matériaux choisi pour cette étude a fait l'objet de diverses analyses.

I.2. Contexte scientifique

D'un point de vue scientifique, ce travail se place dans le cadre de recherches menées au sein du Laboratoire de Mécanique de Lille dans le domaine du freinage et plus particulièrement à la suite de travaux sur l'étude des mécanismes de frottement et d'usure menés au sein de l'Equipe

Mécanique et Matériaux de l'Ecole Centrale de Lille. Les conditions de freinage sont reproduites en laboratoire sur un tribomètre de freinage à échelle réduite. Dans un premier temps, cette partie présente la tribologie à 3 corps sur laquelle nos travaux sont basés ainsi que les résultats obtenus au cours de précédents travaux. Dans un second temps, la règle de changement d'échelle permettant la représentativité d'essais de freinage sur le tribomètre par rapport aux freinages rencontrés en service est présentée. Enfin, la chute du coefficient de frottement et l'augmentation de l'usure étant attribuées au comportement du matériau composite à matrice organique en température, des éléments de bibliographie sur le comportement en température de ce matériau et de ses constituants sont présentés.

I.2.1. Tribologie à 3 corps appliquée au freinage

L'approche adoptée au sein de notre équipe pour l'analyse des mécanismes physiques de frottement et d'usure repose sur le concept de tribologie à 3 corps. Ce concept, introduit dans les années 70 par Maurice Godet [Godet 1984] puis développé par Yves Berthier [Berthier 1996 et 2001], met en jeu un troisième corps formé entre les deux premiers corps que constituent dans notre cas le disque et la garniture. Ce troisième corps prend un sens matériau et un sens cinématique (Figure I-7a). Au sens matériau, le troisième corps assure la continuité matérielle entre les deux premiers corps tout en présentant une composition qui lui est propre. Au sens cinématique, le troisième corps assure l'accommodation de vitesse entre les deux premiers corps. Le troisième corps et les deux premiers corps constituent, accompagnés du mécanisme assurant le frottement, le triplet tribologique qui doit être considéré lors de l'étude de tout phénomène tribologique. En parallèle, la notion de circuit tribologique (Figure I-7b) a été introduite en définissant les débits de troisième corps mis en jeu au contact : le débit source (1), le débit interne (2), le débit de recirculation (3) et le débit d'usure (4) [Descartes 2002].

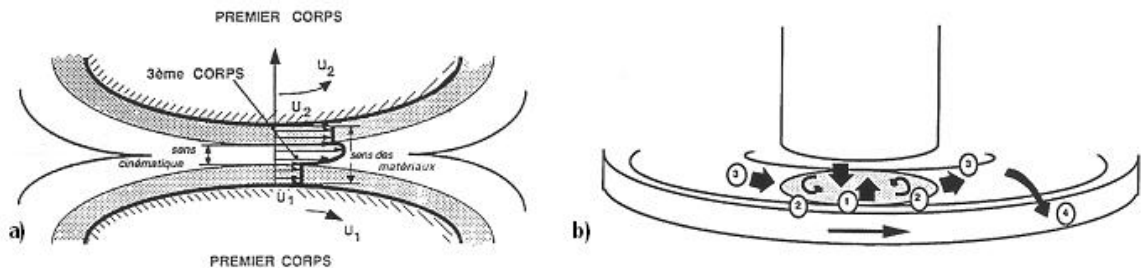


Figure I-7 : a) Contact à 3 corps, b) Circuit tribologique et débits de troisième corps : (1) débit source, (2) débit interne, (3) débit de recirculation, (4) débit d'usure [Berthier 1988]

Afin de reconstituer ce circuit tribologique pour l'application freinage, des observations des surfaces frottantes après essais ont été réalisées (Figure I-8). Ces observations montrent un troisième corps composé de lit de poudre (Figure I-8a) et de plaques planes (Figure I-8b). Les lits de poudre, piégés dans le contact le long des fibres arasées par le frottement (Figure I-8c), s'accumulent et se compactent pour former des plaques planes. Alimentées continuellement par le lit de poudre, les plaques s'étendent et peuvent par coalescence atteindre plusieurs centaines de micromètres. Suite au déchaussement des fibres contre lesquelles les plaques sont formées ou par fragmentation (Figure I-8e), les plaques sont détruites et réalimentent le lit de poudre recirculant en surface.

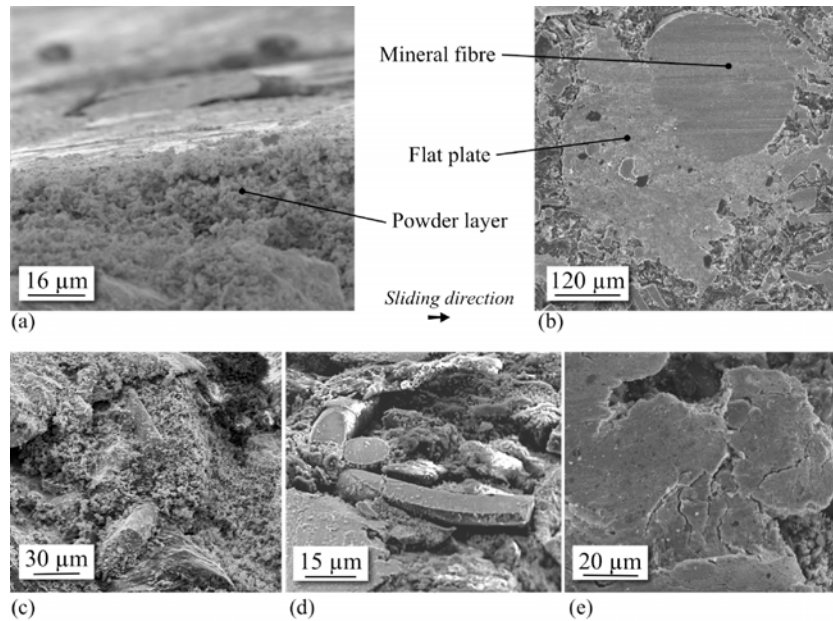


Figure I-8 : Observation de la surface d'un échantillon de matériau composite à matrice organique après essai de freinage : a) lit de poudres, b) plaque plane, c) accumulation de particules, d) fibres arasées, e) fragmentation d'une plaque plane [Desplanques 2006c]

Le circuit tribologique a été appliqué au freinage automobile par Eriksson et al. [Eriksson 1999, 2000, 2002] et au freinage ferroviaire par notre équipe [Roussette 2001, 2003, 2005] [Desplanques 2003, 2004]. Ce circuit tribologique ainsi que les mécanismes physiques mis en jeu pendant le freinage sont schématisés dans le cas d'un matériau composite à matrice organique en Figure I-9.

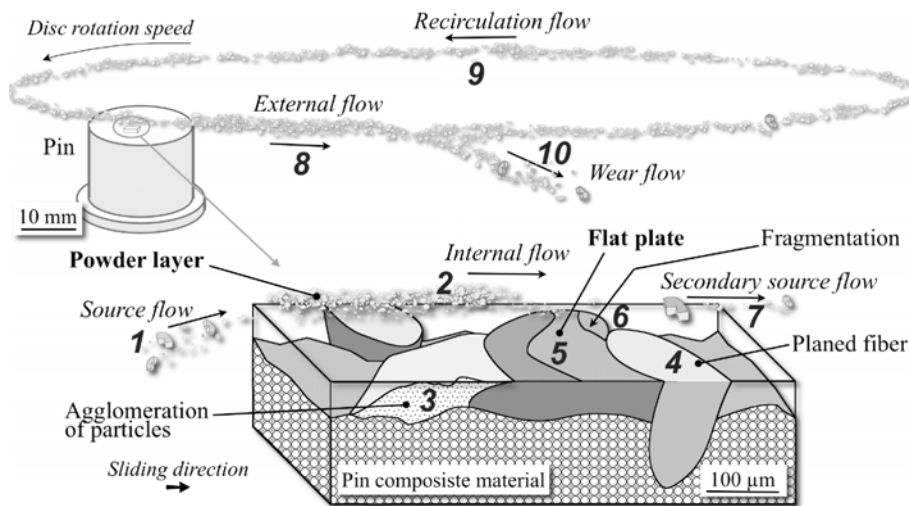


Figure I-9 : Schématisation du circuit tribologique en freinage [Desplanques 2006c]

Le débit source constitué de particules détachées du disque et du pion constitue le débit source primaire du troisième corps (1). Les particules qui circulent dans le contact constituent le débit interne (2). Les particules vont s'organiser de manière différente pour se présenter soit sous forme de lit de poudre soit s'accumuler en amont de fibre (4) puis se compacter (3) pour conduire à la formation de plaques planes (5). Ce sont ces plaques planes qui participent à la transmission de la charge et à l'accommodation de vitesse entre le disque et le pion. La

sollicitation mécanique que subissent les plaques peut conduire à leur fragmentation (6) et les débris ainsi formés constituent un débit source secondaire (7) réintroduit dans le circuit tribologique. Les particules entraînées par le disque constituent le débit externe (8) des particules quittant le contact le temps d'une rotation (débit de recirculation 9) ou définitivement (débit d'usure 10). Ces résultats ont été obtenus à partir d'observations menées sur la garniture après essais de freinage pour un couple acier-matériau composite. Le circuit tribologique et plus particulièrement la notion de plaques planes ont été repris dans plusieurs études [Osterle 2001, 2004, 2006 ; Filip 2002, Ostermeyer 2003].

Au sein du Laboratoire de Mécanique de Lille, l'équipe de Philippe Dufrénoy travaille quand à elle sur les aspects thermomécaniques du freinage [Dufrénoy 1995, Panier 2004]. Les phénomènes de localisation thermiques de type bande chaude ou points chauds ont été observés au cours d'essais sur banc échelle 1 et il a été montré que leur apparition résulte des déformations thermomécaniques du disque et de la garniture sous l'effet des gradients thermiques. Les premiers couplages d'observations par thermographie infrarouge de la surface du disque pendant le freinage et d'observations menées sur la garniture après des essais interrompus à différents instants du freinage ont permis à notre équipe de mettre en évidence une corrélation entre localisation thermique et mécanismes physiques de frottement dans le cas de la bande chaude [Roussette 2005].

L'objectif scientifique de ce travail est l'étude de l'influence des deux types de sollicitations sévères sur le circuit tribologique tel qu'il est connu actuellement et notamment l'approfondissement des connaissances sur la corrélation entre phénomènes de localisation thermique et mécanismes physiques de frottement.

I.2.2. Représentativité de freinages d'arrêt réalisés à l'échelle réduite

La représentativité des essais de freinage à échelle réduite vis-à-vis de l'échelle 1 est un point important de la démarche expérimentale développée au sein de l'Equipe Mécanique et Matériaux du LML sur le tribomètre de freinage. Elle a fait l'objet de plusieurs études, plus particulièrement en ce qui concerne l'élévation de la température induite par la puissance et l'énergie dissipées par frottement [Copin 2000, Desplanques 2001, Roussette 2003, Desplanques 2006a]. Ainsi, dans le cas d'un freinage d'arrêt isolé, une règle de similitude a été définie liant l'énergie dissipée à l'échelle 1 Q et celle dissipée à l'échelle réduite q par les relations suivantes :

$$\frac{Q}{q} = \frac{S_g}{s_g} = \frac{S_d}{s_d} \quad (1)$$

avec S_g et S_d ainsi que s_g et s_d les surfaces frottante du patin et frottée du disque respectivement pour l'échelle 1 et l'échelle réduite. Toutefois, le respect de ces rapports entre les surfaces frottantes et frottées aux deux échelles impose à l'échelle réduite, soit une surface frottante importante non compatible les objectifs et moyens d'une étude de laboratoire, soit un rayon de frottement faible entraînant des fréquences de rotation élevées, ce qui conduit entre autre, à des gradients de vitesse de glissement importants dans le contact. Ces configurations n'étant pas acceptables, une règle de changement d'échelle a été développée. Elle repose sur le modèle de Newcomb [Newcomb 1995a, 1995b, 1960]. Ce modèle estime l'élévation de la température moyenne de surface du disque au cours d'un freinage d'arrêt. Cette élévation de température $\Delta\theta$ peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta\theta(\tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi\xi_d}} \frac{\varphi_d(0)}{S_d} \sqrt{T_f} \left(1 - \frac{2}{3}\tau\right) \sqrt{\tau} \quad (2)$$

avec τ une variable adimensionnelle de temps, variant entre 0 et 1 du début à la fin du freinage, T_f la durée du freinage, $\varphi_d(\tau)$ le flux de chaleur dissipé dans le disque et ξ_d l'effusivité du disque. En appliquant ce modèle à l'échelle 1 et à l'échelle réduite, et en imposant une même élévation de température de surface aux deux échelles, on obtient la règle de changement d'échelle :

$$\widehat{p} \widehat{v}_0 \sqrt{\widehat{t}_f} = \gamma \quad (3)$$

Le triplet paramétrique $(\widehat{p}, \widehat{v}_0, \widehat{t}_f)$ est composé respectivement de la pression apparente, de la vitesse initiale de glissement et du temps de freinage adimensionnés. Ces paramètres adimensionnés sont définis par les rapports entre paramètres à échelle réduite et paramètres à l'échelle 1 :

$$\widehat{p} = \frac{p}{P}, \widehat{v}_0 = \frac{v_0}{V_0} \text{ et } \widehat{t}_f = \frac{t_f}{T_f}$$

Le facteur d'échelle γ est une constante qui dépend des effusivités des matériaux et des surfaces de frottement des disques et garnitures. En considérant l'utilisation des mêmes matériaux aux 2 échelles, un facteur γ égale à 1 indique que la règle de similitude (1) est respectée. Dans notre cas, la surface frottante de garniture étant proportionnellement trop petite à l'échelle réduite au regard de la similitude avec l'échelle 1, le facteur γ est une constante supérieure à 1.

Ainsi, le paramétrage d'un essai de freinage d'arrêt isolé à l'échelle réduite représentatif de l'échelle 1 se fait par le choix du triplet de paramètres $(\widehat{p}, \widehat{v}_0, \widehat{t}_f)$ vérifiant l'équation (3). Comme le montre le diagramme $(\widehat{p}, \widehat{v}_0, \widehat{t}_f)$ de la Figure I-10, le choix d'un triplet est un compromis sur le choix des paramètres. La surface représentée dans ce diagramme correspond à l'ensemble des triplets qui vérifient la règle de changement d'échelle (3).

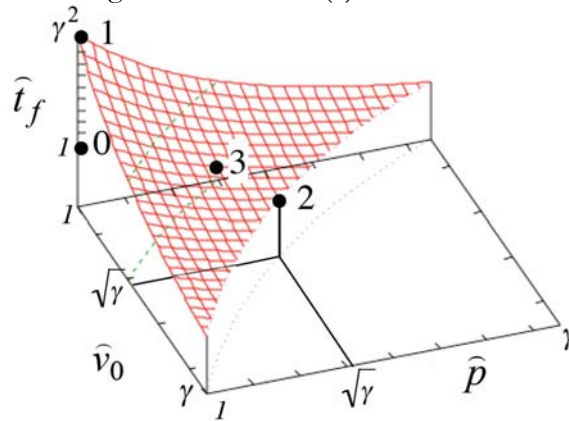


Figure I-10 : Choix du triplet paramétrique, diagramme $(\widehat{p}, \widehat{v}_0, \widehat{t}_f)$

L'origine du diagramme, qui correspond au triplet (1,1,1), est sous la surface, ce qui indique que le choix des mêmes paramètres de pression, de vitesse et de durée aux 2 échelles conduit à une élévation de température moyenne de surface plus faible à l'échelle réduite qu'à l'échelle 1. Les 3 triplets numérotés 1, 2 et 3 sur la surface permettent d'obtenir la même élévation de température aux 2 échelles : le triplet n°1 $(1, 1, \gamma^2)$, qui respecte la pression et la vitesse, est un compromis sur la durée du freinage, le triplet n°2 $(\sqrt{\gamma}, \sqrt{\gamma}, 1)$ respecte la durée du freinage et est

un compromis sur la pression et la vitesse tandis que le triplet n°3 est un compromis sur les trois paramètres.

Ainsi, une infinité de triplets sont possibles et conduisent tous à la même élévation de la température moyenne de surface $\Delta\theta(\tau)$ au cours d'un essai de freinage d'arrêt mais ces triplets ne sont pas strictement équivalents d'un point de vue thermique. Il est important de prendre en considération les densités d'énergie et de flux absorbées pendant l'arrêt. La courbe de la Figure I-11 donne l'évolution des densités adimensionnées d'énergie \hat{q}_d et de flux $\hat{\varphi}_d$ absorbées par le disque en fonction de la durée de freinage adimensionnée \hat{t}_f . Le triplet n°2, qui respecte la durée du freinage ($\hat{t}_f=1$), respecte également les densités d'énergie et de flux dissipées ($\hat{q}_d=1$, $\hat{\varphi}_d=1$) tandis que les 2 autres triplets conduisent à une densité d'énergie dissipée plus grande ($\hat{q}_d > 1$) et à une densité de flux dissipée plus faible ($\hat{\varphi}_d < 1$) à l'échelle réduite qu'à l'échelle 1, les écarts étant d'autant plus importants que la durée de freinage est longue.

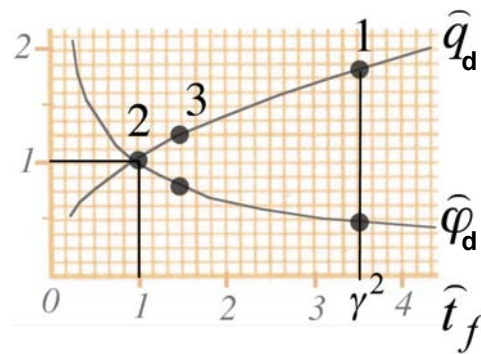


Figure I-11 : Evolution des densités adimensionnées d'énergie \hat{q}_d et de flux $\hat{\varphi}_d$ absorbées par le disque en fonction de la durée du freinage adimensionnée \hat{t}_f

Ainsi, lorsque le compromis expérimental porte sur la durée de freinage, l'élévation de la température de surface est obtenue grâce à une énergie dissipée importante mais ce choix entraîne des densités de flux faibles, ce qui conduit à des gradients thermiques faibles, éloignés de ceux observés à l'échelle 1. A l'inverse, le triplet n°2, qui est un compromis sur la vitesse de glissement et la pression apparente, permet de conserver les mêmes densités de flux aux 2 échelles, donc de reproduire la même sévérité de freinage en termes de température de surface et de gradient thermique. Aussi, dans cette étude, c'est ce dernier triplet qui sera adopté lors du choix des paramètres expérimentaux.

La reproduction bien maîtrisée de freinages d'arrêt isolé sur le tribomètre de freinage va permettre la réalisation d'un freinage d'arrêt d'urgence. La reproduction de successions de freinages d'arrêt rapprochés est quand à elle une utilisation nouvelle du tribomètre et va nécessiter une étude particulière.

I.2.3. Dégradation en température des constituants du matériau composite

La chute du coefficient de frottement et l'augmentation de l'usure observées en service sous sollicitations sévères de contact sont attribuées à la dégradation en température du matériau composite. La littérature concernant cette dégradation est pauvre, mais une étude bibliographique a été menée afin de connaître le comportement en température des constituants du matériau composite identifiés au paragraphe I.1.3.1.a. :

- les constituants minéraux, présents dans le matériau sous forme de fibres ou de particules abrasives contenant silice, alumine, magnésie et chaux, ne se dégradent pas lors d'une sollicitation thermique même à plus de 1000°C.
- les constituants métalliques (fibres d'acier et particules de cuivre et de laiton) s'oxydent lors de la montée en température à partir de 500°C, le phénomène s'intensifiant avec l'augmentation de la température. Les oxydes formés sont essentiellement l'hématite (Fe_2O_3), la wustite (FeO), la magnétite (Fe_3O_4), la cuprite (Cu_2O), la téronite (CuO), la zincite (ZnO) et l'oxyde stannique (SnO_2). Ces oxydes se fixent sur l'échantillon et provoquent ainsi une augmentation de sa masse [Kristkova 2004].
- le constituant organique, l'aramide (« aromatic polyamide ») dans le matériau étudié, se dégrade à partir d'une température de 430°C [Kim 2000].
- les lubrifiants solides, graphite C, stibnite Sb_2S_3 et molybdénite MoS_2 , présentent différents comportements lors de sollicitation en température (Figure I-12) [Ingo 2004, Cho 2006, Kim 2006]. Le graphite C présente une faible perte de masse jusque 700°C puis se dégrade totalement en éléments volatils jusque 1000°C en formant du monoxyde et du dioxyde de carbone. La stibnite Sb_2S_3 s'oxyde en deux étapes successives : dans un premier temps entre 300 et 430°C pour former Sb_2O_3 avec une perte de masse de 10 %, et dans un second temps à 570 °C pour former Sb_2O_4 conduisant à un gain de masse de 3 % puis à une perte de masse de 70% par sublimation à 1100°C. La molybdénite MoS_2 s'oxyde à 540°C pour former du MoO_3 ce qui entraîne une perte de masse de 10 %. MoO_3 se sublime à 700°C.

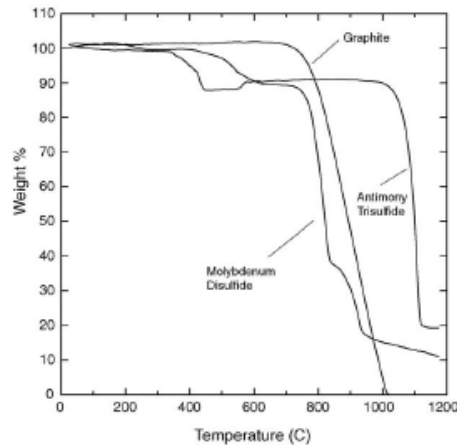


Figure I-12 : Variations de masse des lubrifiants solides en fonction de la température : graphite C, stibnite Sb_2S_3 et molybdénite MoS_2 [Cho 2006]

- la résine phénolique se dégrade en température par étapes successives [Roman-Martinez 1996, Costa 1997, Kristkova 2004]. Ces étapes dépendent de la présence ou non de dioxygène dans l'atmosphère. La Figure I-13 présente les variations de masse mesurées par Costa [Costa 1997] pour des échantillons de 6 à 10 mg de deux résines phénoliques, l'une synthétisée en laboratoire (S) et l'autre commercialisée (C), sous atmosphère inerte (Figure I-13a) et sous air (Figure I-13b). L'analyse est menée jusque 800°C à une vitesse de 10°C par minute. Les différences observées dans le comportement deux résines sont dues aux différences entre les processus d'élaboration conduisant à des ponts entre les structures constituant la résine. Trois étapes peuvent être identifiées correspondant à des mécanismes de dégradation différents :
 - Lors de la première étape, pour des températures variant de l'ambiante à 300°C, une faible perte de masse est observable. Cette perte de masse est due à la condensation des groupements phénoliques et méthylol non réalisée lors du processus d'élaboration. La condensation conduit à la formation d'eau H_2O sous forme gazeuse et donc volatile.

- Lors de la seconde étape, à partir de 300°C, la dégradation du matériau est marquée par une perte de masse plus importante. La température de début de cette étape est confirmée par Bijwe qui l'observe à partir de 330°C [Bijwe 2005]. La perte de masse est due à la rupture de ponts $-CH_2-$ et $-O-$ et aux réactions mises en jeu telles le cracking, la déshydratation et la déshydrogénation. Ces réactions conduisent à la production de vapeur d'eau, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone. Sous atmosphère inerte sans oxygène, la perte de masse se produit d'une part, par auto-oxydation et, d'autre part, par l'intermédiaire des radicaux OH et de l'eau H_2O qui agissent comme des sources d'oxygène. Sous atmosphère oxydante, la présence de dioxygène favorise le processus de dégradation précédemment décrit auquel s'ajoute la formation de nouveaux groupements carbonyle et carboxylique accentuant la perte de masse. Sous cette atmosphère, la perte de masse est totale à 600°C alors qu'elle est limitée à 55 % sous atmosphère inerte.
- Dans la troisième étape, pour des températures supérieures à 600°C, la dégradation de la résine se poursuit sous atmosphère inerte. La perte de masse dépend alors de la résine considérée et conduit alors à des pertes de masse de 45 ou 5 % à 800°C selon l'origine de la résine.

Ces observations réalisées par Costa décrivent les différentes étapes de la dégradation d'un échantillon pur de résine phénolique de masse initiale faible (quelques mg). Ces observations vont être utiles comme base à l'analyse de la dégradation de la résine contenue dans notre matériau composite. Toutefois, les interactions entre les différents constituants de la résine et l'importante différence de masse initiale des échantillons entre les analyses de Costa et celles menées dans notre étude peuvent conduire à des variations dans les réactions de dégradation complexes présentées ci-dessus. La taille de l'échantillon peut en effet influencer sur la cinétique des réactions mises en jeu.

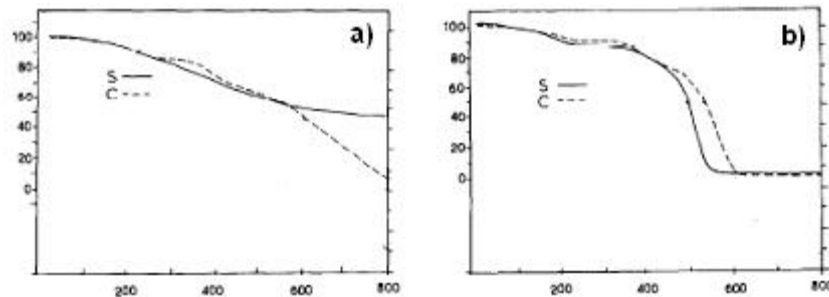


Figure I-13 : Variations de masse en fonction de la température d'échantillons de résine phénolique synthétisée en laboratoire (S) ou commerciale (C) : a) sous atmosphère inerte, b) sous air [Costa 1997]

Cette seconde partie a permis de situer le contexte scientifique de l'étude et de la positionner par rapport aux études précédemment menées au sein de l'équipe et aux savoir faire acquis. Une étude bibliographique concernant la dégradation en température des constituants du matériau composite a également été présentée.

I.3. Méthodologie

La première partie des travaux de thèse a pour objectif l'étude de l'influence de la dégradation en température du matériau composite sur son comportement en frottement continu. Il s'agit, d'une part, d'étudier le comportement tribologique du matériau au cours de sa dégradation en température et, d'autre part, de comparer le comportement d'un matériau vierge et d'un matériau dégradé. Pour cela, des essais de frottement continu en température ont été réalisés sur un tribomètre couplé à un spectromètre de masse permettant un suivi de la dégradation du matériau par l'intermédiaire des dégagements gazeux produits.

La seconde partie des travaux a pour but d'étudier les mécanismes physiques de frottement activés sous sollicitations sévères de freinage. Pour cela, les deux types de sollicitations sévères définies en collaboration avec Alstom Transport seront reproduites sur le tribomètre de freinage du L.M.L.

I.3.1. Essais de frottement continu pilotés en température

Dans un premier temps, une étude préliminaire de la dégradation du matériau composite à matrice organique est menée hors frottement. L'étude est menée par thermogravimétrie et spectrométrie de masse. Dans un second temps, le tribomètre de frottement continu « Lorient » sur lequel seront réalisés les essais de frottement est présenté au travers de ses capacités et de son instrumentation. Enfin, le programme des essais de frottement est décrit.

I.3.1.1. Thermogravimétrie couplée à la spectrométrie de masse

Cette étude préliminaire a été menée au Laboratoire de Catalyse de Lille, devenu depuis l'Unité de Catalyse et de Chimie du Solide, UCCS UMR CNRS 8181. Une analyse thermogravimétrique est réalisée sur un échantillon de matériau composite à matrice organique afin d'étudier la variation de masse de l'échantillon lorsque celui-ci est soumis à une élévation de température. La thermogravimétrie appliquée à cette étude doit permettre de suivre les dégradations successives des différents constituants du matériau de friction par l'intermédiaire des variations de masse de l'échantillon analysé. L'analyse est effectuée sous une atmosphère oxydante composé d'un mélange hélium/dioxygène (He/O₂). L'air n'est pas utilisé afin de s'affranchir, lors du couplage avec la spectrométrie de masse, des détections des différents gaz qu'il contient. Cependant, afin de rester représentatif des phénomènes se produisant sous air, la proportion de dioxygène dans l'hélium a été choisie équivalente à celle du dioxygène de l'air ce qui conduit à un mélange composé à 80% de He et 20% de O₂. La masse initiale de l'échantillon de matériau de friction est de l'ordre de 60 mg et l'échantillon est monté en température de la température ambiante à 1185°C, à une vitesse de 10°C par minute.

Au cours de l'analyse thermogravimétrique, les différents constituants produisent, une fois leur température de dégradation atteinte, différents gaz qui leur sont spécifiques. Afin de corréler les variations de masse à la dégradation des différents constituants, les dégagements gazeux produits au cours de l'analyse ont été identifiés par spectrométrie de masse. Les dégagements gazeux peuvent alors être corrélés aux dégradations des différents constituants.

Le spectromètre de masse permet l'identification des molécules gazeuses présentes à partir de l'analyse de leurs fragments moléculaires obtenus par ionisation. Les différents ions présents sont séparés en fonction de leur rapport masse/charge (m/z). Le spectromètre est utilisé en mode balayage : toutes les 40 secondes, un échantillon de gaz est prélevé dans le thermogravimètre et soumis à une analyse pour des rapports m/z jusqu'à 200. Ces analyses successives permettent de suivre l'évolution au cours du temps des gaz produits par l'intermédiaire de l'intensité du pic de l'ion moléculaire détecté. Les gaz recherchés au cours de l'analyse sous atmosphère oxydante sont plus particulièrement le dioxyde de carbone (CO₂, $m/z = 44$), le monoxyde de carbone (CO, $m/z = 28$) et l'eau (H₂O, $m/z = 44$).

I.3.1.2. Dispositif expérimental utilisé : le tribomètre de frottement continu « Lorient »

Les essais de frottement continu ont été réalisés sur un tribomètre de type pion/disque développé au LaMCoS de l'INSA de Lyon (Figure I-14). Ce dispositif, appelé tribomètre « Lorient », est utilisé pour l'étude de l'influence de la température sur le comportement tribologique de couples de matériaux [Gouider 2004a, Gouider 2004b]. Les spécificités de ce tribomètre résident d'une part, dans l'implantation d'un système de chauffage sous le disque permettant d'imposer

une température au contact et, d'autre part, dans le couplage avec un spectromètre de masse analysant les dégagements gazeux au contact.

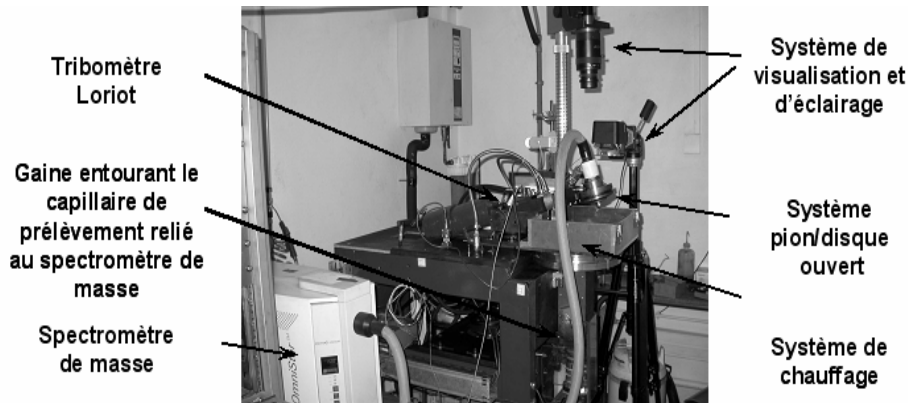


Figure I-14 : Vue d'ensemble du tribomètre « Lorient » et de son instrumentation

I.3.1.2.a. Capacité

Le tribomètre « Lorient » permet la réalisation d'essais de frottement continu dans la gamme d'utilisation suivante :

- la vitesse maximale de rotation du moteur entraînant le disque est de 1200 tr.min^{-1} , ce qui correspond à une vitesse linéaire de $9,8 \text{ m.s}^{-1}$ pour un rayon de frottement moyen de 78 mm,
- la pression est imposée par un système hydraulique capable de produire un effort normal maximal de 500 N autorisant, pour un pion de diamètre 16 mm, une pression de contact apparente de 0,3 MPa,
- la température imposée par le dispositif de chauffage au disque peut atteindre une valeur de consigne maximale de 515°C .

I.3.1.2.b. Instrumentation

Le suivi de l'évolution des grandeurs thermiques et tribologiques au cours de l'essai est assuré par l'instrumentation du tribomètre présentée en Figure I-15 :

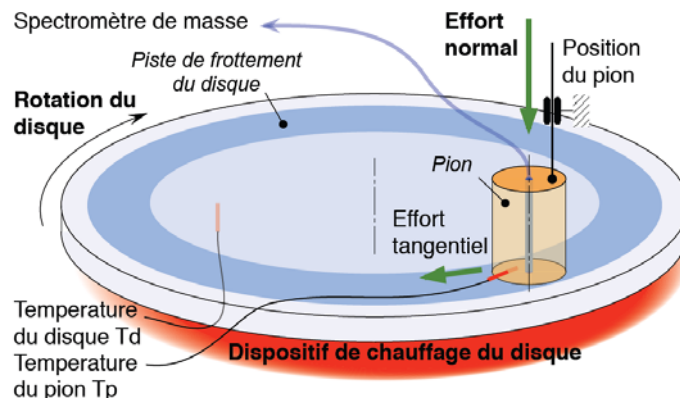


Figure I-15 : Schéma du tribomètre « Lorient »

- la composante tangentielle de l'effort du pion sur le disque est mesurée par un capteur de force et permet de calculer le coefficient de frottement μ connaissant l'effort normal imposé,

- les températures des éprouvettes sont suivies par deux thermocouples. Le thermocouple assurant la mesure de température dans le pion T_p est positionné sur le rayon moyen de frottement égal à 78 mm et à 2 mm sous la surface de contact. Le thermocouple assurant la mesure de température de masse dans le disque T_D est situé sur un rayon de 54 mm. Il assure le contrôle du chauffage,
- la position du pion par rapport à un repère fixe lié au bâti est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur LVDT.

Les dégagements gazeux au contact ont été analysés par un spectromètre de masse. Le prélèvement des gaz se fait par un capillaire de diamètre 125 μm inséré dans un trou de 3 mm de diamètre percé dans le centre du pion et débouchant au contact. Le mode d'analyse utilisé est le mode 'Mesure d'intensité' : il permet le suivi au cours du temps des intensités correspondant aux rapports m/z choisis. Les essais étant réalisés sous air, les gaz analysés sont l'eau (H_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2) avec des rapports m/z respectifs de 18 et 44. La présence d'air ne permet pas l'analyse du monoxyde de carbone dont le rapport m/z de 28 correspond également au diazote N_2 de l'air.

Les géométries complètes du pion et du disque sont présentées en Annexe B. Le pion en matériau composite à matrice organique est de forme cylindrique avec un diamètre de 16 mm pour une hauteur de 13 mm. Sur le disque, la piste de frottement est comprise entre les diamètres 130 et 200 mm. L'épaisseur du disque sous cette piste est de 8 mm. Le bras articulé du tribomètre est réglé afin d'assurer le contact entre le pion et le disque sur un rayon moyen de frottement de 78 mm.

La visualisation de la piste du disque dans toute sa largeur a été mise en œuvre lors de certains essais. Une caméra vidéo analogique équipée d'un capteur tri CCD permet d'acquérir des images à une fréquence de 25 images.s⁻¹. Un système d'éclairage ad hoc apporte la lumière nécessaire à ces acquisitions. Cette instrumentation est principalement utilisée dans notre étude au cours de la phase de rodage.

Les données tribologiques et thermiques sont acquises sur une interface développée au LaMCoS sous le logiciel LabView. L'acquisition des données fournies par le spectromètre se fait à l'aide d'un logiciel constructeur. Les images vidéo sont enregistrées sur un lecteur/enregistreur multimédia.

I.3.1.3. Programme d'essais

L'objectif des essais réalisés sur le tribomètre « Lorient » est l'étude de l'influence de la dégradation en température du matériau composite sur son comportement en frottement, d'une part, lorsque la dégradation se produit et, d'autre part, lorsque le matériau est dégradé. Le paramètre d'essais important est donc ici la température à laquelle le contact est soumis, i.e. la température de consigne imposée par le système de chauffage.

Les essais mettent en œuvre la séquence en trois phases de montée en température présentée en Figure I-16. Dans la première phase, le frottement est réalisé sans chauffage additionnel pendant 15 minutes. L'élévation de température observée est due à la chaleur générée par frottement. Dans la seconde phase, toujours sous frottement continu, le chauffage additionnel est déclenché. La température du disque s'élève jusqu'à atteindre la température de consigne. Dans la troisième phase, le frottement se poursuit durant 10 minutes, la température contrôlée étant maintenue à la température de consigne. Cette séquence a été réalisée avec une vitesse de glissement de 2 m.s⁻¹ et une pression apparente de 0,8 MPa maintenues constante, pour une température de consigne en phase 3 de 515°C. Le choix de cette température de consigne en

phase trois est le résultat des analyses préliminaires sur la dégradation du matériau et sera discuté par la suite.

Deux essais ont été réalisés : l'un sur matériau vierge et l'autre sur matériau dégradé. Le matériau dégradé est obtenu en faisant subir à un matériau vierge une séquence d'essai préliminaire. L'utilisation du spectromètre de masse permettra de valider cette dégradation.

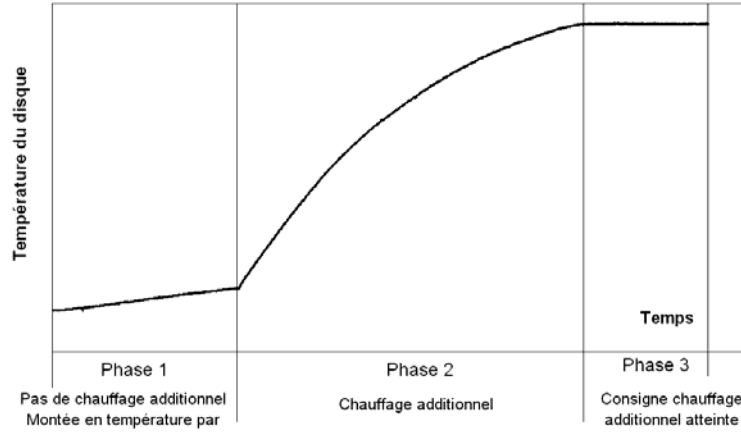


Figure I-16 : Définition d'une séquence d'essai

Afin d'obtenir un contact plan satisfaisant entre les échantillons au cours des essais, ceux-ci ont été précédés d'une phase de rodage. Ce rodage, réalisé sans chauffage additionnel, est mené jusqu'à ce que la largeur de la piste frottée du disque, observée par la caméra, soit égale à la largeur du pion. Lors du rodage, la température atteinte ne dépasse pas 100°C afin de ne pas dégrader les matériaux.

I.3.2. Essais de freinage sous sollicitations sévères

La première partie de ce paragraphe décrit le tribomètre de freinage du L.M.L., ses capacités et son instrumentation. En seconde partie, une étude préliminaire est dédiée à la reproduction sur le tribomètre de successions de freinages d'arrêt rapprochés observées en service. Enfin, le programme d'essais réalisé est décrit dans la troisième partie.

I.3.2.1. Dispositif expérimental utilisé : le tribomètre de freinage du L.M.L.

Les essais de freinage ont été réalisés sur le tribomètre de freinage du L.M.L. (Figure I-17).

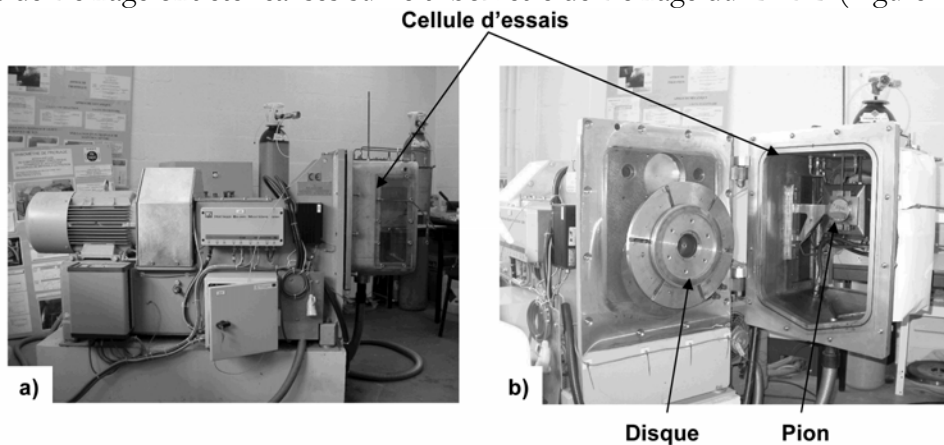


Figure I-17 : Tribomètre de freinage du L.M.L. a) vue générale, b) vue de la cellule d'essais ouverte

Ce tribomètre de type pion/disque a été développé pour l'étude des couples de matériaux de friction sous différentes conditions de freinage : freinages d'arrêt, freinages de maintien et freinages successifs rapprochés de type 'métró'. Ce tribomètre permet de réaliser des freinages couvrant un domaine d'exploitation allant des petites aux grandes vitesses et des faibles aux hautes énergies [Desplanques 2001] et a déjà été de support de plusieurs travaux de thèse [Copin 2000, Bodovillé 2001, Rousette 2005, Desplanques 2004].

I.3.2.1.a. Capacités

Le tribomètre de freinage du L.M.L., dont l'architecture générale est présentée en Figure I-18, est un banc d'essais inertiel (volant d'inertie de $3,35 \text{ kg.m}^2$) de type pion-disque qui permet la réalisation d'essais dans la gamme suivante :

- la vitesse maximale de rotation du moteur électrique asynchrone, d'une puissance maximale de 11,5 kW, est de 4000 tr.min^{-1} . Le moteur entraîne en rotation une ligne d'arbre à l'extrémité de laquelle se trouve le disque d'essai. Les rayons moyens de frottement possibles sont compris entre 85 et 160 mm, ce qui conduit à une vitesse linéaire maximale de 70 m.s^{-1} ,
- la pression est imposée par deux vérins hydrauliques, associés à une servovalve, qui exercent la poussée sur une platine mobile en translation sur laquelle est monté le pion d'essai. L'effort normal maximal qui peut être imposé est de 1200 N et, en fonction de la géométrie du pion, la pression apparente de contact peut atteindre quelques MPa pour une aire de contact de quelques cm^2 ,
- l'énergie dissipée pendant un freinage d'arrêt est contrôlée par l'asservissement du moteur et peut atteindre 1 MJ.

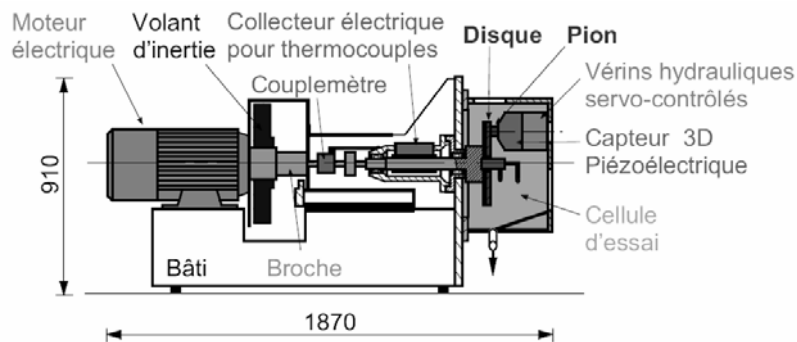


Figure I-18 : Architecture du tribomètre de freinage du L.M.L.

I.3.2.1.b. Instrumentation

L'instrumentation standard du tribomètre de freinage permet le suivi de l'évolution des grandeurs caractéristiques suivantes au cours de l'essai :

- la vitesse de rotation est donnée par le tachymètre du moteur ;
- les composantes de l'effort de contact sont mesurées par un capteur d'effort 3D piézoélectrique implanté à l'arrière du pion. Le calcul du coefficient de frottement est réalisé à partir des mesures des composantes normale et tangentielle ;
- les températures de masse du disque et du pion sont mesurées par des thermocouples de type K. Un collecteur tournant monté sur la broche permet la transmission des signaux des thermocouples placés dans le disque. Le maintien des connectiques des thermocouples du disque est assuré par un contre disque monté à l'extrémité de la broche.

Ces différentes données sont enregistrées à l'aide d'une centrale d'acquisition offrant une fréquence d'acquisition maximale de 20 kHz.

Cette instrumentation a été complétée pour certains essais par l'utilisation de deux caméras permettant la visualisation de la piste du disque au cours des essais; l'une dans le domaine de l'infrarouge et l'autre, dans le domaine du visible.

Au cours des essais, le disque est soumis à des flux d'énergie engendrant la production d'un rayonnement infrarouge. Ce rayonnement infrarouge émis par la surface du disque peut être capté sous forme de luminance par une caméra infrarouge [Cedip]. La caméra infrarouge utilisée est une caméra matricielle disposant d'un temps d'intégration très bref (jusque 35 μ s). La luminance captée correspond au rayonnement infrarouge émis sur un huitième de la surface du disque observable à partir de l'une des fenêtres d'observation de la cellule d'essais (Figure I-19). L'acquisition des données est réalisée à l'aide d'un logiciel constructeur offrant de nombreux outils de post-traitement.

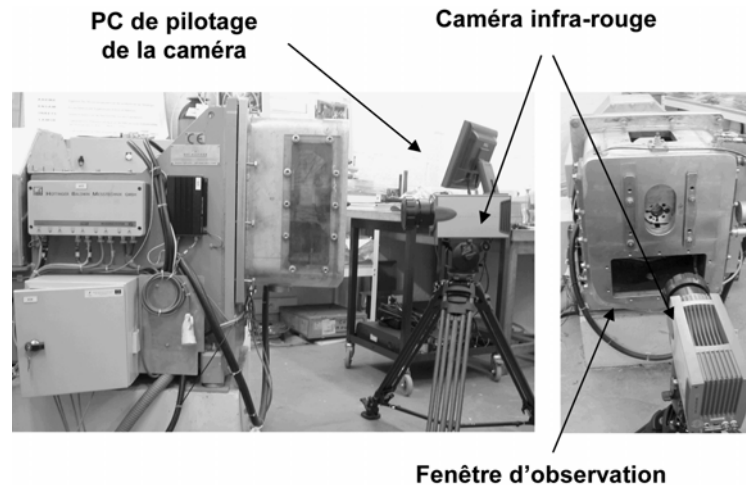


Figure I-19 : Mise en position de la caméra infra-rouge

La luminance est fonction de la température du corps observé ainsi que de son émissivité. La connaissance de l'émissivité du corps observé permet de remonter aux températures de surface. L'émissivité d'un corps, dont la valeur est comprise entre 0 et 1, dépend de son état de surface [Pajani 1989, Gaussorgues 1999]]. Le corps observé au cours des freinages est la surface frottée du disque dont l'état de surface varie temporellement et spatialement avec l'apparition de phénomènes transitoires et de phénomènes locaux. La méconnaissance de l'émissivité de la surface du disque rend donc impossible le passage de la luminance captée aux températures de surface. Il peut tout de même être considéré que les gradients de rayonnement infrarouge de la piste du disque peuvent être corrélés à des gradients thermiques de surface sauf modification locale de l'émissivité.

Les résultats des observations réalisées avec la caméra infrarouge sont présentées en termes de luminance exprimé en Digital Level (DL) correspondant à un niveau numérique. Différentes configurations de la caméra (différents filtres) sont utilisées au cours des essais en fonction des niveaux de température prédits lors du paramétrage des essais afin d'optimiser l'utilisation de la gamme de DL. Le détecteur de la caméra ne reçoit donc pas la même luminance en fonction du filtre utilisé. Il est donc impossible de comparer quantitativement les niveaux de sollicitations thermiques atteints au cours des différents essais.

Afin de fournir une information sur l'estimation de la température de surface atteinte au cours des essais et de permettre ainsi la comparaison entre deux essais, la température de luminance moyenne de la surface est déterminée. La température de luminance d'un objet observé,

d'émissivité inconnue, est la température du corps noir d'émissivité de 1 qui donnerait la même luminance. Pour une émissivité de 1, les degrés de luminance obtenus pour la surface du disque sont convertis en température de luminance et la moyenne de cette température est calculée sur un huitième de la surface de la piste du disque. Il est à noter que l'utilisation de la valeur 1 de l'émissivité fournit une valeur minimale de la température : l'utilisation d'une émissivité inférieure entraînerait une température estimée plus élevée.

Une caméra vidéo numérique rapide permet l'observation de la surface du disque dans le domaine du visible. La caméra est équipée d'un système de synchronisation afin de visualiser la même zone de la piste du disque à chaque tour. Le dispositif est présenté en Figure I-20. La zone du disque observée est diamétralement opposée à la zone de contact entre le pion et le disque. Un système d'éclairage stroboscopique fournit l'éclairage et le temps de pause nécessaires à la prise de vue. En fonction de l'optique utilisé, la zone observée est de quelques cm² à quelques mm². Cet instrumentation a été développée par Matthieu François au cours de son post-doctorat [François 2005, François 2006, Bulthé 2005]. L'acquisition des données de la caméra rapide est réalisée à l'aide d'une interface développée au sein du laboratoire.

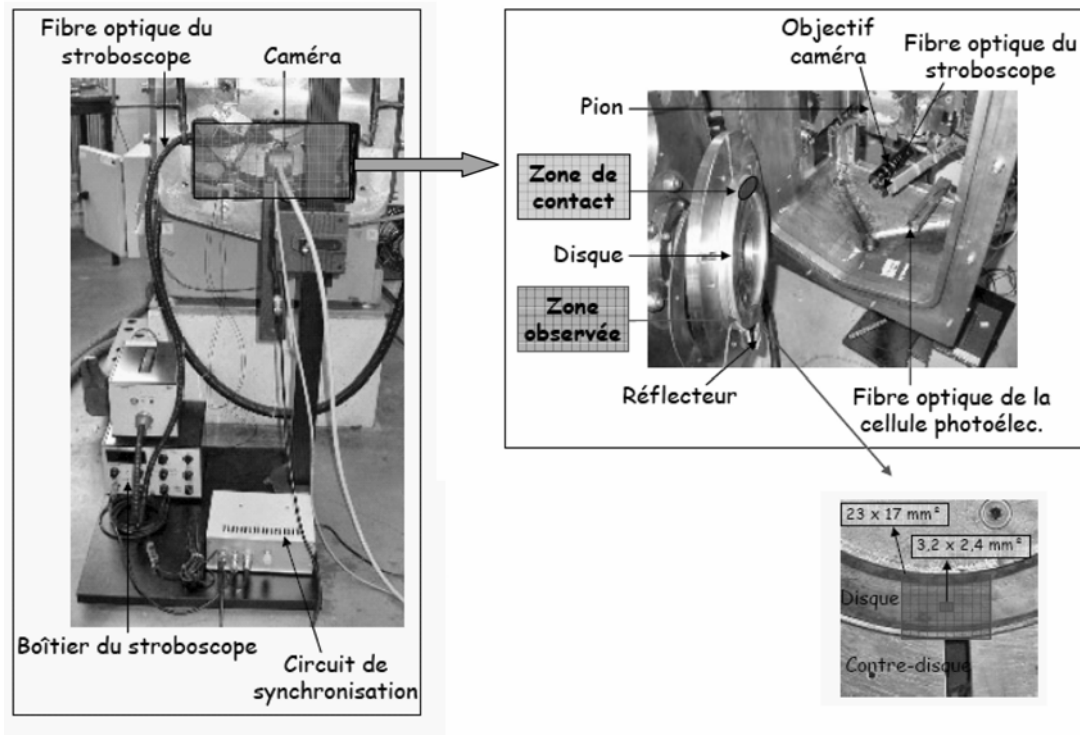


Figure I-20 : Présentation du dispositif de visualisation in-situ

Les géométries des éprouvettes présentées en Annexe B sont telles que le rayon de frottement moyen est de 100 mm. La géométrie de l'éprouvette en matériau composite adoptée sur le tribomètre de freinage est celle d'un patin allongé dans le sens du glissement. La largeur radiale du patin est de 16 mm pour une longueur angulaire moyenne de 68 mm correspondant à un angle de 39°. Pour le disque, la largeur utile de la piste de frottement est de 17 mm et l'épaisseur sous la piste de frottement est de 22 mm.

Afin de garantir un contact satisfaisant entre les éprouvettes au cours des essais, tous les essais sont précédés d'une phase de rodage. Ce rodage se compose de 20 freinages dissipant une énergie inférieure à 18 kJ puis de 20 freinages dissipant une énergie croissante atteignant à la fin du rodage celle dissipée lors d'un freinage à basse énergie, c'est à dire 53 kJ.

I.3.2.2. Reproduction de freinages d'arrêt successifs avec cumul de chaleur

Alors que la reproduction de freinages d'arrêt isolés sur le tribomètre de freinage est bien maîtrisée, la réalisation de successions de 20 freinages d'arrêt est nouvelle sur le tribomètre. Des essais préliminaires ont montré que la configuration originelle du montage du disque sur le tribomètre entraînait un refroidissement trop important du disque par convection et conduction pour les températures de surface représentatives d'une sollicitation sévère par cumul de chaleur puissent être atteintes. Afin de définir une nouvelle configuration du montage du disque, une modélisation axisymétrique par éléments finis a été réalisée en thermique transitoire à l'aide du logiciel ABAQUS. Dans une première étape, la configuration originelle du montage a été modélisée afin de reproduire par le calcul l'évolution de température observée expérimentalement pendant la succession de freinages lors des essais préliminaires. La Figure I-21 présente la géométrie axisymétrique de la configuration originelle du montage sur le tribomètre avec la prise en compte de la broche, du contre-disque et de la géométrie du disque. Un flux thermique est appliqué sur la piste de frottement tandis que la conduction entre les différents éléments et la convection sur les surfaces libres du disque et du contre-disque sont prises en compte.

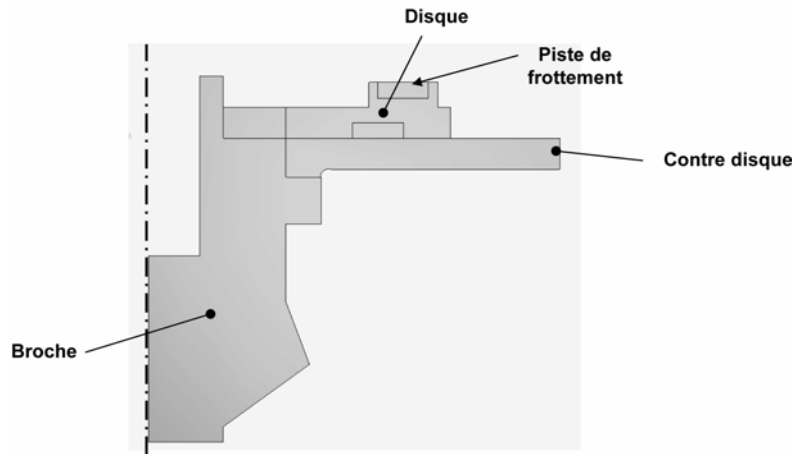


Figure I-21 : Géométrie axisymétrique de la configuration originelle du montage du disque sur la broche

Le coefficient d'échange convectif induit par la rotation du disque et du contre disque dépend principalement de la vitesse de rotation du disque, de la position radiale considérée, mais également de la forme des surfaces d'échange et de leur environnement qui perturbent les régimes d'écoulement en paroi. Une étude expérimentale menée au L.M.E. sur la convection induite par la rotation d'un disque a permis l'évaluation du coefficient d'échange convectif sur différents rayons de la surface du disque pour plusieurs vitesses de rotation. La convection étant importante lorsque les températures de surface le sont aussi, que les températures de surface sont élevées au voisinage de la piste de frottement pendant les essais et que celle-ci a une largeur radiale faible devant son rayon moyen, nous avons considéré que le coefficient d'échange convectif est indépendant de la position radiale et que sa valeur est celle prise sur le rayon moyen de frottement. La variation du coefficient d'échange convectif avec la vitesse de rotation du disque a été choisie linéaire. La Figure I-22 présente les évolutions de la vitesse de rotation du disque et du coefficient d'échange convectif au cours d'un cycle de freinage de la séquence. Le freinage, d'une durée de 22 s, est suivi d'un arrêt de 20 s puis d'une remontée en vitesse de 15 s et d'une stabilisation à la vitesse maximale de 5 s avant le freinage suivant.

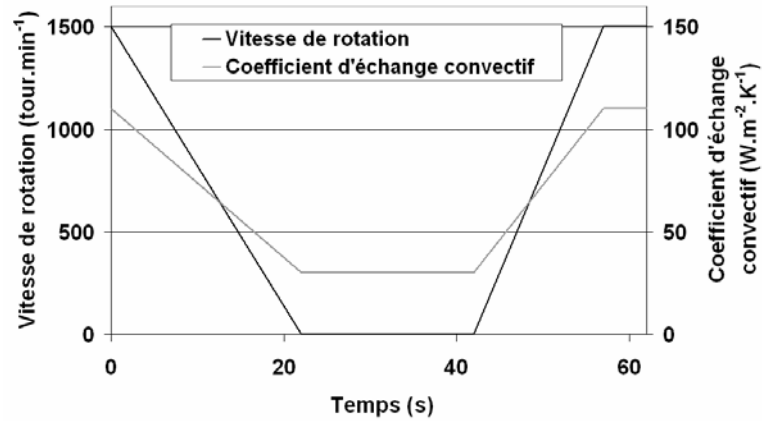


Figure I-22 : Vitesse de rotation et coefficient d'échange convectif au cours d'un cycle de freinage

Les températures obtenues par le calcul à la surface et à 5 mm de la surface sous le rayon moyen de frottement sont présentées en Figure I-23. Les températures maximales atteintes en ces deux points sont respectivement 201 et 175°C.

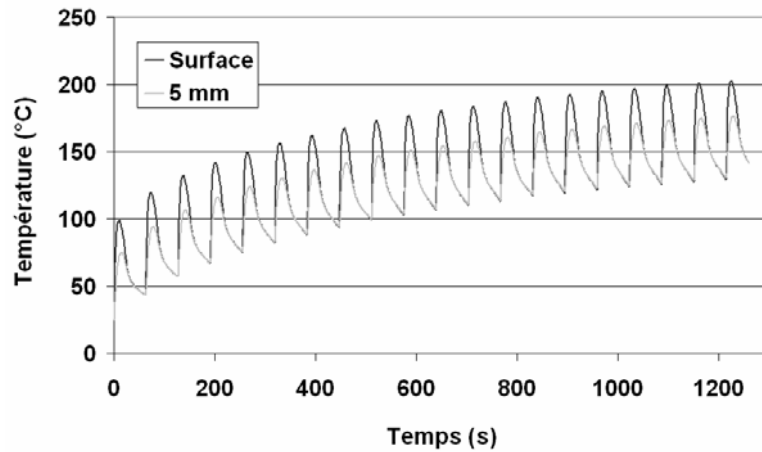


Figure I-23 : Evolutions des températures de surface et à 5 mm obtenues par éléments finis pour la configuration originelle

A titre de comparaison, la Figure I-24 présente, l'évolution au cours d'un essai préliminaire de la température du disque à 5 mm sous le rayon moyen de frottement, la valeur maximale étant de 187°C.

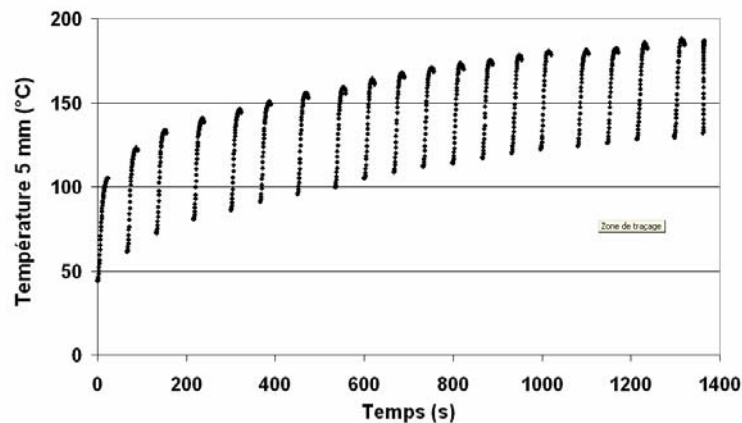


Figure I-24 : Evolution de la température à 5 mm mesurée lors d'un essai préliminaire pour la configuration originelle

Les températures ainsi obtenues avec la configuration originelle restent inférieures à 200°C et ne constituent pas une sollicitation sévère de freinage par cumul de chaleur. Des modifications du montage et du disque ont été réalisées conduisant à la nouvelle configuration présentée en Figure I-25 :

- la géométrie du disque a été modifiée par la diminution de la largeur et l'augmentation de l'épaisseur de la piste de frottement afin de mieux prendre en compte l'effet de la masse à proximité de la piste de frottement,
- la taille du contre-disque a été réduite afin de limiter les pertes de chaleur,
- deux isolants ont été intercalés entre le disque et le contre-disque afin de limiter la conduction entre ces deux éléments,
- deux isolants ont été placés, l'un au centre du disque et l'autre sur la tranche du disque et à l'arrière du contre disque, afin de limiter les pertes de chaleur par convection.

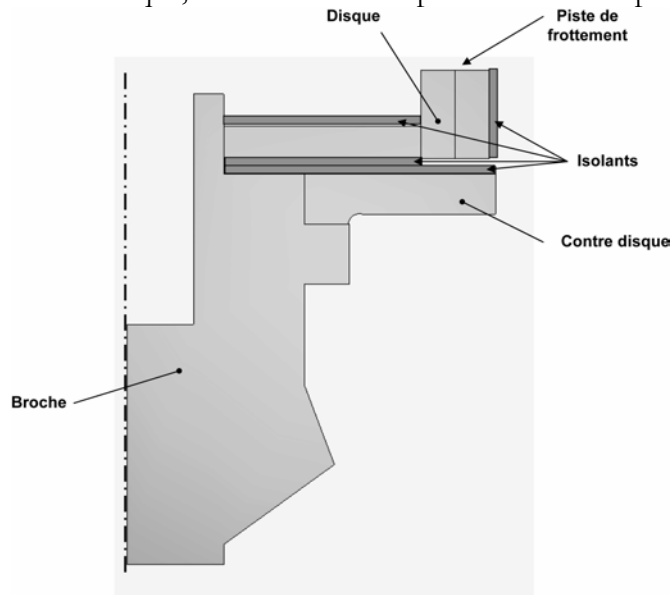


Figure I-25 : Géométrie axisymétrique de la nouvelle configuration de montage du disque sur la broche

Pour cette nouvelle configuration, les températures obtenues par le modèle à la surface et à 5 mm de la surface sous le rayon moyen de frottement sont présentées en Figure I-26. Les températures maximales atteintes en ces deux points sont respectivement 357 et 335°C.

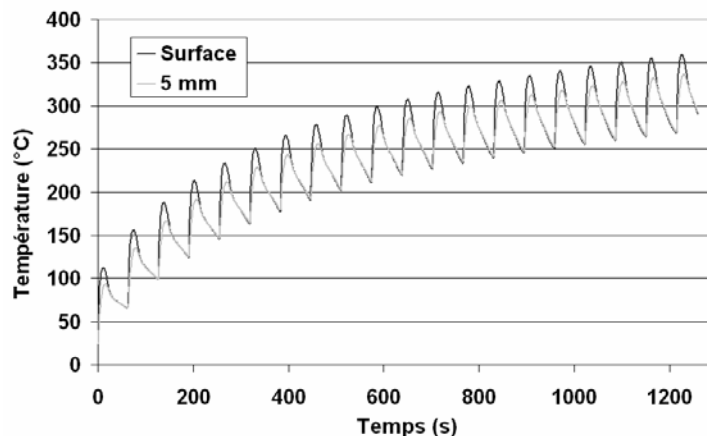


Figure I-26 : Evolution des températures de surface et à 5 mm données par le modèle pour la nouvelle configuration

La Figure I-27 montre les évolutions de températures de masse du disque à 2 et 5 mm de la surface de frottement lors d'une succession de 19 freinages d'arrêt à basse énergie avec cumul de

chaleur. Les températures maximales atteintes sont de 339,8 et de 335,1°C respectivement pour les profondeurs de 2 et 5 mm. La différence entre les valeurs expérimentales et numériques de la température à 5 mm dans le disque n'est donc que de 5%.

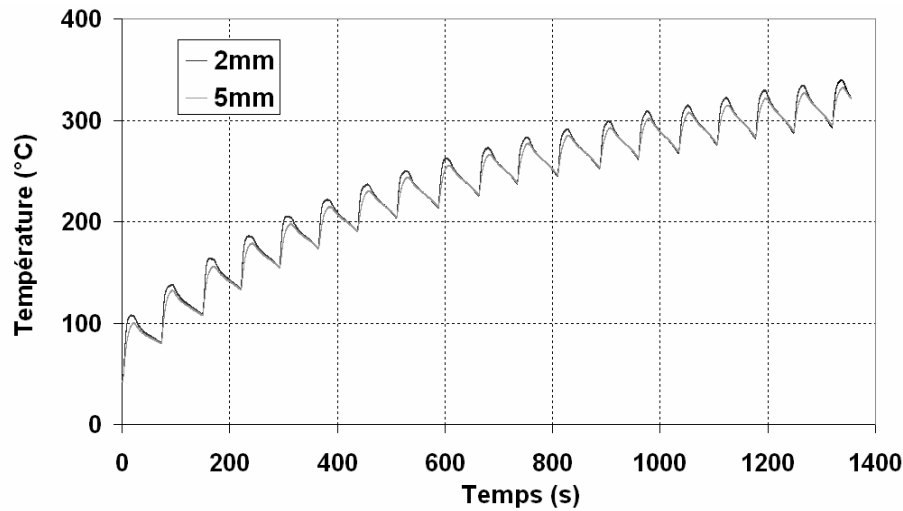


Figure I-27 : Evolutions des températures de masse du disque à 2 et 5 mm de la surface de frottement au cours d'une succession de 19 freinages avec cumul de chaleur

Les modifications réalisées ont ainsi permis d'accroître les températures atteintes de 150°C en surface par rapport au montage précédent et ainsi d'atteindre par effet de cumul des températures de surface proche de celle obtenues pour un freinage d'arrêt à haute énergie. Cette nouvelle configuration est celle qui a été utilisée pour les essais.

I.3.2.3. Programme d'essais

I.3.2.3.a. Freinage d'arrêt isolé

Deux freinages d'arrêt isolés rencontrés en service sur un matériel de type T.E.R. ont été paramétrés à l'aide de la règle de changement d'échelle présentée au paragraphe I.2.2.. Le premier correspond à un freinage d'arrêt pour un train circulant à vitesse initiale de 80 km.h⁻¹ et est appelé freinage d'arrêt à basse énergie. Le second, appelé freinage d'arrêt à haute énergie, est représentatif d'un freinage avec une vitesse initiale de 160 km.h⁻¹. Ce dernier freinage correspond à un niveau sévère de sollicitations pour un freinage unique. Le Tableau I-6 présente les conditions expérimentales retenues pour les freinages d'arrêt isolés à basse et à haute énergie, comparées aux conditions de freinage à l'échelle 1.

Les valeurs de ce tableau ont été établies en considérant une valeur constante du coefficient de frottement à 0,3, qui est une valeur proche en moyenne des valeurs observées en freinage pour le couple de matériaux étudié. Comme indiqué au paragraphe I.2.2., le choix de la même durée de freinage aux deux échelles conduit aux mêmes densités d'énergie et de flux absorbées par le disque aux deux échelles. Le modèle de Newcomb donne une estimation des valeurs maximales de l'élévation de température moyenne de surface atteinte pour chaque freinage : 93°C pour le freinage à basse énergie, 263°C pour le freinage à haute énergie.

	Freinage d'arrêt à basse énergie		Freinage d'arrêt à haute énergie	
	Ech. 1	Ech. réduite	Ech. 1	Ech. réduite
Pression apparente p (MPa)	0,65	0,85	0,65	0,85
Vitesse initiale de glissement v_0 (m.s ⁻¹)	11,8	15,4	23,6	30,8
Durée du freinage t_f (s)	22		44	
Energie cinétique dissipée q (kJ)	1111	53	4444	211
Densité de flux initial absorbé par le disque $\varphi_d(0)$ (kW.m ⁻²)	462000		924000	
Densité d'énergie absorbée par le disque q_{ds} (kJ.m ⁻²)	5080		20030	
Elévation maximale de température de surface (Newcomb) $\Delta\theta$ (°C)	93		263	

Tableau I-6 : Conditions expérimentales retenues pour les essais de freinage à basse et haute énergie, comparées aux conditions de freinage à l'échelle 1

I.3.2.3.b. Freinages d'arrêt successifs

Deux successions de 19 freinages d'arrêt à basse énergie ont été paramétrées : l'une sans cumul de chaleur, i.e. sans enchaînement rapide des freinages, et la seconde avec cumul de chaleur obtenu par l'enchaînement rapide des freinages. Les freinages d'arrêt à basse énergie utilisés sont identiques à ceux présentés au paragraphe précédent.

Lors de la succession de freinages sans cumul de chaleur, un temps d'attente sera laissé entre deux freinages consécutifs afin de permettre le refroidissement des éprouvettes. Un freinage de la succession n'est ainsi déclenché que lorsque la température du disque est inférieure à 55°C.

Lors de la succession de freinages avec cumul de chaleur, le temps entre deux freinages consécutifs sera très court et ne permettra qu'un refroidissement limité des éprouvettes. Le temps d'attente a été paramétré en utilisant la modélisation sous Abaqus afin d'atteindre un niveau de sollicitation sévère avec une température de surface dépassant les 350°C. Le temps d'attente total ainsi déterminé est de 40 s et comprend 20 s d'arrêt, 15 s de montée en vitesse du disque et 5 s de stabilisation à vitesse maximale.

I.3.2.3.c. Freinages d'arrêt isolés interrompus

Afin d'étudier les mécanismes physiques mis en jeu au contact au cours du freinage d'arrêt isolé à haute énergie, ce freinage sera réalisé sur plusieurs couples d'éprouvettes et interrompu à différents instants du freinage. Les interruptions seront réalisées à 1,5 s, 5 s, 11 s et 20 s, ainsi qu'à 50 s ce qui correspond à la fin du freinage.

I.4. Conclusions

Le contexte industriel est celui du freinage ferroviaire sous sollicitations sévères pour lequel une chute du coefficient de frottement et une augmentation de l'usure peuvent être observées, ces modifications étant attribuées à la dégradation de la matrice du matériau composite à matrice organique. Le but de cette étude est la compréhension des mécanismes physiques mis en jeu sous sollicitations sévères et conduisant à cette modification de comportement. Le cadre de l'étude est fixée par le choix de l'application Z-TER : le couple de matériau composé d'un composite à matrice organique et d'une fonte GL sera utilisé lors des essais et les sollicitations sévères qui

seront reproduites sont celles rencontrées en service sur l'application : un freinage d'arrêt d'urgence et une succession de freinages d'arrêt avec cumul de chaleur.

D'un point de vue scientifique, cette étude s'inscrit dans la continuité de travaux menés au L.M.L. dans le domaine du freinage et plus particulièrement suivant une approche matériau au sein de l'Ecole Centrale de Lille. Les études antérieures sur le tribomètre de freinage ont permis la caractérisation du comportement en freinage de divers couples de matériaux et les observations de surface menées après essais ont permis la reconstitution du circuit tribologique. L'enjeu est à présent d'intégrer dans ce circuit tribologique la sévérité de la sollicitation.

La méthodologie mise en œuvre au cours de cette étude est développée en deux temps. Dans un premier temps, une étude préliminaire de la dégradation du matériau sera menée hors frottement afin d'identifier les températures de dégradation du matériau et les produits gazeux de cette dégradation. Ces résultats seront ensuite utilisés pour le paramétrage d'essais de frottement continu pilotés en température et couplés à un spectromètre de masse ; réalisés dans le but d'étudier l'influence de la dégradation du matériau composite à matrice organique sur son comportement en frottement. Dans un second temps, les deux sollicitations sévères seront reproduites sur le tribomètre de freinage afin d'étudier les mécanismes physiques de frottement mis en jeu sous sollicitations sévères de freinage.

CHAPITRE II. INFLUENCE DE LA DEGRADATION DU MATERIAU COMPOSITE ORGANIQUE SUR SON COMPORTEMENT EN FROTTEMENT

II.1. Dégradation en température du composite à matrice organique	39
II.2. Comportement en frottement du matériau au cours de sa dégradation	40
II.2.1. Perturbations du coefficient de frottement au cours de la dégradation	41
II.2.2. Mécanismes physiques activés après la dégradation du matériau vierge	43
II.2.3. Conclusions	49
II.3. Comportement en frottement du matériau dégradé	49
II.3.1. Coefficient de frottement et usure sur le matériau dégradé	50
II.3.2. Mécanismes physiques activés après l'essai sur matériau dégradé	51
II.3.3. Conclusions	57
II.4. Conclusions	57

CHAPITRE II : INFLUENCE DE LA DEGRADATION DU COMPOSITE ORGANIQUE SUR
SON COMPORTEMENT EN FROTTEMENT

Ce second chapitre pose deux questions relatives à l'influence de la dégradation en température du matériau composite sur son comportement en frottement. D'une part, lorsque le matériau à l'état vierge se dégrade sous l'effet de la température, le comportement en frottement est-il modifié ? D'autre part, une fois le matériau dégradé, présente-t-il un comportement différent de celui d'un matériau vierge ? Afin de répondre à ces questions, des essais de frottement continu pilotés en température ont été réalisés, d'une part, sur le matériau vierge et, d'autre part, sur le matériau préalablement dégradé. Le comportement en frottement est évalué en termes de coefficient de frottement et de vitesse d'usure. Les mécanismes de frottement mis en jeu sont identifiés à l'aide d'observations en MEB, d'analyses EDS et de mesures de profilométrie à interférométrie optique réalisées après essais sur les pions en matériau composite. Au cours du frottement, la dégradation du matériau est suivie à l'aide d'un spectromètre de masse identifiant les dégagements gazeux produits lors de la dégradation. Une analyse préliminaire de la dégradation du matériau composite avec la température s'impose donc afin de déterminer sa température de dégradation et d'identifier les dégagements gazeux produits. Cette analyse préliminaire est réalisée en soumettant un échantillon de matériau composite à matrice organique à une analyse thermogravimétrique couplée à un spectromètre de masse.

II.1. Dégradation en température du composite à matrice organique

La dégradation en température du matériau composite à matrice organique est étudiée hors frottement par analyse thermogravimétrique : la masse d'un échantillon initialement égale à 60 mg est mesurée lors d'une montée en température de l'ambiante à 1185°C réalisée à une vitesse de 10°C/min. Par l'intermédiaire des variations de masse, il s'agit d'identifier les températures de dégradation du matériau. Les dégagements gazeux produits au cours de la montée en température sont analysés par un spectromètre de masse afin d'être utilisés comme marqueurs de la dégradation du matériau au cours des essais de frottement.

Il est à noter que l'analyse thermogravimétrique est réalisée avec une certaine cinétique et qu'un choix différent de la masse initiale de l'échantillon ou de la vitesse de montée en température entraînerait une modification dans les résultats. Par exemple, Trick a observé que l'augmentation de la vitesse de montée en température décale les phénomènes observés vers des températures plus élevées [Trick 1997].

La variation de masse de l'échantillon de matériau composite lors de l'analyse thermogravimétrique ainsi que les gaz analysés sont présentés en Figure II-1 en fonction de la température.

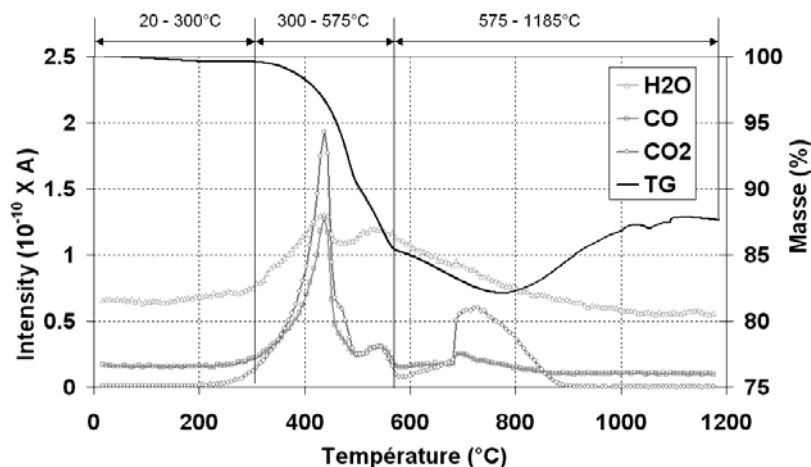


Figure II-1 : Dégagements gazeux et variation de masse de l'échantillon de matériau composite en fonction de la température lors de l'analyse thermogravimétrique

Les variations de masse observées se font par étapes, chaque étape pouvant être associée à la dégradation des différents constituants du matériau composite à l'aide de l'étude bibliographique réalisée au paragraphe I.2.3.. L'analyse en spectrométrie de masse permet d'identifier les dégagements gazeux associés à la dégradation des constituants

- Au dessous de 300°C, la perte de masse de 0,4% est due, dans un premier temps, au dégazage et à la perte d'eau contenue dans le composite poreux puis, dans un second temps, à la condensation des groupements phénoliques non réalisée lors du processus d'élaboration du matériau composite.
- A partir de 300°C, la perte de masse s'intensifie marquant ainsi le début de la dégradation du matériau composite conduisant à 575°C à une perte de masse de 14,3%. Les constituants du matériau composite se dégradant à cette température sont les constituants organiques : l'aramide et la résine phénolique. En se dégradant, ces constituants produisent simultanément du CO₂, du CO et de l'H₂O qui marquent un pic principal de dégagement à 437 °C.
- Au delà de 575°C, la perte de masse due à la dégradation du matériau est compensée progressivement par le gain de masse dû à l'oxydation des éléments métalliques, le gain de masse devenant prépondérant à partir de 775°C. Dans cet intervalle de température, les éléments se dégradant sont tout d'abord le graphite contenu dans le matériau ainsi que les éléments carbonés produits par la dégradation des constituants organiques. Cette dégradation produit du monoxyde et surtout du dioxyde de carbone alors que le dégagement d'eau est en chute constante. Dans un second temps, les autres lubrifiants solides se dégradent sans production de CO₂, CO ou d'H₂O.

Par l'analyse thermogravimétrique, le début de la dégradation du matériau composite est détecté à 300°C, c'est donc au-delà de cette température que devront se dérouler les essais de frottement. A cette température, le constituant se dégradant majoritairement est la résine phénolique. Les modifications du comportement tribologique étant attribuées à la dégradation de la résine, il est intéressant pour les essais de frottement de se placer au delà de cette dégradation qui présente un pic à 437°C dans les dégagements gazeux de CO₂, de CO et d'H₂O qu'elle provoque. Comme précisé au début de ce paragraphe, la modification de la cinétique de la réaction de dégradation peu déplacer les températures d'observation des dégagements gazeux. Les essais de frottement seront donc réalisés à une température dépassant largement les 437°C en se plaçant à 515°C ce qui correspond aux limites de capacité du système de chauffage du tribomètre.

En ce qui concerne les dégagements gazeux pouvant être utilisés comme marqueurs de la dégradation du matériau composite dans l'intervalle de températures considéré, les dégagements simultanés de CO₂, de CO et d'H₂O marquent la dégradation de la résine phénolique du matériau composite. La chute dans la production d'H₂O marque la fin de cette dégradation, du CO₂ et du CO pouvant être produits par dégradation d'éléments carbonés.

II.2. Comportement en frottement du matériau au cours de sa dégradation

Dans le but d'étudier l'influence de la dégradation en température du matériau composite sur son comportement en frottement, un essai de frottement continu piloté en température a été réalisé sur le tribomètre « Lorient » du LaMCoS. La séquence d'essais définie au paragraphe I.3.1.3. et conduisant à une température maximale de 515°C a été réalisée sur un matériau vierge dans le but d'étudier l'influence de la dégradation lorsqu'elle se produit. Afin d'analyser les mécanismes physiques mis en jeu au cours de l'essai, les surfaces des pions en matériau

composite sont, après essais, observées au MEB, analysées en EDS et soumis à des mesures de profil par interférométrie optique.

II.2.1. Perturbations du coefficient de frottement au cours de la dégradation

L'analyse par le spectromètre de masse des dégagements gazeux produits permet de suivre la dégradation du matériau et plus particulièrement la dégradation de la résine phénolique se produisant dans l'intervalle de température considéré. Les analyses en spectrométrie de masse ayant été réalisées sous air, l'analyse du monoxyde de carbone est impossible car le rapport $m/z = 28$ utilisé pour son identification correspond également au diazote N_2 présent dans l'air. Les dégagements gazeux analysés pendant les essais sont donc la vapeur d'eau H_2O et le dioxyde de carbone CO_2 . Les évolutions des dégagements de ces deux gaz sont analysées de manière qualitative, la quantification des émissions gazeuses nécessitant un calibrage qui ne pouvait être réalisé pour ce type d'application.

La Figure II-2 présente les évolutions des intensités des dégagements d'eau et de dioxyde de carbone au cours de l'essai sur matériau vierge. L'évolution de la température T de masse du disque est également représentée afin de corréler les variations dans les dégagements gazeux aux régimes de températures successifs.

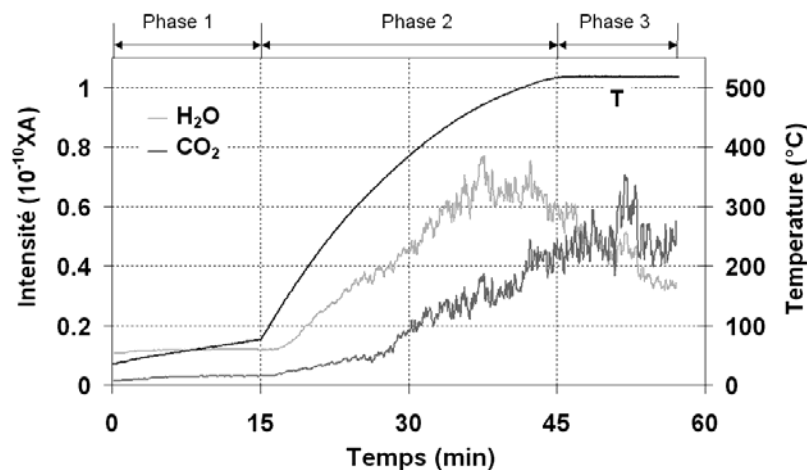


Figure II-2 : Evolution de l'intensité des dégagements gazeux et de la température T du disque au cours de l'essai sur matériau vierge

Au cours de la Phase 1 de frottement à température ambiante, les détections de H_2O et de CO_2 sont faibles et provoquées principalement par la détection des gaz contenus dans l'ambiante. Dès le début de la Phase 2, avec le déclenchement du système de chauffage du disque, les dégagements H_2O et de CO_2 détectés augmentent. Comme cela a été identifié au premier paragraphe, le dégagement simultané de ces deux gaz est le signe que la résine phénolique se dégrade. Le dégagement de CO_2 se poursuit jusque la fin de l'essai alors que celui d' H_2O chute à partir de $480^\circ C$ marquant la fin de la dégradation de la résine.

Ces résultats confirment donc que l'essai réalisé dégrade la résine phénolique du matériau composite à matrice organique. L'analyse de l'influence de la dégradation au cours de l'essai sur le comportement en frottement est réalisée à partir des données obtenues au cours de l'essai en termes de coefficient de frottement et d'usure. La Figure II-3 présente l'évolution du coefficient de frottement μ au cours de l'essai, la moyenne de μ apparaît en blanc.

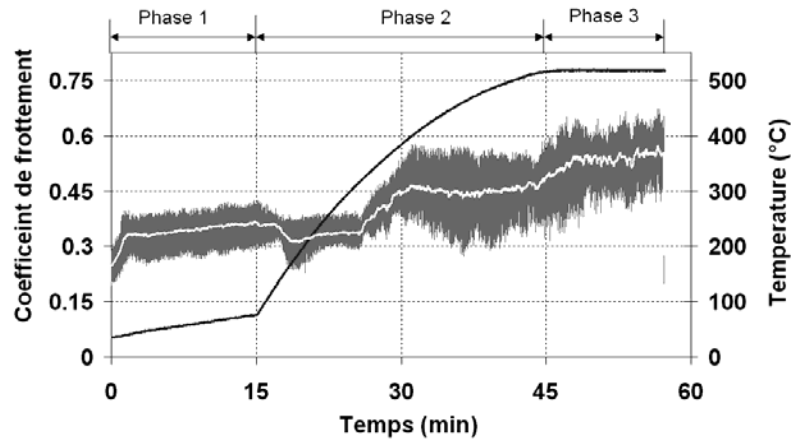


Figure II-3 : Evolution du coefficient de frottement μ et de la température T du disque au cours de l'essai sur matériau vierge

Au cours de la Phase 1, la valeur moyenne de μ présente dans les deux premières minutes de l'essai une montée rapide de 0,25 à 0,33 puis une augmentation constante plus lente pour atteindre 0,36 à la fin de la Phase 1. La Phase 2, correspondant à la montée en température du disque, présente une évolution plus mouvementée. Jusque $T = 132^{\circ}\text{C}$ ($t = 17$ min), μ poursuit l'augmentation observée dans la Phase 1 pour atteindre 0,37 puis diminue très nettement vers un minima de 0,32 pour $T = 178^{\circ}\text{C}$ ($t = 19$ min). Après ce minima, μ remonte et se stabilise à 0,34 jusque $T = 323^{\circ}\text{C}$ avant de remonter rapidement pour atteindre une valeur moyenne de 0,46 à $T = 398^{\circ}\text{C}$, valeur à laquelle le coefficient reste stable durant la fin de la Phase 2. Le passage à la Phase 3 est marqué par une augmentation rapide du coefficient de frottement à 0,54, valeur qu'il conserve jusque la fin de l'essai. Ainsi, alors que le coefficient de frottement présente au cours des Phases 1 et 3 une bonne stabilité en termes de valeur moyenne, la Phase 2 est marquée par des variations dans l'évolution de μ lors de la montée en température.

Il semble a présent intéressant d'analyser la variation de la position du pion au cours de l'essai. Cette variation a plusieurs sources possibles :

- la dilatation du disque lors du chauffage élève le pion et contribue négativement à la valeur de sa position,
- l'usure du couple d'échantillons contribue positivement à l'évolution de la position du pion.
- l'épaisseur du troisième corps formé entre le disque et le pion entraîne quant à elle une contribution négative à la valeur de la position du pion.

L'évolution de la position du pion au cours de l'essai sur le matériau vierge est présentée en Figure II-4. Cette figure montre, d'une part, que la position du pion est fortement perturbée par le chauffage pendant la Phase 2, et d'autre part, que la pente de la courbe d'évolution de la position du pion est linéaire pendant les Phases 1 et 3. Ainsi, lors d'un régime thermique quasi-stationnaire, i.e. en absence de chauffage (Phase 1) ou bien lors d'un palier en température (Phase 3), il est possible de s'affranchir de l'influence de la dilatation du disque et une estimation de la vitesse d'usure, exprimée en $\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, peut alors être donnée par la mesure de la pente de la courbe de position du pion. La vitesse d'usure est ainsi estimée au cours de l'essai à partir de l'évolution de la position du pion par rapport à un repère fixe lié au bâti mesurée par l'intermédiaire d'un capteur LVDT.

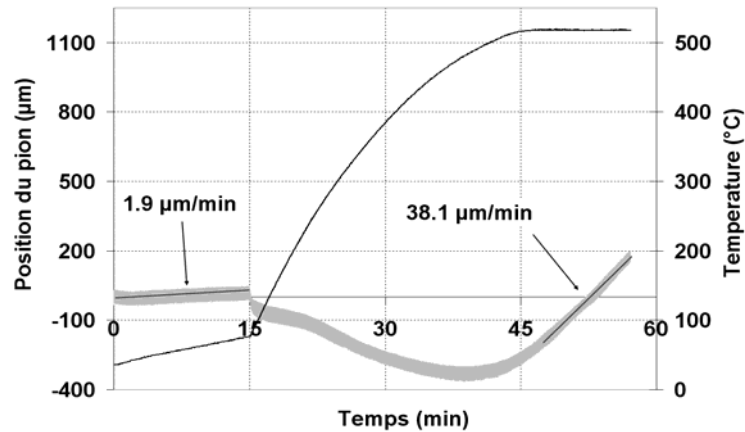


Figure II-4: Estimation des vitesses d'usure du pion à partir de l'évolution de sa position au cours de l'essai sur matériau vierge

Pour l'essai sur matériau vierge, la vitesse d'usure moyenne est de $1,9 \mu\text{m}/\text{min}$ pour la Phase 1 et de $38,1 \mu\text{m}/\text{min}$ pour la Phase 3 marquant ainsi la différence de régime d'usure entre la basse et la haute température

II.2.2. Mécanismes physiques activés après la dégradation du matériau vierge

Les mécanismes physiques mis en jeu au contact au cours de la dégradation du matériau ne peuvent être étudiés mais des observations de surface post mortem réalisées après essais et après ouverture du contact permettent d'identifier les mécanismes mis en jeu à la fin de l'essai après la dégradation du matériau vierge. La Figure II-5 présente des observations réalisées en électrons secondaires (a) et en électrons rétrodiffusés (b) d'une zone représentative de la surface frottante du pion après l'essai sur matériau vierge.

Ces observations mettent en évidence à faible grossissement différents éléments présents à la surface du pion. Ces différents éléments sont repérés sur la Figure II-5b. Les particules minérales sont facilement identifiées car, bien qu'elles soient arasées, elles ont conservé leur forme circulaire. Des plaques planes de troisième corps sont observables, avec des tailles variant de 50 à $600 \mu\text{m}$. En électrons rétrodiffusés, ces plaques planes apparaissent de couleur grise plus ou moins claire selon la présence plus ou moins importante d'éléments lourds. La matrice est largement visible entre les particules minérales arasées et les plaques planes. A la surface de la matrice, des fibres n'ayant pas participé au frottement sont apparentes. Cette matrice est recouverte par endroit d'un lit de poudre de troisième corps et présente également des empreintes de particules qui ont été déchaussées du matériau composite pendant le frottement.

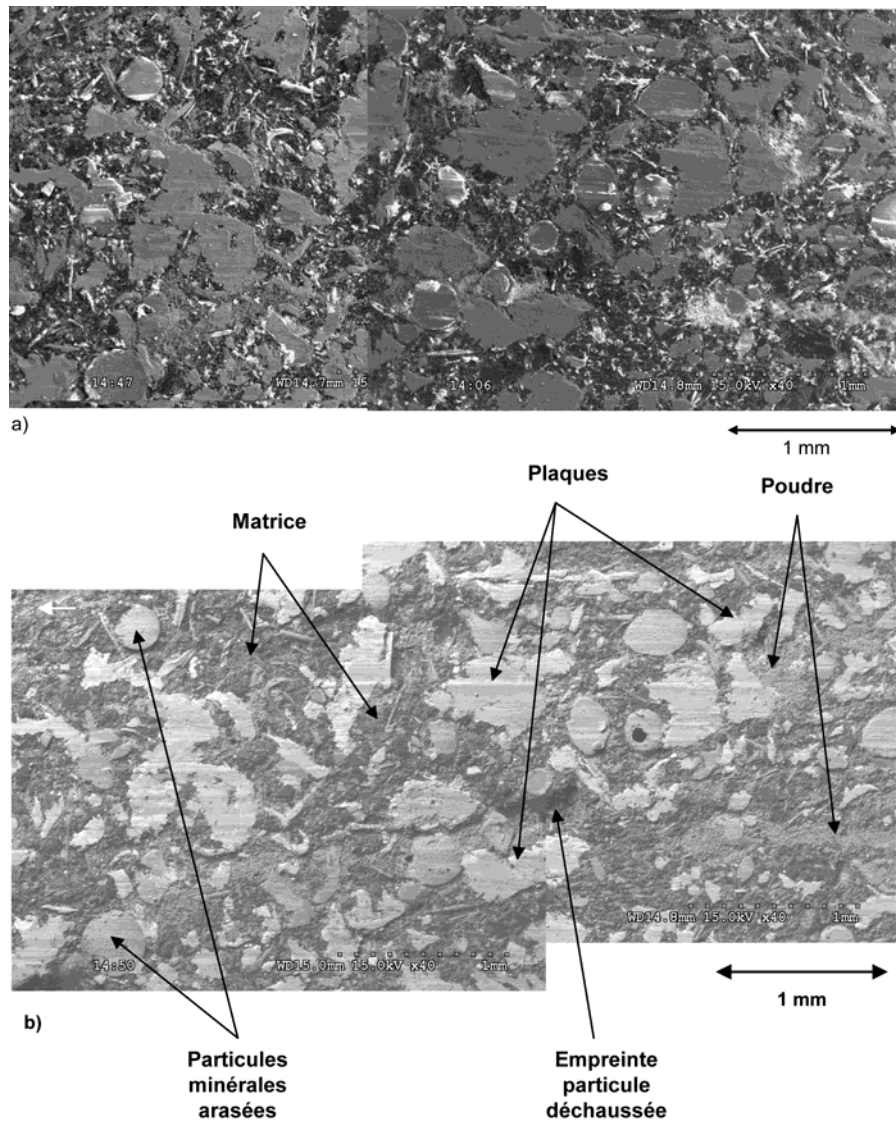


Figure II-5: Observations au MEB de la surface frottante du pion après l'essai sur le matériau vierge a) en électrons secondaires, b) en électrons rétrodiffusés

Les différents éléments repérés sur la Figure II-5 ont fait l'objet d'observations à plus fort grossissement ainsi que d'analyses X-EDS. La Figure II-6 présente des observations MEB en électrons secondaires à différents grossissements. Sur cette figure sont également repérées les zones soumises à une analyse X-EDS (zones numérotées de 1 à 8). Les zones d'analyse ont différentes formes en fonction de la zone à analyser : pointé (zones 2 et 3), circulaire (zones 1, 6 et 8) ou rectangulaire (zones 4, 5 et 7).

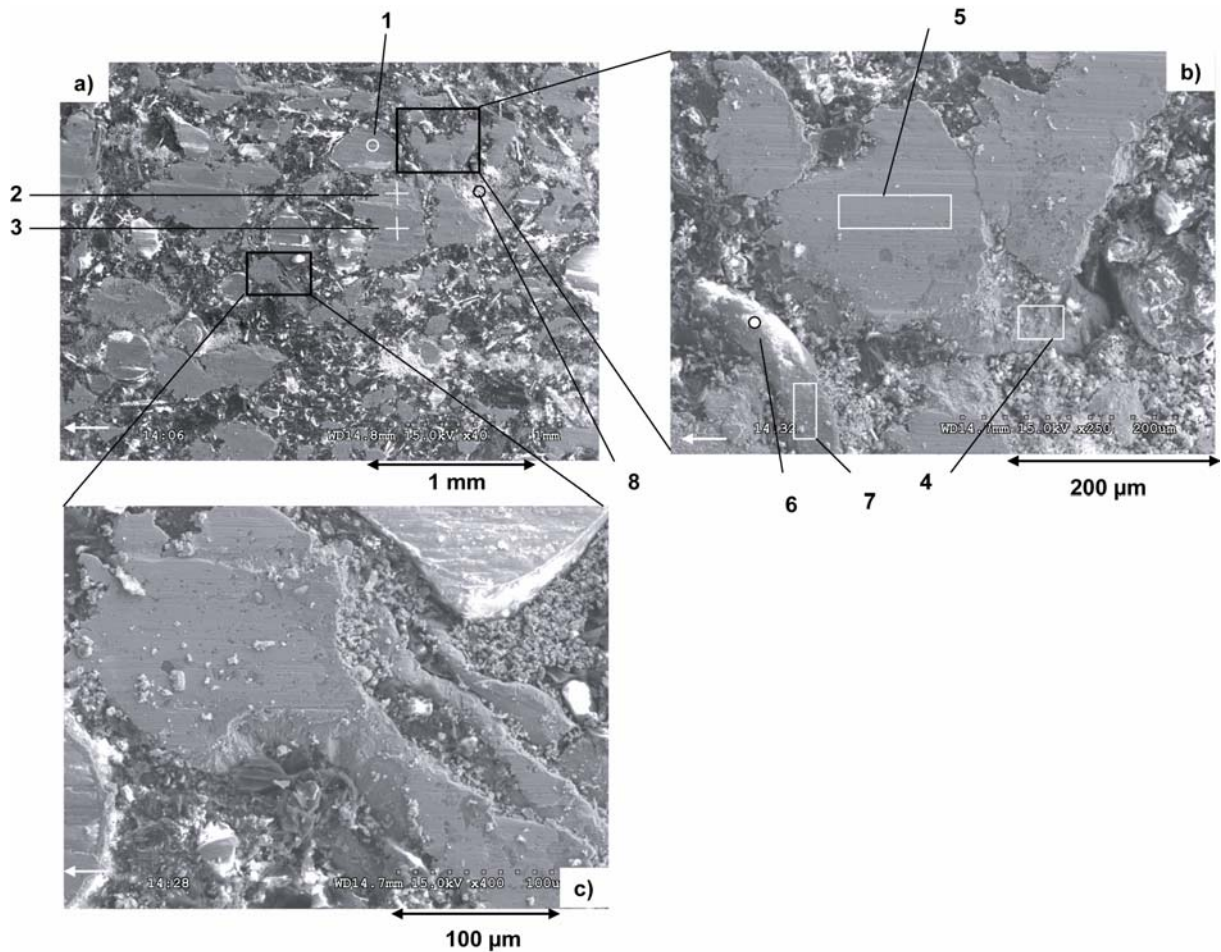


Figure II-6 : Observations MEB a) de la surface du pion, et b-c) détails, après l'essai sur matériau vierge et repérage des zones d'analyse en X-EDS

La nature minérale des particules arasées de forme circulaire est confirmée par la dominance dans le spectre d'analyse X-EDS de la zone 1 des éléments Si, Al, Ca et Mg. On peut également identifier en plus de ces éléments, les éléments Fe, Cu et Zn, présents dans la composition du couple de matériaux étudiés. Ainsi, ce spectre montre que la surface de cette particule minérale arasée est en fait recouverte d'une mince couche de troisième corps. Ce troisième corps ne s'est pas accumulé autour de cette particule ce qui laisse apparente sa forme "circulaire".

Les zones 2 et 3 d'analyse X-EDS sont situées sur une plaque plane de taille importante respectivement sur une zone sans trace de glissement, donc n'ayant pas participé au frottement (zone non frottée), et sur une zone marquée par le glissement (zone frottée). Les spectres d'analyse sont présentés en Figure II-7. La zone frottée 2 se révèle riche en éléments Cu et Zn indiquant la présence d'une particule de laiton (Figure II-7a). Les autres éléments identifiés sont dus à la présence en surface de particules de troisième corps. La zone non frottée 3 est recouverte d'une couche de troisième corps compact comme le montre la diminution des pics des éléments Cu et Zn au profit des autres éléments identifiés (Figure II-7b).

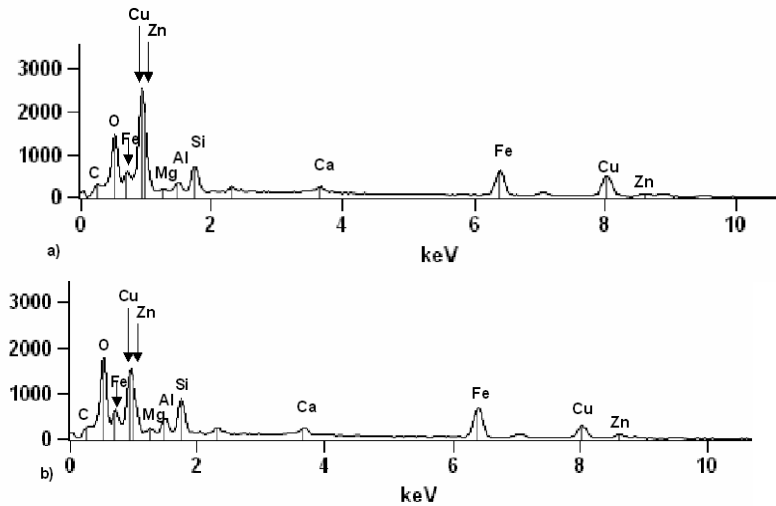


Figure II-7 : Spectres X-EDS d'une plaque plane de troisième corps formée sur une particule de laiton a) zone 2 non frottée, b) zone 3 frottée (repérage Figure II-6a)

Des observations à plus fort grossissement de zones présentant des plaques de plus petites tailles sont présentées en Figure II-6b et c. Ces observations révèlent la présence de fibres dénudées qui émergent du matériau composite et qui restent liées en profondeur à la matrice. Ces fibres, qui ont participé au frottement, sont recouvertes de troisième corps, formant les plaques de petite taille. Ces plaques de troisième corps sont, contrairement à ce qui a été observé sur les particules minérales arasées, de tailles supérieures à la taille des fibres, ne laissant ainsi pas apparaître totalement leur forme en surface.

Deux analyses X-EDS ont été réalisées sur la fibre de taille plus importante : la zone 4 non frottée en bordure de la plaque et la zone 5 frottée en surface de la plaque. L'analyse de la zone 4 avec un pic important de l'élément Fe révèle la présence d'une fibre d'acier, ainsi que celle d'une particule lubrifiante contenant de Sb. Le spectre de la zone 5 présente un pic important de Fe, traduisant la présence de la fibre d'acier sous la plaque, et également des pics secondaires pour les différents éléments constitutifs du couple de matériaux étudié, caractéristiques de la composition du troisième corps.

Deux autres analyses X-EDS ont été réalisées sur la fibre de plus petite taille observée sur la Figure II-6b : la première est effectuée sur la zone 6 non frottée (Figure II-8a) et la seconde sur la zone 7 frottée en surface de la plaque (Figure II-8b).

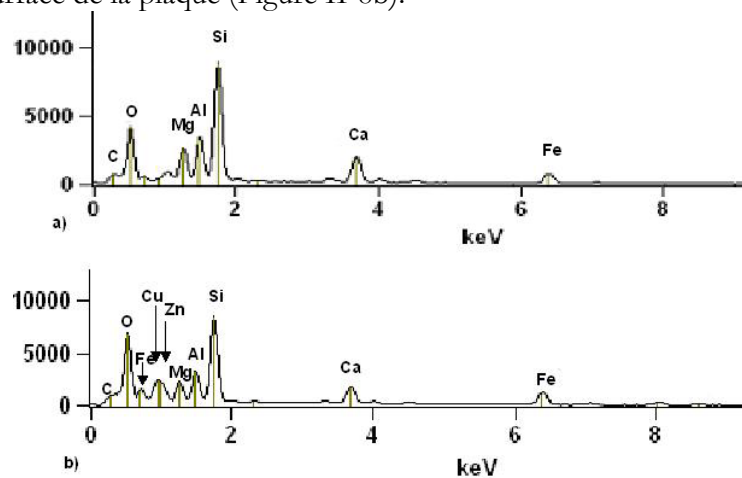


Figure II-8 : Spectres X-EDS d'une plaque plane de troisième corps formée sur une fibre minérale a) zone 4 non frottée, b) zone 5 frottée (repérage Figure II-6b)

L'importante présence des éléments Si, Al, Mg et Ca indique la nature minérale de la fibre. Le spectre de la plaque révèle différents éléments constitutifs des matériaux, les pics des éléments constituant la fibre minérale étant davantage prononcés.

La composition du lit de poudre est également analysée sur la zone 8 repérée sur la Figure II-6a. Le résultat de l'analyse (Figure II-9) confirme la présence dans ce lit de poudre de troisième corps des différents éléments identifiés dans les plaques de troisième corps et provenant des différents constituants métalliques (contenant les éléments Cu, Fe et Zn) et minéraux (contenant les éléments Al, Si, Mg et Ca) des matériaux étudiés.

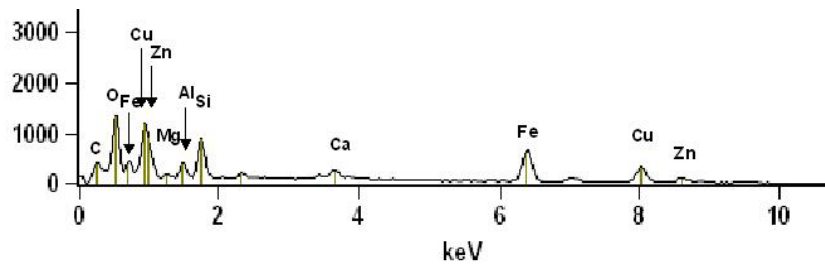


Figure II-9 : Spectre X-EDS d'un lit de poudre de troisième corps (zone 8 Figure II-6a)

Afin de révéler le relief de la surface de l'échantillon, des mesures de profil ont été réalisées en profilométrie interférométrique. La Figure II-10 présente à la même échelle une image MEB en électrons rétrodiffusés (Figure II-10a) et une vue de dessus du profil 3D (Figure II-10b) de la même zone représentative de la surface de l'échantillon. Les fibres minérales arasées ainsi que les plaques planes sont bien mises en évidence en clair sur le profil de surface. Cette surface claire constitue l'aire frottée de la surface apparente de contact, tandis que les zones non frottées (matrice, fibres courtes, lits de poudre...) sont en dépression, de couleur sombre sur le profil. Ces mesures montrent que l'aire frottée est extrêmement plate, son profil, mesuré sur une surface de 5 mm² allongée dans le sens de glissement, pouvant être encadré par deux plans parallèles distants de 10 μm.

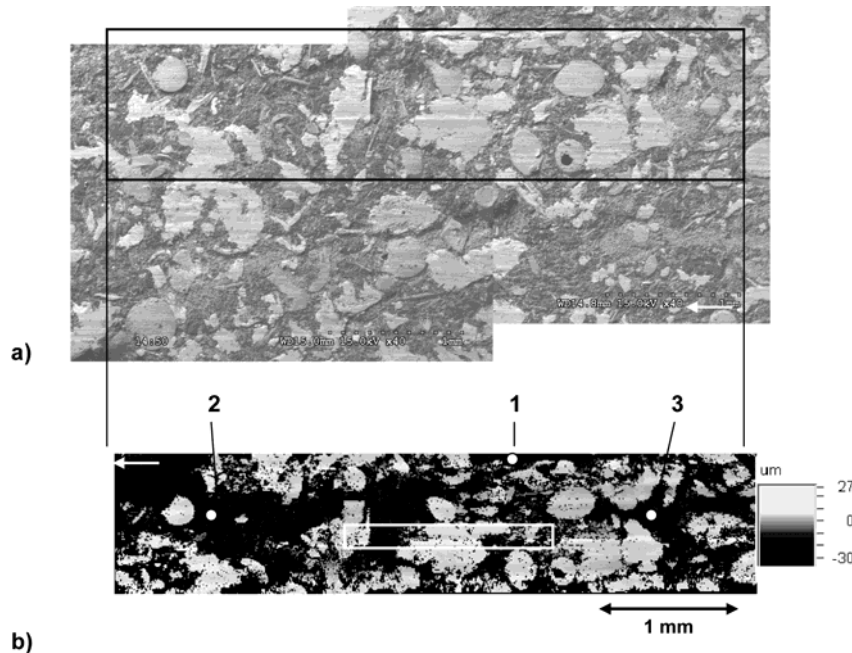


Figure II-10 : Profil de la surface frottante du pion après l'essai sur matériau vierge
a) image MEB en électrons rétrodiffusés de la zone de mesure, b) vue de dessus du profil, repérage et délimitation en blanc de zones de mesures locales à fort grossissement

CHAPITRE II : INFLUENCE DE LA DEGRADATION DU COMPOSITE ORGANIQUE SUR SON COMPORTEMENT EN FROTTEMENT

Les zones en dépression présentent un relief plus accidenté qui n'a pas permis une mesure de profil satisfaisante par interférométrie à ce grossissement (parties noires du profil). Des mesures locales à plus fort grossissement ont permis d'appréhender ce profil. Les profondeurs de dépression mesurées s'échelonnent de 35 à 120 μm , l'intervalle compris entre 35 et 55 μm contenant la majeure partie des mesures. Les zones numérotées de 1 à 3 de la Figure II-10b présentent des profondeurs maximales respectives de 35, 51 et 120 μm . La Figure II-11 présente le profil de la zone délimitée en blanc sur la Figure II-10b. L'aire frottée de la surface apparaît en couleur claire à une altitude voisine de 10 μm . Sous l'aire frottée, le relief de la surface des dépressions se situe à une profondeur maximale de 55 μm .

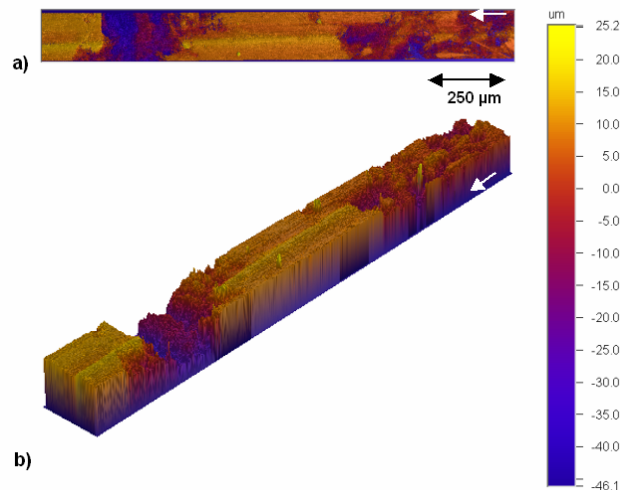


Figure II-11 : Profil de la surface frottante du pion après l'essai sur matériau vierge (zone délimitée en blanc Figure II-10b) :vues a) de dessus et b) 3D du profil

La Figure II-12 présente en profilométrie une fibre sur laquelle s'est formée une plaque plane de troisième corps (a) image MEB de la fibre et vues b) 2D et c) 3D du profil).

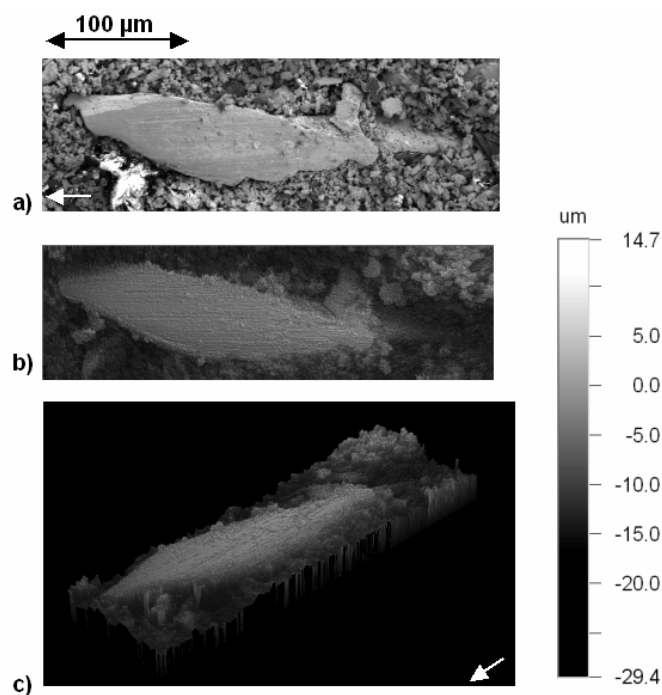


Figure II-12 : Profilométrie de la surface frottée au voisinage d'une fibre arasée a) image MEB de la zone de mesure en électrons secondaires, vues b) 2D et c) 3D du profil

La fibre observée émerge de plus de 40 μm de la matrice à laquelle elle reste liée en profondeur. La fibre présente une surface arasée sur laquelle s'est formée la plaque de troisième corps très plate et marquée de fines stries de glissement. Autour de cette fibre, la matrice est recouverte d'un lit de poudre.

II.2.3. Conclusions

En conclusion, la production d' H_2O détectée au cours de la montée en température montre que la résine phénolique du matériau composite se dégrade. La chute de la détection d' H_2O à partir de 480°C montre que cette dégradation prend fin. L'influence de la dégradation sur le frottement se traduit par des instabilités dans l'évolution du coefficient de frottement : lors de la phase de montée en température, μ présente une chute jusque un minimum atteint à une température de 130°C, suivie d'une augmentation, marquée d'un palier entre 300 et 320°C, pour atteindre un maximum à une température de 380°C, maximum autour duquel il se stabilise ensuite. En termes d'usure, les phénomènes de dilatations thermiques ne permettent pas de mettre en évidence une influence de la dégradation du matériau mais il a pu être observé que la vitesse d'usure mesurée lors du palier en température est 10 fois plus importante que celle observée à température ambiante.

Les observations MEB, les analyses X-EDS et les mesures de profil menées sur la surface du pion après l'essai sur le matériau vierge ont permis de mettre en évidence le rôle des fibres et des particules comme support de la formation des plaques planes de troisième corps dans le contact. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par d'autres auteurs [Erikson, Osterle, Roussette]. Ainsi une mince couche de troisième corps se forme sur la surface arasée des particules minérales tandis que des plaques planes de troisième corps se développent sur les particules de cuivre et de laiton ainsi que sur les fibres minérales et métalliques.

Les plaques observées sont de différentes tailles. Les plus grandes plaques (jusqu'à 600 μm) s'appuient sur des particules métalliques de cuivre ou de laiton tandis que les plus petites sont formées sur les fibres minérales ou métalliques. Ces fibres apparaissent dénudées, émergent du matériau composite et restent ancrés en profondeur dans la matrice. Les plaques planes de troisième corps, qui se forment sur l'extrémité émergente des fibres, se développent pour atteindre une taille qui dépasse largement celle de la fibre. Le même phénomène de développement est également observé pour les plaques formées sur les particules, la plaque masquant le plus souvent la particule ou la fibre sur laquelle elle a pris appui.

La matrice apparaît sous l'aire frottée du contact qui est constituée par les particules minérales arasées et les plaques de troisième corps. Dans cette matrice apparaissent des fibres courtes qui ne présentent pas de trace de frottement, ainsi que des empreintes laissées par le déchaussement de fibres et de particules. En surface, des lits de poudre de troisième corps recouvrent partiellement la matrice, piégés dans le contact sous l'aire frottée.

L'aire frottée du contact est une surface extrêmement plate ($\Delta 10\mu\text{m}$ sur 5 mm^2) tandis que le relief des dépressions apparaît plus accidenté. La profondeur moyenne de ces dépressions sous l'aire frottée est de $45\pm 10\ \mu\text{m}$.

II.3. Comportement en frottement du matériau dégradé

Afin de déterminer l'influence sur le comportement en frottement de la dégradation subie par le matériau, le comportement en frottement d'un matériau dégradé est comparé à celui observé dans le paragraphe précédent pour un matériau vierge. Le matériau dégradé est obtenu après avoir fait subir à un matériau vierge une séquence d'essais et un refroidissement jusqu'à la température ambiante.

II.3.1. Coefficient de frottement et usure sur le matériau dégradé

L'utilisation du spectromètre de masse permet de déterminer si la résine phénolique du matériau composite poursuit sa dégradation lors de l'essai sur le matériau dégradé. La Figure II-13 présente l'évolution des dégagements gazeux au cours de l'essai sur matériau dégradé.

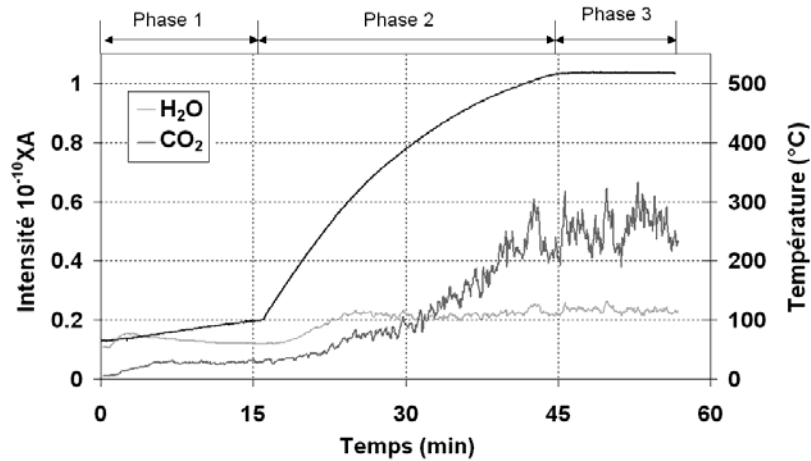


Figure II-13 : Evolution de l'intensité des dégagements gazeux et de la température du disque au cours de l'essai sur matériau dégradé

L'évolution du dégagement de CO_2 est identique à celle observée lors de l'essai sur matériau vierge alors que le dégagement d' H_2O reste faible sur toute la gamme de températures. Ce faible dégagement d' H_2O prouve que la résine phénolique ne se dégrade plus et que la première séquence subit par l'échantillon vierge a suffi pour le dégrader. La Figure II-14 présente l'évolution du coefficient de frottement au cours de l'essai sur matériau dégradé.

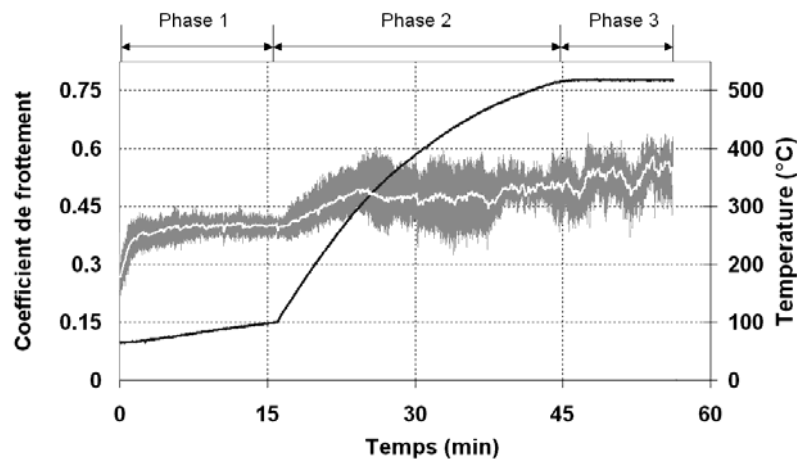


Figure II-14 : Evolution du coefficient de frottement μ et de la température T du disque au cours de l'essai sur matériau dégradé

Alors que la Phase 1 est similaire à celle observée au cours de la première séquence, d'importantes différences apparaissent au cours de la Phase 2. La chute de μ observée vers 130°C n'apparaît plus et à l'inverse, dès le début de la Phase 2 à 107°C , la valeur moyenne de μ augmente de manière régulière de 0,4 à 0,49, valeur atteinte pour $T = 320^\circ\text{C}$ ($t = 25$ min). Une baisse est ensuite observée jusque 0,46, suivie d'oscillations autour de cette valeur. La fin de la Phase 2 est marquée par une remontée qui se poursuit en Phase 3 pour atteindre 0,53 avec là encore des oscillations assez intenses.

La Figure II-15 présente les vitesses d'usure déterminées pour les Phases 1 et 3 des essais sur matériau vierge et sur matériau dégradé. Que ce soit pour la Phase 1 ou pour la Phase 3, les vitesses d'usure observées sur l'essai sur matériau dégradé sont quasiment doubles de celles observées sur matériau vierge avec des valeurs respectives pour la Phase 1 de 1,9 et 4,8 $\mu\text{m}/\text{min}$ et pour la Phase 3 de 38,1 et 63,2 $\mu\text{m}/\text{min}$.

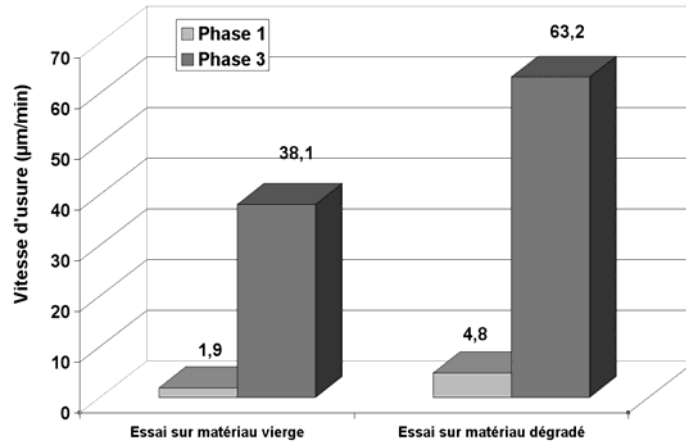
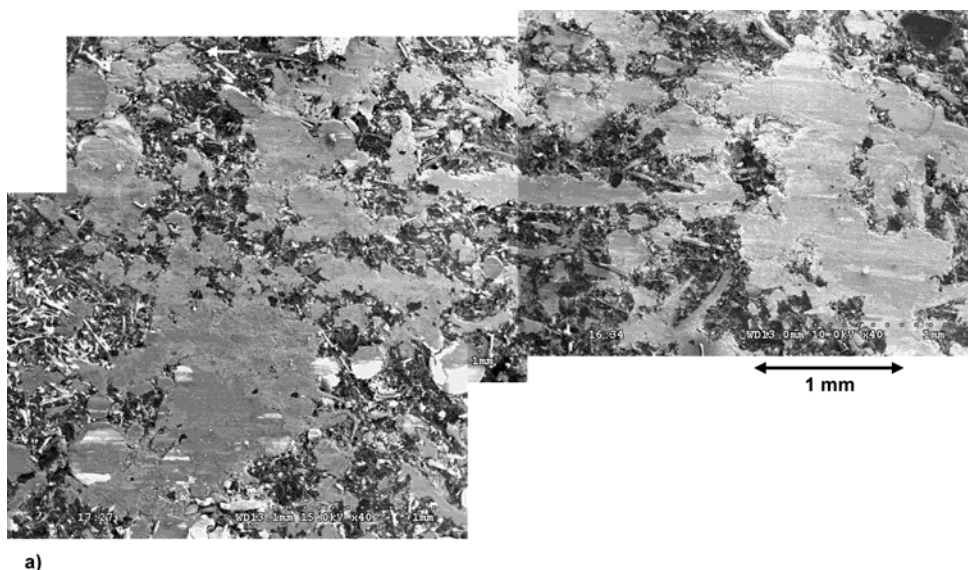


Figure II-15 : Vitesses d'usure du pion au cours des Phases 1 et 3 des essais sur matériau vierge et dégradé

II.3.2. Mécanismes physiques activés après l'essai sur matériau dégradé

Afin de mettre en évidence les mécanismes physiques de frottement activés au cours de l'essai sur matériau dégradé, la surface du pion a été soumise à des observations et des analyses. La Figure II-16 présente des observations réalisées en électrons secondaires (a) et en électrons rétrodiffusés (b) sur la surface du pion. Comparé aux observations menées après l'essai sur matériau vierge, la différence majeure qui peut être observée sur cet échantillon est la dimension des plaques. La taille des plaques observées y est beaucoup plus importante, pouvant dépasser largement le millimètre. Par ailleurs, les fibres minérales arasées y sont moins nombreuses et la matrice reste toujours visible entre les zones portantes, également marquée d'empreintes laissées par le déchaussement de particules.



a)

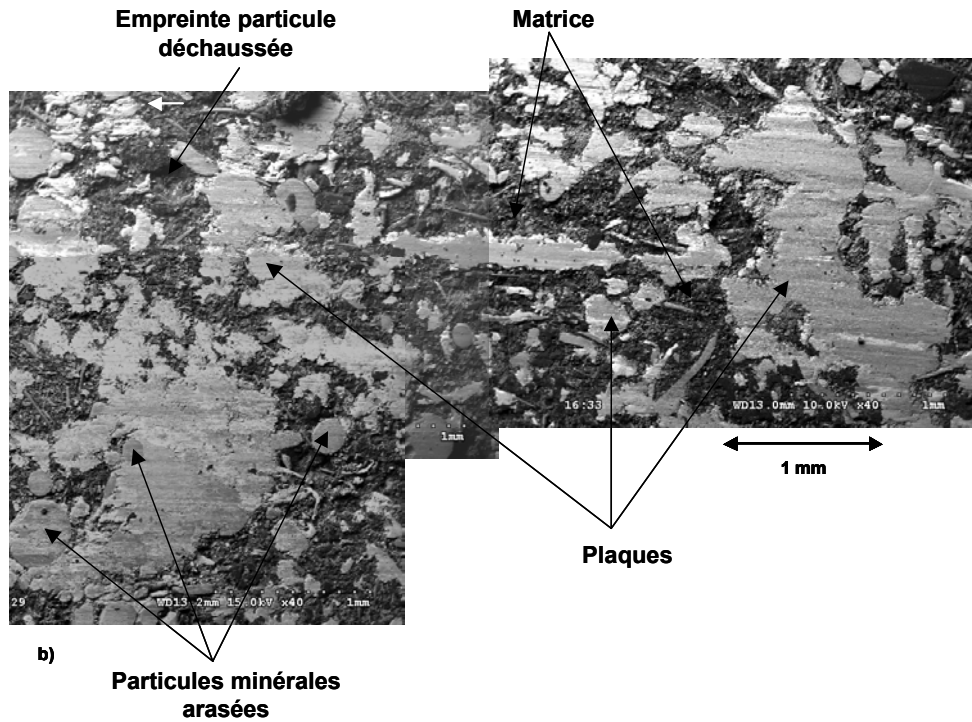
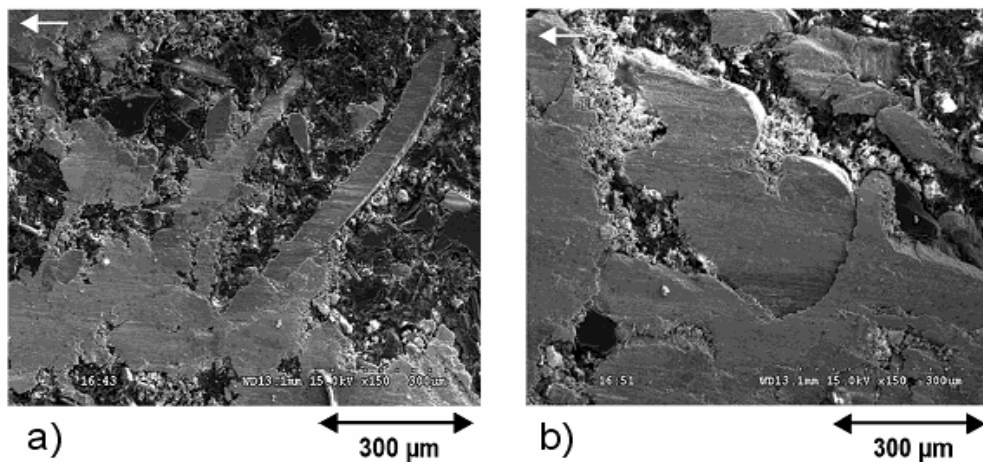


Figure II-16 : Observations au MEB de la surface frottante du pion après l'essai sur matériau dégradé
 a) en électrons secondaires, b) en électrons rétrodiffusés

Des observations MEB ont été menées à plus fort grossissement. La Figure II-17a montre, comme cela l'avait été observé après l'essai sur matériau vierge, des fibres arasées par le frottement sur lesquelles se forme un troisième corps compact. Un phénomène non observé sur les précédents échantillons peut être mis en évidence : un lit de poudre compacté est accumulé en amont des fibres dans le sens de glissement. Les fibres servent donc de support aux plaques planes de troisième corps mais également d'obstacle aux poudres. La croissance des plaques par accumulation et compaction des poudres conduit au recouvrement des particules minérales comme cela est observé sur la Figure II-17b. Ce phénomène peut être une explication au faible nombre de particules minérales arasées observées à la surface de l'échantillon de matériau composite. Le déchaussement de particules laissant les empreintes observées dans la matrice peuvent également expliquer le faible nombre de ces particules en surface.



CHAPITRE II : INFLUENCE DE LA DEGRADATION DU COMPOSITE ORGANIQUE SUR SON COMPORTEMENT EN FROTTEMENT

Figure II-17 : a) accumulation et compaction de poudre en amont de fibres, b) coalescence de plaques formées par compactage de poudre recouvrant une particule minérale arasée observées au MEB en électrons secondaires

Une zone où une plaque de taille importante s'est formée a été observée au MEB en électrons rétrodiffusés et en EDS en mode 'imaging', les résultats sont présentés en Figure II-18. Sur l'image en électrons rétrodiffusés, le dégradé de nuances de gris révèle les variations de composition, du plus clair pour les éléments lourds au plus foncé pour les éléments les moins lourds. La présence de la matrice entre les plaques de 3^{ème} corps et les particules minérales arasées est mise en évidence par la détection de l'élément C. La matrice est en effet riche en cet élément. Les intensités maximales de la cartographie de cet élément correspondent à la présence de particules de graphite. La cartographie de l'élément O permet de mettre en évidence la présence de cet élément non seulement dans les constituants minéraux mais également dans les plaques de troisième corps ou cet élément est présent dans les différents oxydes formés. La plaque observée présente un patchwork de composition résultant de sa formation par coalescence de plusieurs plaques de compositions différentes.

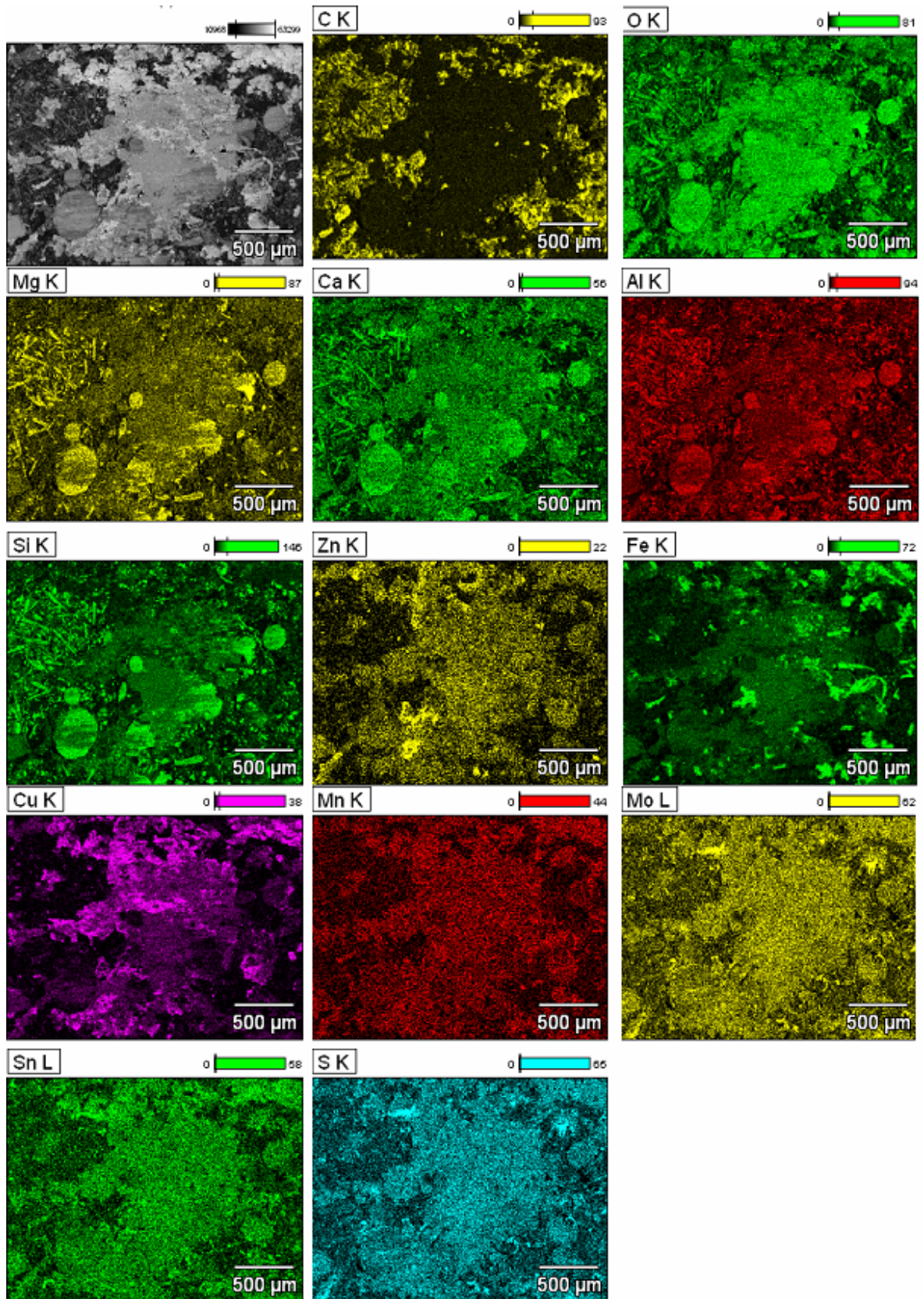


Figure II-18 : Observation d'une plaque de troisième corps formée par coalescence : observations MEB en électrons rétrodiffusés et cartographie des différents éléments en EDS

L'analyse en EDS permet de déterminer la nature des éléments en présence. Les éléments Si, Al, Mg et Ca contenus dans les constituants minéraux sont identifiés sous différentes formes. Ces éléments sont contenus dans les fibres minérales courtes observées à la surface de la matrice, dans les particules minérales arasées de forme circulaire apparaissant à la surface et également dans la plaque de troisième corps analysée où leur recouvrement partiel ne laisse plus apparaître leur forme circulaire. Au sein de la plaque de troisième corps, l'importante présence d'éléments métalliques tels Fe, Cu et Zn est bien mise en évidence. La présence de ces éléments métalliques est localisée sur la plaque observée révélant la présence des constituants du matériau composite telles des particules de cuivre et de laiton ou des fibres d'acier qui servent de support à la formation des plaques de troisième corps. Les autres éléments constituant le matériau composite, Sn, S et Mo, sont identifiés de manière homogène à la surface de la plaque.

La Figure II-19b présente le profil d'une zone représentative de la surface frottée observée au MEB en électrons rétrodiffusés sur la Figure II-19a. L'aire frottée de la surface apparente de contact, mise en évidence en clair sur le profil, est principalement constituée des plaques planes de taille importante. De même que pour les essais à une séquence, cette aire frottée est très plate, encadrée par deux plans parallèles distants de 10 μm sur une surface apparent de plus de 8 mm^2 ici.

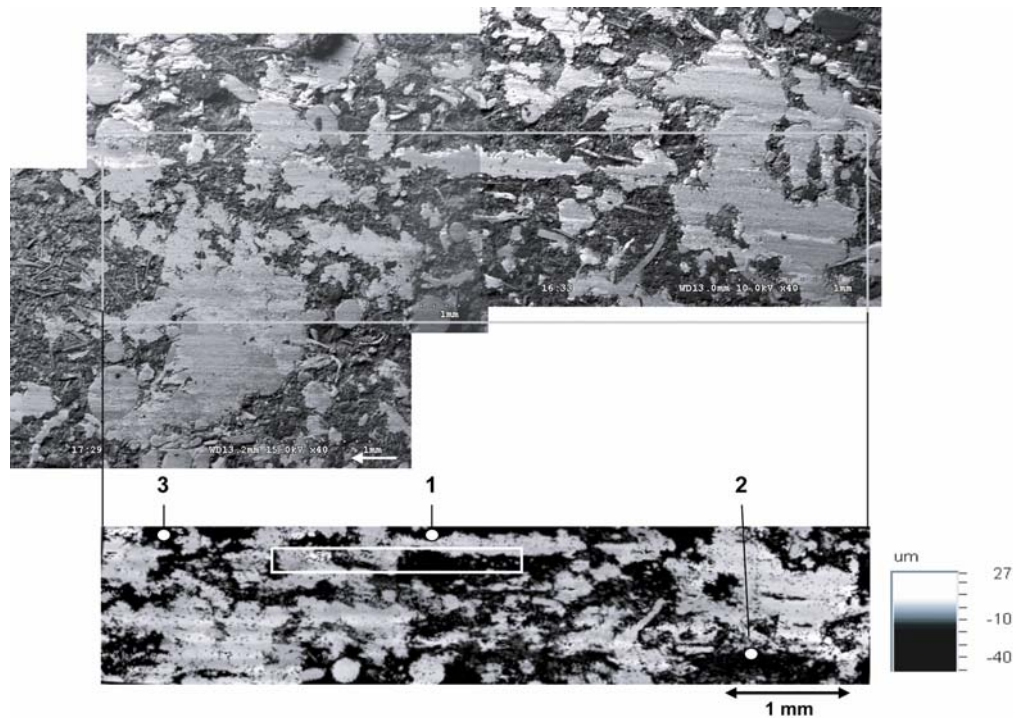


Figure II-19 : Profil de la surface frottante du pion après l'essai sur matériau dégradé

a) image MEB en électrons rétrodiffusés de la zone de mesure,

b) vue de dessus du profil, repérage et délimitation en blanc de zones de mesures locales à fort grossissement.

Des mesures locales à plus fort grossissement ont été réalisées afin de caractériser le relief des dépressions observées sous l'aire frottée. Les positions des différentes zones de mesures locales sont repérées sur la mesure en profilométrie à faible grossissement présentée en Figure II-19b : trois mesures ponctuelles numérotées de 1 à 3 ainsi qu'une zone de mesure étendue délimitée en blanc. Les résultats des mesures pour cette dernière zone sont présentés en vue 2D et 3D respectivement en Figure II-20a et b. Les profondeurs mesurées sur le pion utilisé au cours de l'essai sur matériau dégradé sont légèrement plus élevées que celles obtenues pour les essais à une séquence avec des valeurs comprises entre 50 et 136 μm (53, 60 et 136 μm pour les zones

numérotées respectivement 1, 2 et 3 Figure II-18b), les mesures les plus fréquentes étant dans l'intervalle [50 75] μm . La profondeur des dépressions apparaît donc plus grande d'environ 20 μm en moyenne par rapport à celle mesurée pour l'essai sur matériau vierge.

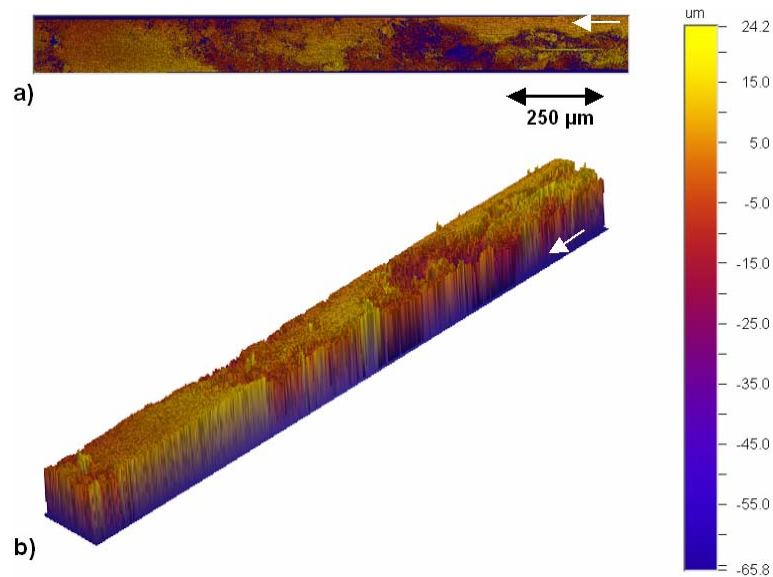


Figure II-20 : Profil de la surface frottante du pion après l'essai sur matériau dégradé (zone délimitée en blanc Figure II-19b) : vues a) de dessus et b) 3D du profil

La Figure II-21 présente en profilométrie une plaque plane de troisième corps ayant atteint une taille de 400 μm (a) image MEB de la plaque plane et vues b) 2D et c) 3D du profil). L'aire frottée apparaît en couleur clair sur le profil, au dessus de la surface environnante de couleur plus foncée et par endroit recouverte de poudre. La profondeur maximale mesurée est d'une cinquantaine de μm . La plaque observée présente des traces de glissement ainsi qu'une ligne de fragmentation à sa surface.

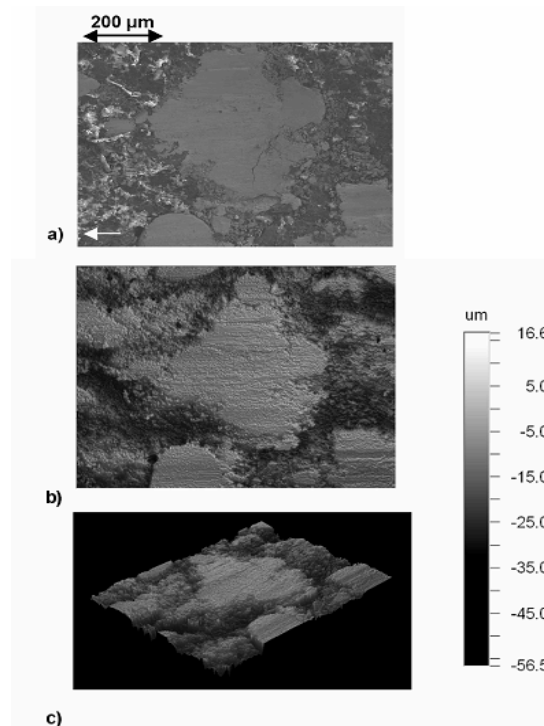


Figure II-21 : Profilométrie d'une plaque de troisième corps : a) image MEB en électrons secondaires, vues b) 2D et , c) 3D du profil

II.3.3. Conclusions

Au cours de l'essai sur le matériau dégradé, l'utilisation du spectromètre de masse a permis de contrôler le dégagement d'H₂O. Celui-ci est resté faible tout au long de l'essai confirmant que le matériau a été dégradé au cours de la première séquence et que la dégradation ne se produit plus au cours du nouvel essai.

L'évolution du coefficient de frottement au cours de la montée en température ne présente pas les perturbations observées au cours de l'essai sur matériau vierge : à partir du début de la Phase 2, le coefficient de frottement augmente de manière régulière de 0,4 à 0,49, valeur atteinte pour T = 320°C, puis se stabilise à cette valeur jusque la fin de l'essai. Ainsi, les transformations induites par la première séquence sur le matériau vierge et par son refroidissement ont donc modifié le comportement tribologique du contact observé sur le matériau dégradé en termes de coefficient de frottement. Le comportement à l'usure a lui aussi été modifié puisque les vitesses d'usure mesurées sur les Phases 1 et 3 sont pour l'essai sur matériau dégradé doubles de celles observées sur matériau vierge. Cette mesure de vitesse d'usure prend en compte les usures des premiers corps ainsi que l'épaisseur du troisième corps. Après l'essai sur matériau dégradé, l'usure du disque est inférieure à 10 µm alors que celle du pion est de l'ordre du millimètre. De plus, les épaisseurs de troisième corps observées ne dépassent généralement pas 50 µm. On peut alors estimer que la vitesse d'usure mesurée correspond à la vitesse d'usure du pion et donc du matériau composite à matrice organique.

Les investigations menées sur la surface du pion après l'essai sur matériau dégradé ont permis l'observation des mêmes mécanismes de formation du troisième corps que ceux mis en évidence après les essais sur matériau vierge. Les plaques planes de taille importante se forment sur les particules métalliques et celles de plus petite taille sur les fibres métalliques et minérales. Les fibres minérales présentent des surfaces arasées couvertes d'une fine couche de troisième corps. Un lit de poudre est accumulé dans des dépressions entre les plaques et les particules arasées.

Les mécanismes de croissance des plaques ont été observés après l'essai sur matériau dégradé : des poudres sont accumulées en amont des plaques et des fibres qui servent alors d'obstacle, elles sont compactées dans le contact pour former de nouvelles plaques. La croissance des plaques peut conduire d'une part au recouvrement des particules minérales arasées mais également à la formation de plaque d'une taille supérieure au mm par coalescence de plusieurs plaques. La cartographie en EDS d'une plaque de grande taille a montré un patchwork de composition du à la coalescence de plusieurs plaques formées sur les constituants de nature différente. La croissance des plaques est alimentée par un lit de poudre plus important que celui observé après les essais sur matériau vierge.

Les mesures réalisées en profilométrie interférométrique montrent que les dépressions sous l'aire frottée sont plus profondes que celles observées après les essais sur matériau vierge d'environ 20 µm.

II.4. Conclusions

Dans la première partie de ce chapitre, la dégradation du matériau composite lorsqu'il est sollicité en température a été étudiée en thermogravimétrie et en spectrométrie de masse. Le début de la dégradation du matériau est détectée à 300°C et correspond à la dégradation de la résine phénolique. Cette dégradation produit des dégagements d'H₂O et de CO₂ présentant un pic à 437°C. Cette étude de la dégradation du matériau en température permet donc de définir les paramètres des essais de frottement en température réalisés sur le tribomètre de frottement continu. Ainsi, la température de consigne du système de chauffage est fixée à 515°C, cette température restant dans la gamme d'utilisation du système et dépassant la température du pic de

dégagements gazeux. Il a également été défini que les dégagements simultanés d'H₂O et de CO₂ marque la dégradation de la résine phénolique.

Dans la seconde partie, un échantillon de matériau vierge a été soumis à un essai de frottement afin d'étudier l'influence sur le contact de la dégradation lorsqu'elle se produit. Lors de la montée en température, l'analyse des émissions gazeuses au contact par spectrométrie de masse a montré que la dégradation de la résine phénolique se produit avec production d'H₂O et de CO₂. Cette dégradation de la résine, qui constitue la matrice liant les constituants du matériau composite, a des répercussions sur le comportement tribologique du matériau lorsque celui-ci est sollicité en température. En effet, le coefficient de frottement est perturbé dans son évolution au cours de la montée en température. En termes de vitesse d'usure, le principe de la mesure ne permet pas d'identifier de variation au cours de la montée en température mais les vitesses d'usure observées au cours de la Phase 3 de palier en température sont 20 à 30 fois supérieures à celle observées au cours de la Phase 1 à température ambiante. Les investigations menées sur les surfaces frottantes des pions après l'essai sur matériau vierge ont permis de mettre en évidence les mécanismes de formation du troisième corps. La surface frottante est formée de particules minérales arasées couvertes d'une fine couche de troisième corps et de plaques planes formées sur des particules métalliques et sur des fibres minérales et métalliques. La formation de ces plaques est alimentée par un lit de poudre qui recouvre partiellement la matrice apparaissant sous la surface de frottement à une profondeur de 45 µm.

Dans la troisième partie, un échantillon dégradé par un premier essai et refroidi à température ambiante est soumis à un nouvel essai de frottement en température. Comme le montrent les résultats de l'essai, ces modifications du matériau subies au cours du premier essai ont des conséquences sur son comportement. Les modifications du matériau sont confirmées lors de la montée en température au cours de laquelle les réactions source d'eau ne se produisent pas. Les modifications du comportement tribologique sont mises en évidence en termes de coefficient de frottement qui présente une bonne stabilité au cours de la montée en température ainsi qu'en termes de vitesses d'usure dont les mesures au cours des Phases 1 et 3 sont le double de celles obtenues pour la première séquence. Ces modifications du comportement tribologique peuvent être expliquées par des investigations menées sur la surface du pion et dont les résultats sont présentés sous forme schématique en Figure II-22.

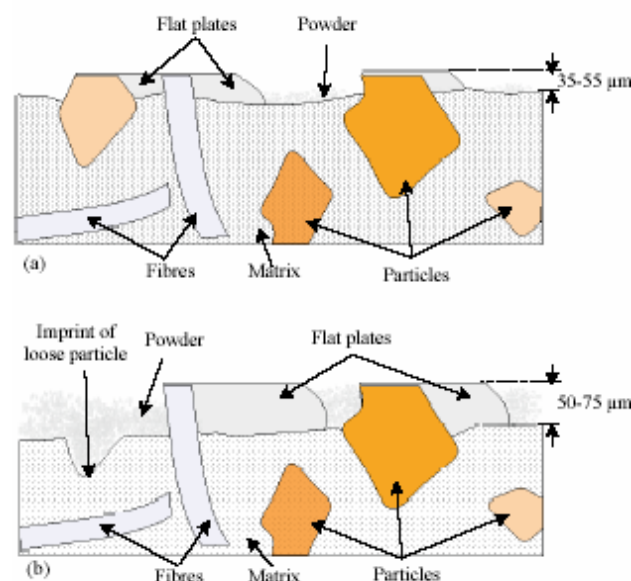


Figure II-22 : Schématisation des résultats des investigations menées sur le matériau composite après a) l'essai sur matériau vierge, b) l'essai sur le matériau dégradé

CHAPITRE II : INFLUENCE DE LA DEGRADATION DU COMPOSITE ORGANIQUE SUR SON COMPORTEMENT EN FROTTEMENT

Ces investigations permettent de mettre en évidence, outre le processus de formation des plaques troisième corps, leur processus de croissance. Des lits de poudre, accumulés en amont des fibres et des plaques dans le sens du glissement, sont compactés dans le contact pour former de nouvelles plaques. La formation de nouvelles plaques et la croissance des plaques conduisent par coalescence à la formation de plaques de taille millimétrique. Les lits de poudres compactés conduisant à la formation des plaques sont alimentés par détachement de matière du matériau composite, fragilisé par la première séquence et le retour à température ambiante. Les valeurs élevées de vitesses d'usure confirment l'important débit source de particules alimentant les lits de poudre. Les modifications subies par le matériau influent également sur la profondeur des dépressions mesurées sous l'aire frottée avec des valeurs supérieures de 20 μm à celle observées précédemment. Cette différence de profondeur est cohérente avec un débit source de troisième corps plus important après l'essai sur matériau dégradé qu'après l'essai sur matériau vierge.

CHAPITRE II : INFLUENCE DE LA DEGRADATION DU COMPOSITE ORGANIQUE SUR
SON COMPORTEMENT EN FROTTEMENT

CHAPITRE III. ETUDE DU CONTACT DISQUE GARNITURE SOUS SOLLICITATIONS SEVERES DE FREINAGE

III.1. Influence sur le contact d'une sollicitation sévère de type freinage d'arrêt isolé.....	63
III.1.1. Influence sur les phénomènes thermomécaniques : apparition de points chauds.....	63
III.1.2. Perturbations du coefficient de frottement	71
III.1.3. Mécanismes physiques activés en freinage d'arrêt isolé.....	72
III.1.4. Conclusions	82
III.2. Influence sur le contact d'une sollicitation sévère de type succession de freinages avec cumul.....	84
III.2.1. Influence sur les phénomènes thermomécaniques : évolution de la bande chaude.....	84
III.2.2. Modification du coefficient de frottement	90
III.2.3. Mécanismes physiques activés en succession de freinages.....	92
III.2.4. Conclusions	96

III.1. Influence sur le contact d'une sollicitation sévère de type freinage d'arrêt isolé

Le comportement du couple disque-garniture est étudié dans un premier temps dans le cas de freinages d'arrêt isolés. Deux freinages d'arrêt isolés rencontrés en service sur un matériel de type TER ont été reproduits sur le tribomètre de freinage du LML à l'aide des règles de changement d'échelle définies au paragraphe I.2.2. : un freinage d'arrêt à basse énergie et un freinage d'arrêt à haute énergie. Les freinages d'arrêt à basse et haute énergie sont représentatifs respectivement de freinages réalisés à des vitesses initiales de 80 et 160 km.h⁻¹. Le freinage d'arrêt à haute énergie correspond à une sollicitation sévère atteinte en un unique freinage. Au cours de ces deux freinages, la sollicitation thermique est évaluée d'une part par l'observation du rayonnement infrarouge de la surface du disque et d'autre part par la mesure de températures de masse dans le disque et le patin. L'évolution du coefficient de frottement permet d'étudier l'influence de la sévérité du freinage sur le comportement tribologique du couple de matériaux. Enfin, la caractérisation des surfaces après essai permet d'analyser les mécanismes de frottement mis en jeu au cours des deux types de freinage.

III.1.1. Influence sur les phénomènes thermomécaniques : apparition de points chauds

La sollicitation thermique au cours des freinages d'arrêt isolés est étudiée par l'intermédiaire de deux types de mesures. D'une part, l'utilisation d'une caméra infrarouge au cours des essais permet d'observer les gradients thermiques évoluant à la surface du disque pendant le freinage. D'autre part, des mesures de température par thermocouples permettent de suivre l'évolution des températures de masse dans le disque et le patin et ainsi d'évaluer la sévérité de la sollicitation thermique atteinte pendant les essais.

III.1.1.1. Observation de la bande chaude et des points chauds

Rappelons que, compte tenu de la méconnaissance de l'émissivité de la piste de frottement du disque pendant les essais de freinage, les mesures du rayonnement infrarouge par thermographie sont présentées en termes de luminance exprimée en DL (Digital Level) sans être converties en température de surface. Toutefois, on peut admettre que les gradients de luminance, donc les gradients de rayonnement infrarouge, sont représentatifs des gradients thermiques induits par la dissipation d'énergie.

La Figure III-1 présente le rayonnement infrarouge d'une même zone du disque observée par caméra infrarouge à 9 instants du freinage d'arrêt à basse énergie répartis sur la durée totale de freinage de 22,5 s. Les niveaux de gris correspondent à des niveaux de luminance croissants du gris clair au gris foncé. En début de freinage ($t = 1,5$ s sur la Figure III-1a), une bande chaude continue se forme circonférentiellement sur le rayon extérieur de la piste de frottement du disque. De $t = 5$ à 15 s (Figure III-1b-f), la bande chaude migre vers l'intérieur de la piste du disque. Cette migration s'accompagne de l'apparition de gradients thermiques circonférentiels locaux au sein de la bande chaude. Au cours de la migration de la bande chaude, ces gradients s'étendent et s'intensifient. La présence de ces gradients est due à des localisations circonférentielles du contact dans la bande chaude compte tenu du battement du disque induit par les imperfections de sa géométrie. Après $t = 15$ s (Figure III-1g-h), la bande chaude reste localisée dans la partie

intérieure de la piste et diminue en intensité. A la fin du freinage (Figure III-1i), les rayonnements infrarouges de la surface du disque s'homogénéisent.

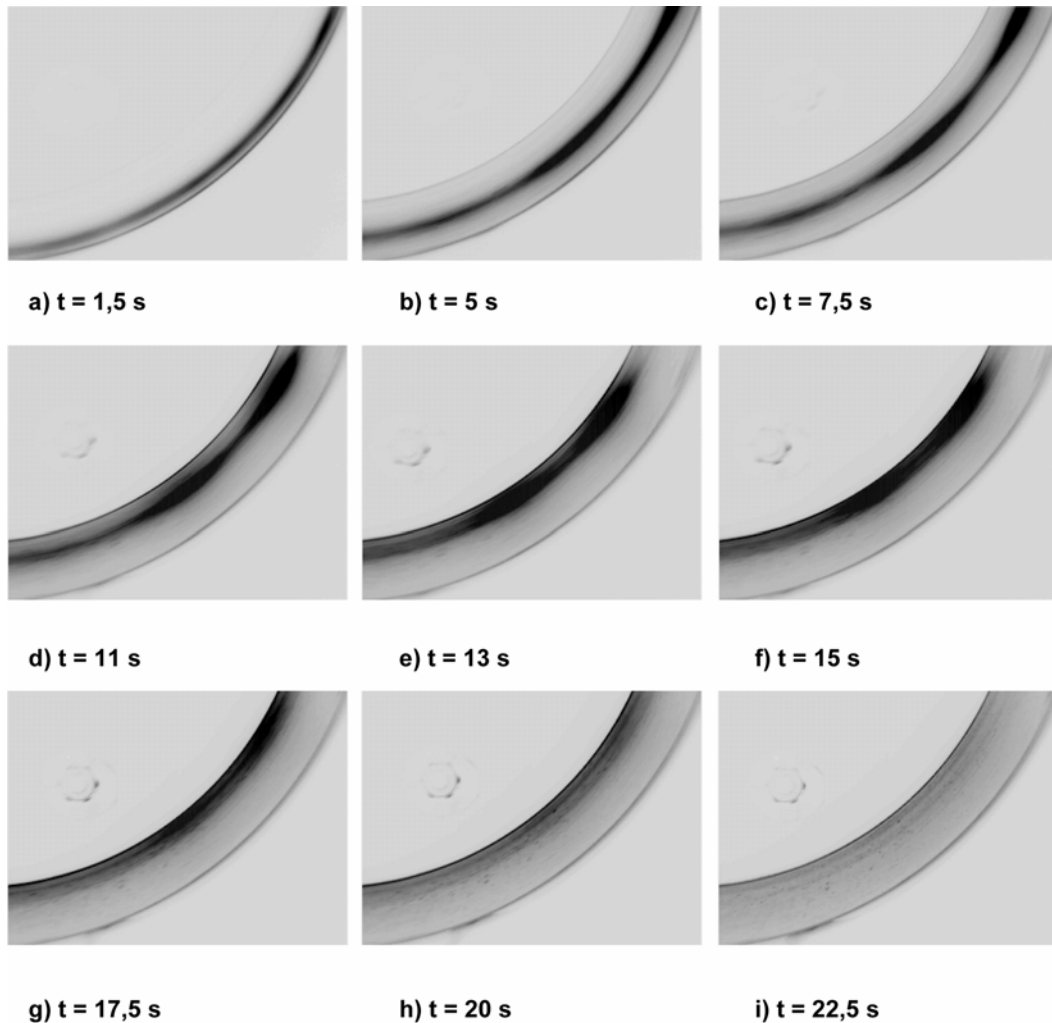


Figure III-1 : Rayonnement infrarouge d'une même zone du disque à 9 instants du freinage d'arrêt à basse énergie

Afin d'améliorer la perception de la dynamique des gradients thermiques de surface mis en jeu, il est intéressant de suivre l'évolution au cours du temps de la luminance. Une moyenne circonférentielle de la luminance a été calculée sur 4 arcs positionnés sur différents rayons de la piste, numérotés de 1 à 4 du rayon extérieur au rayon intérieur. Les rayons 1, 2 et 4 correspondent respectivement aux rayons extérieur ($r = 108$ mm), moyen ($r = 100$ mm) et intérieur ($r = 92$ mm) de la piste de frottement. Le rayon 3 est positionné entre les rayons moyen et intérieur à $r = 96$ mm.

Les évolutions des moyennes de la luminance sont présentées en fonction du temps en Figure III-2. Au début du freinage, des niveaux élevés de luminance avec un maximum de 12 000 DL sont atteints sur le rayon 1 extérieur (Figure III-2a) alors que le reste de la piste reste à de bas niveaux de luminance de l'ordre de 3 000 DL. Ceci correspond à l'apparition de la bande chaude sur le rayon extérieur, le reste de la piste étant très peu affecté par la dissipation de chaleur. Jusque $t = 15$ s, les niveaux élevés de luminance vont se déplacer du rayon 1 extérieur jusqu'au rayon 4 intérieur (Figure III-2a-d) avec une augmentation des valeurs maximales atteintes de 12 000 à 14 000 DL. Après $t = 15$ s et jusqu'à la fin du freinage, les niveaux maximaux de luminance se localisent dans la partie intérieure de la piste (rayons 3 et 4 sur les Figures III-2c et

d) en décroissant avec le temps tandis que la luminance de la partie extérieure de la piste se stabilise sur les rayons moyen et extérieur respectivement autour de 6 000 et 5 000 DL. Ainsi, après avoir migré jusqu'au rayon extérieur en début de freinage, la bande chaude resté localisée dans la partie intérieure de la piste de frottement en fin de freinage, en s'élargissant et en perdant en intensité.

L'amplitude des fluctuations des courbes autour de leur évolution moyenne est révélatrice de l'intensité des gradients circonférentiels de la luminance, donc des phénomènes de localisation thermique circonférentielle. Sur chaque rayon, cette amplitude atteint son maximum au moment du passage de la bande chaude, ce qui montre que les gradients thermiques se forment dans cette bande, en cohérence avec les thermogrammes présentés en Figure III-1.

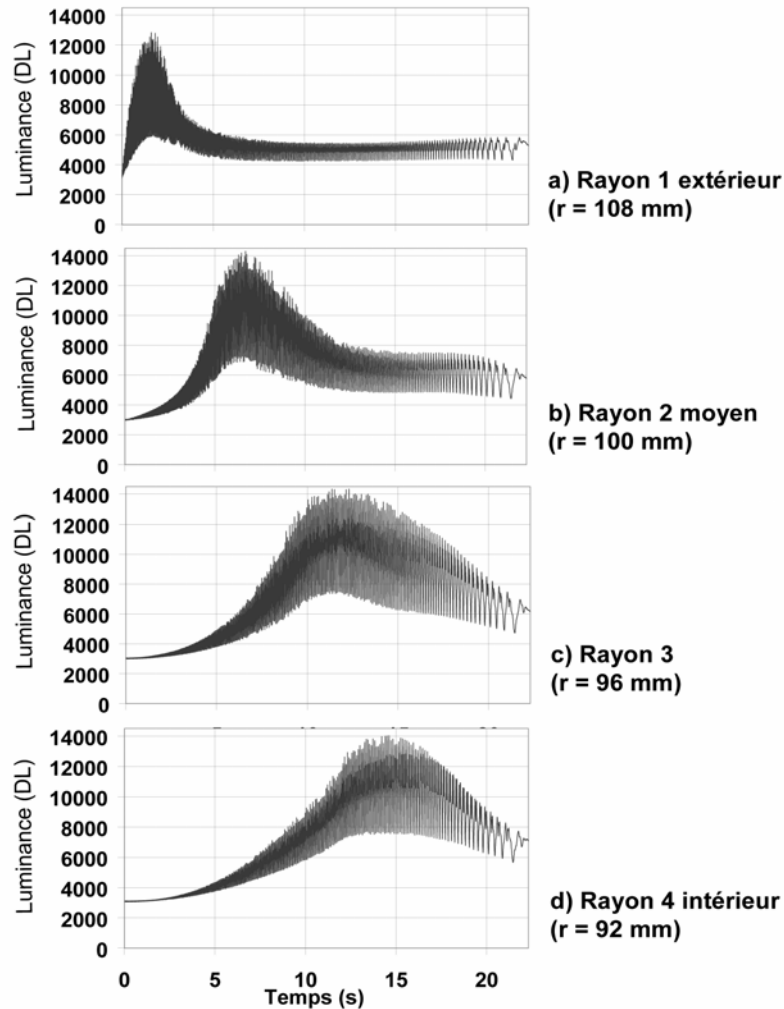


Figure III-2 : Evolution au cours du temps de la moyenne de la luminance (en DL) pour les rayons numérotés de 1 à 4 pendant le freinage d'arrêt à basse énergie

La température de luminance est obtenue en convertissant la luminance en température avec une émissivité de 1. Au cours du freinage d'arrêt isolé à basse énergie, la température moyenne de luminance calculée sur un huitième de la piste atteint la valeur maximale de 85°C. Il faut rappeler que la température de luminance fournit la valeur minimale que peut prendre la température de surface du disque : pour un choix d'émissivité plus faible, la conversion de la luminance en température donnera des températures supérieures aux températures de luminance.

Voyons à présent les résultats obtenus pour un freinage d'arrêt à haute énergie. La Figure III-3 présente les thermogrammes d'une même zone du disque correspondant à 9 instants du freinage d'arrêt à haute énergie (durée totale du freinage de 53,1 s).

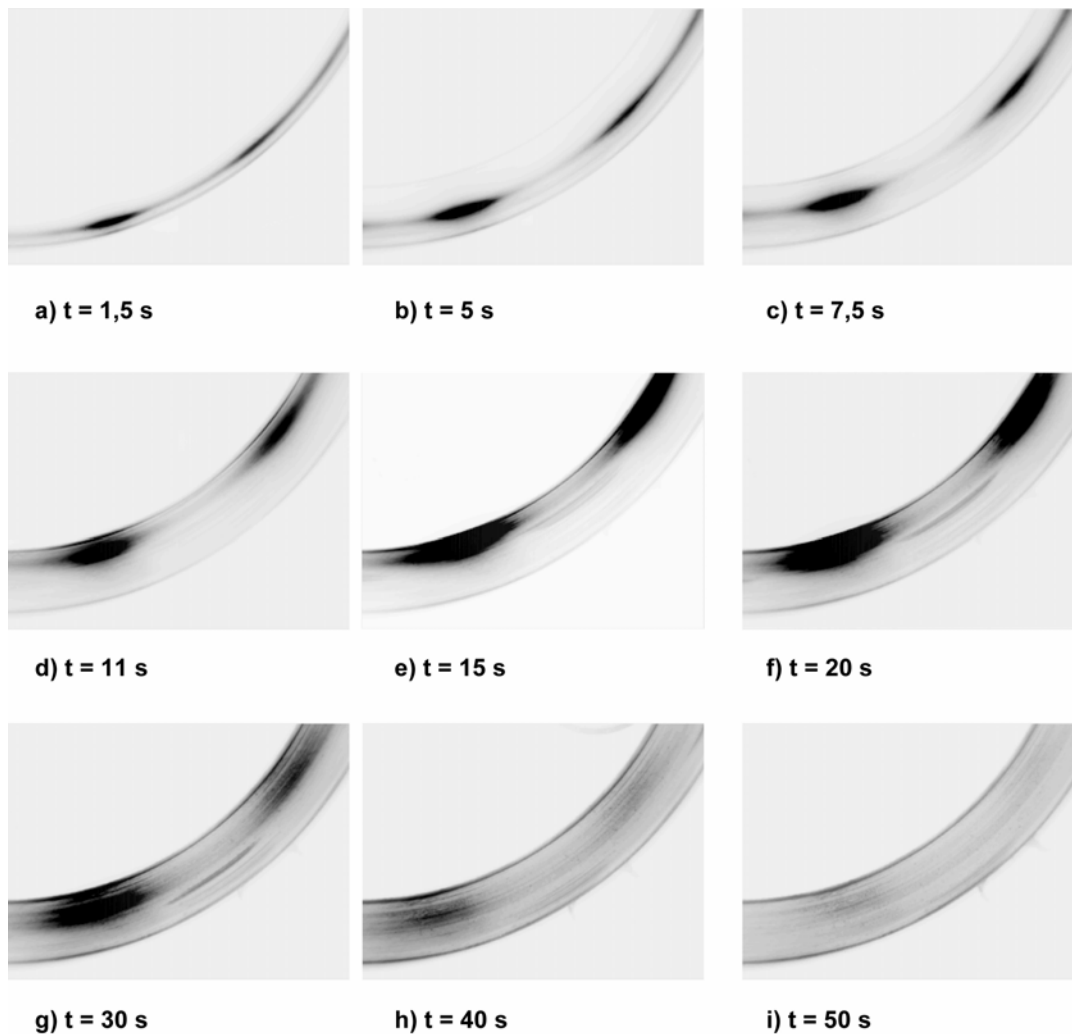


Figure III-3 : Rayonnement infrarouge d'une même zone du disque à 9 instants du freinage d'arrêt à haute énergie

Une bande chaude apparaît sur le rayon extérieur de la piste du disque au début du freinage puis migre radialement du rayon extérieur au rayon intérieur, cette migration s'accompagnant encore de la formation et de l'intensification de gradients thermiques circonférentiels ($t = 5$ à 11 s, Figure III-3a-d). De $t = 11$ s à $t = 15$ s (Figure III-3d-e), la bande chaude est localisée sur le rayon intérieur et les gradients thermiques circonférentiels évoluent en points chauds de forte intensité. La position circonférentielle de ces points chauds reste fixe jusqu'à la fin du freinage. A $t = 5$ s, un arc sombre apparaît à la surface du disque entre les points chauds sur un rayon légèrement extérieur à celui des points chauds. La Figure III-4 présente la reconstitution du thermogramme complet du disque à $t = 20$ s à partir de plusieurs images infrarouges successives. Ce thermogramme montre la répartition régulière des 7 points chauds sur la circonférence du disque. Les arcs sombres formés entre chaque paire de points chauds forment une bande sombre circulaire discontinue. De $t = 20$ à 40 s (Figure III-3f-h), les points chauds grossissent, se déplacent vers l'extérieur de la piste et perdent en intensité. Simultanément, la bande sombre circulaire discontinue s'intensifie et accompagne le déplacement radial des points chauds vers l'extérieur de la piste. A $t = 50$ s (Figure III-3i), c'est à dire à la fin du freinage, les points chauds

ont presque totalement disparu : le rayonnement infrarouge de la piste est devenu quasi homogène, la bande sombre circulaire discontinue observée entre les points chauds ayant également disparu.

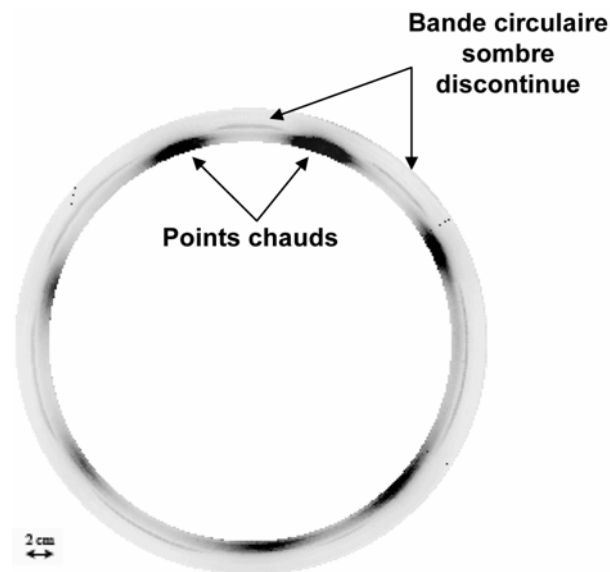


Figure III-4 : Reconstitution du rayonnement infrarouge de la piste de frottement du disque à $t = 20s$.

L'évolution au cours du temps de la luminance a été suivie par l'intermédiaire de moyennes circonférentielles calculées de la même manière que dans le cas du freinage d'arrêt isolé à basse énergie et ceci sur les mêmes rayons numérotés de 1 à 4. Les évolutions des niveaux de luminance ainsi calculés sont présentées en Figure III-5. Il est important de noter que les filtres et le temps d'intégration de la caméra infrarouge ont été choisis pour chaque freinage de manière à utiliser toute la plage de mesure de la caméra. Les niveaux de luminance exprimés en DL ne peuvent donc pas être directement comparés entre le freinage à basse énergie et le freinage à haute énergie. Les niveaux élevés apparaissent tout d'abord sur le rayon 1 à l'extérieur de la piste (Figure III-5a). La courbe présente un pic avec des valeurs maximales de 9 000 DL. Ce pic correspond à la formation en début de freinage de la bande chaude à l'extérieur de la piste. Ce pic est également visible sur les rayons 2 et 4 (Figure III-5b et c) à des instants successifs correspondant à la migration de la bande chaude vers le rayon intérieur. Les valeurs maximales de luminance augmentent légèrement pour atteindre 10 000 DL. Sur la Figure III-5d, le pic observé précédemment n'est plus visible et les niveaux de luminance sont nettement plus élevés, atteignant des valeurs maximales de 14 000 DL à $t = 15 s$. Ces niveaux élevés sont dus à la très forte intensité des points chauds. Ensuite et jusqu'à la fin du freinage, ces niveaux élevés de luminance se déplacent vers l'extérieur de la piste tout en diminuant d'intensité (Figure III-5d-a). Ceci correspond à l'expansion et au déplacement des points chauds vers le rayon extérieur.

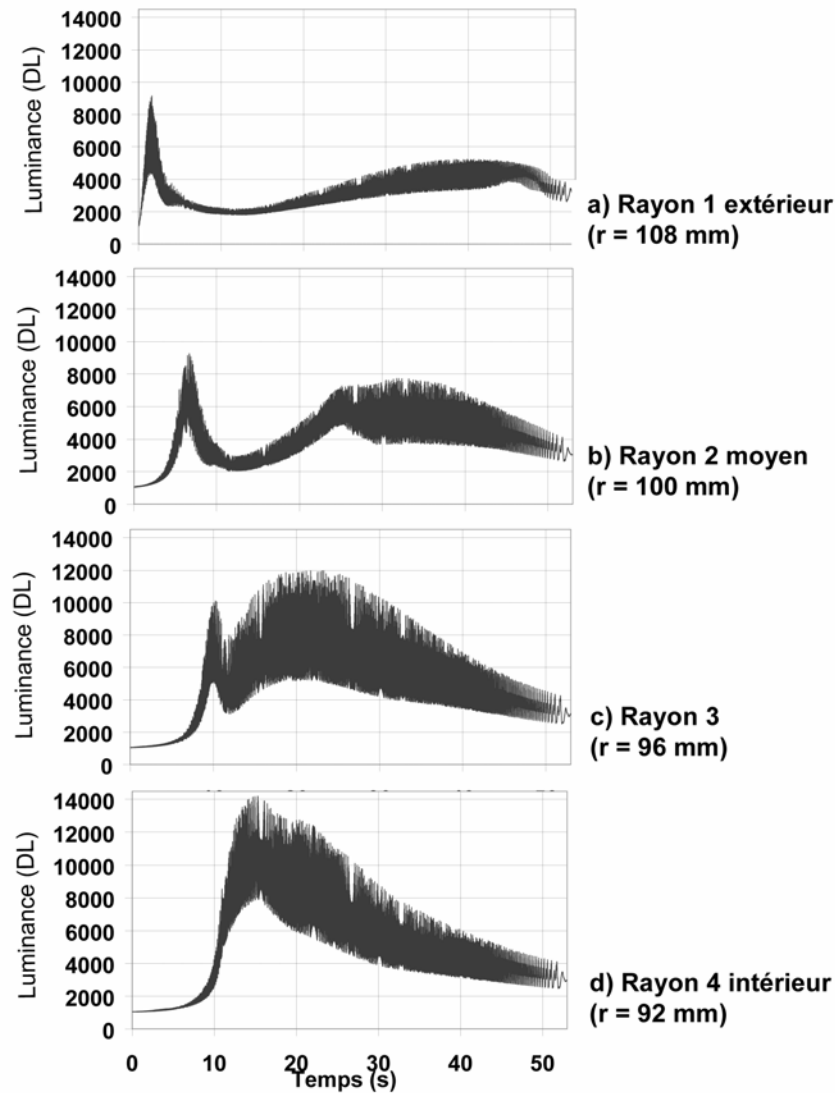


Figure III-5 : Evolution au cours du temps de la moyenne de la luminance (en DL) pour les rayons numérotés de 1 à 4 pendant le freinage d'arrêt à haute énergie

La moyenne sur un huitième de la piste de la température de luminance atteint une valeur maximale de 200°C au cours du freinage à haute énergie.

III.1.1.2. Validation des niveaux thermiques atteints

La sollicitation thermique imposée au cours des deux freinages d'arrêt isolés est suivie par l'intermédiaire de thermocouples placés dans le disque et la garniture à différentes profondeurs sous la surface sur le rayon moyen de frottement. Dans le disque, quatre thermocouples permettent de mesurer les températures atteintes dans deux zones nommées zone n°1 et zone n°2 : deux thermocouples sont placés dans chaque zone, l'un est placé à 2 mm et l'autre à 5 mm sous la surface frottante. Dans le patin, un thermocouple est placé à 2 mm sous la surface frottante.

La Figure III-6 présente les températures atteintes dans le disque (T_d) pour les zones n°1 et 2 ainsi que celles atteintes dans le patin (T_p). La température de masse du patin croît à partir de $t = 7,5$ s et atteint un maxima de 77,7°C. Les températures de masse mesurées dans le disque

augmentent dès les premières secondes de freinage. Les températures sont groupées en fonction de la zone de mesure et pour chaque zone, la température à 2 mm est supérieure à celle mesurée à 5 mm en début de freinage puis la tendance s'inverse. Les températures maximales mesurées à 2 et 5 mm de la surface sont respectivement de 101,6 et 104,7°C dans la zone n°1 et de 96,3 et 95,4°C dans la zone n°2. Les courbes apparaissent groupées en fonction de la zone de mesure : les températures mesurées dans la zone 1 sont plus élevées que celles mesurées dans la zone 2. Cette différence de température entre les deux zones s'explique par la présence des gradients thermiques circonférentiels.

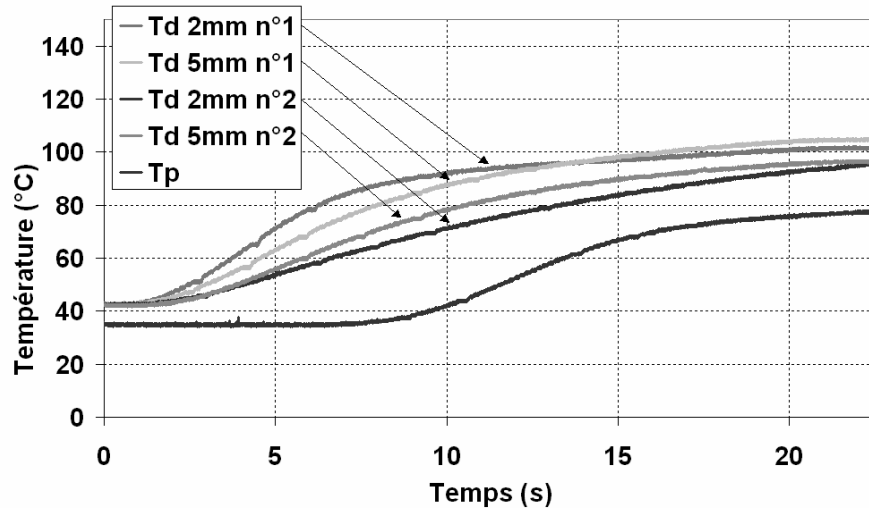


Figure III-6 : Evolution des températures de masse mesurées dans le disque et dans le pion au cours d'un freinage d'arrêt à basse énergie

La Figure III-7 présente le repérage des positions des thermocouples sur les thermogrammes des deux zones de la surface de la piste au moment du passage de la bande chaude sur le rayon moyen où sont placés les thermocouples. Il apparaît que la zone n°1 présente des niveaux de rayonnement infrarouge plus élevés que la zone n°2, la zone n°1 étant une zone à plus forts gradients circonférentiels que la zone n°2. La présence d'un gradient thermique dans la zone 1 montre que les thermocouples sont placés au voisinage d'une localisation thermique circonférentielle, ce qui entraîne des températures de masse supérieures dans cette zone.

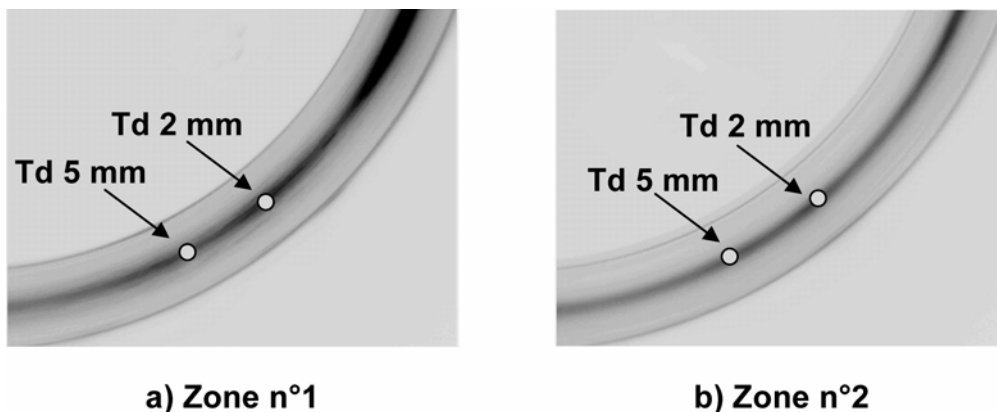


Figure III-7 : Localisation sur le thermogramme du disque de la position des thermocouples placés dans le disque dans les zones n°1 et n°2 lors du passage de la bande chaude sur le rayon moyen de frottement

Les températures de masse atteintes dans le patin et le disque au cours du freinage à haute énergie sont présentées en Figure III-8 à l'exception de la température Td 5 mm de la zone n°2

pour laquelle il y a eu un problème de mesure pendant l'essai. Les évolutions des mesures réalisées dans le patin et dans la zone n°1 du disque présentent une « bosse » que l'on peut corrélérer au passage de la bande chaude sur le rayon moyen de frottement sous lequel sont positionnés les thermocouples correspondants.

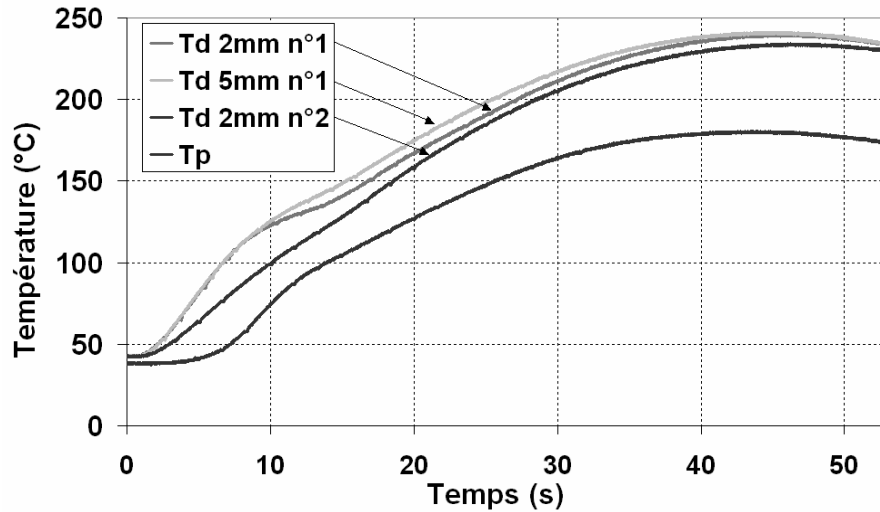


Figure III-8 : Evolution des températures de masse mesurées dans le disque et dans le patin au cours d'un freinage d'arrêt à haute énergie

La température de masse mesurée dans le patin commence son élévation dès $t = 3$ s et atteint une valeur maximale de 180°C . Tout comme pour le freinage à basse énergie, l'élévation des températures mesurées dans le disque s'amorce dès les premières secondes de freinage. Les températures mesurées dans la zone n°1 évoluent de manière groupée avec des valeurs supérieures à celles mesurées dans la zone n°2 dues à la présence d'une localisation thermique dans la zone n°1. Les températures maximales atteintes dans la zone n°1 à 2 et 5 mm de la surface sont respectivement de $240,9$ et de $240,5^{\circ}\text{C}$. Dans la zone n°2, la température de masse mesurée à 2 mm de la surface atteint une valeur maximale de 233°C .

De manière générale, les températures de masse atteintes dans le disque sont supérieures à celles atteintes dans le patin et l'élévation de la température mesurée dans le patin intervient plus tardivement que celles mesurées dans le disque. Ces deux différences de comportement sont dues aux différences de propriétés thermiques entre les deux matériaux et notamment une effusivité thermique du matériau composite trois fois inférieure à celle de la fonte.

III.1.1.3. Conclusions sur les phénomènes thermomécaniques

Les freinages d'arrêt à basse et à haute énergie présentent des évolutions de gradients thermiques de surface similaires en début de freinage avec l'apparition sur le rayon extérieur de la piste d'une bande chaude qui migre vers le rayon intérieur en s'intensifiant.

Les évolutions diffèrent ensuite en fonction du type de freinage :

- dans le cas du freinage à basse énergie, la bande chaude reste localisée sur le rayon intérieur et perd en intensité jusque la fin du freinage,
- dans le cas du freinage à haute énergie, des points chauds de forte intensité se forment et, entre ces points chauds, apparaît une bande sombre circulaire discontinue située sur un rayon légèrement extérieur à celui des point chauds. L'expansion et le déplacement des points chauds vers le rayon extérieur s'accompagnent de la diminution de leur intensité et du déplacement de la bande sombre.

Le freinage d'arrêt à haute énergie constitue ainsi un niveau sévère de sollicitation caractérisé par la formation de points chauds.

Les mesures de température de masse confirment la sévérité du freinage d'arrêt isolé à haute énergie : au cours du freinage à basse énergie, les températures maximales à 2 mm dans le disque et le patin sont respectivement de 101,6 et 77,7°C alors que celles atteintes au cours du freinage à haute énergie sont de 240,9°C dans le disque et de 180°C dans la patin. Compte tenu de la température initiale de 40°C du disque, ces mesures conduisent à une élévation maximale de la température de 60°C et 200°C à 2 mm respectivement pour les freinages à basse et haute énergie. Ces élévations sont cohérentes avec les élévations de température moyenne de surface prévues par le programme d'essai (Tableau 1-6, $\Delta\theta = 93^\circ\text{C}$ pour le freinage à basse énergie et $\Delta\theta = 263^\circ\text{C}$ pour le freinage à haute énergie).

III.1.2. Perturbations du coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est calculé à partir des composantes normale et tangentielle de l'effort mesuré par le capteur piézoélectrique 3D. Les descriptions des courbes d'évolution du coefficient de frottement présentées dans ce paragraphe sont faites en considérant la valeur moyenne des fluctuations des courbes.

L'évolution du coefficient de frottement au cours du freinage d'arrêt à basse énergie est présentée en Figure III-9. Après une augmentation rapide dans les premières secondes du freinage, le coefficient de frottement se stabilise en moyenne à une valeur de 0,3 jusque $t = 13$ s. Cette stabilité s'accompagne de faibles fluctuations du coefficient de frottement autour de sa valeur moyenne, avec une amplitude maximale de ces fluctuations de 0,04. A partir de $t = 13$ s, le coefficient de frottement présente une augmentation de sa valeur qui atteint une valeur moyenne de 0,42 à la fin du freinage. L'augmentation du coefficient de frottement s'accompagne à partir de $t = 17$ s d'une augmentation de l'amplitude des fluctuations.

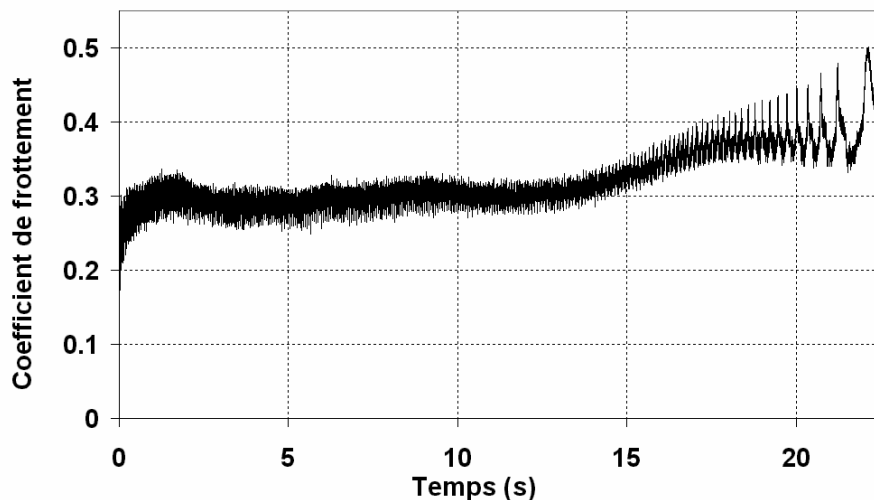


Figure III-9 : Evolution du coefficient de frottement au cours du freinage d'arrêt à basse énergie

L'évolution du coefficient de frottement au cours du freinage d'arrêt à haute énergie (Figure III-10) présente des valeurs proches de 0,28 avec trois étapes en termes de fluctuations autour de cette valeur. Afin de faciliter la lecture, la courbe d'évolution du coefficient de frottement en noir est complétée jusqu'à $t = 30$ s par une courbe moyenne en blanc.

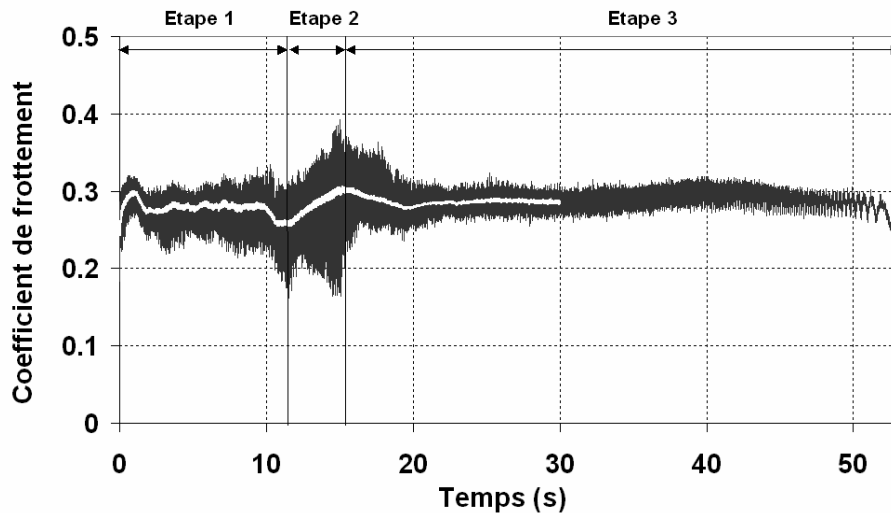


Figure III-10 : Evolution du coefficient de frottement au cours du freinage d'arrêt à haute énergie

La première étape de l'évolution du coefficient de frottement se déroule jusqu'à $t = 12$ s : après une augmentation rapide au cours des premières secondes du freinage, le coefficient de frottement se stabilise à une valeur moyenne de 0,28 avec des fluctuations d'une amplitude de 0,08. Dans la seconde étape [12 s, 15 s], la courbe de la moyenne oscille et présente une augmentation jusqu'à une valeur maximale de 0,3 atteinte à $t = 15$ s. Cette augmentation s'accompagne de fluctuations d'amplitude plus importante atteignant des valeurs supérieures à 0,12. La troisième étape concerne la fin du freinage [15 s, 22 s]. A partir de $t = 15$ s, le coefficient de frottement décroît jusque 0,27, valeur atteinte à $t = 20$ s, puis se stabilise à cette valeur jusqu'à la fin du freinage. Cette stabilisation du coefficient de frottement est accompagnée d'une diminution des fluctuations jusqu'à une valeur de 0,03.

Comparé au comportement à basse énergie, l'évolution du coefficient de frottement est très perturbée pendant les 15 premières secondes du freinage à haute énergie, tandis qu'elle est plus stable en fin du freinage à haute énergie.

III.1.3. Mécanismes physiques activés en freinage d'arrêt isolé

Des observations au MEB (en électrons secondaires et en électrons rétrodiffusés) et des analyses X-EDS ont été effectuées sur les surfaces des patins et des disques après les essais de freinages d'arrêt isolés. Sur les différentes observations présentées dans ce paragraphe, la flèche blanche indique le sens de glissement, la surface observée étant prise pour référence.

III.1.3.1.a. Mécanismes activés en freinage d'arrêt à basse énergie

La Figure III-11 présente l'observation de la surface du patin et le repérage des zones d'observations à plus fort grossissement : la Zone 1 sur un rayon extérieur de la piste de frottement, la Zone 2 sur le rayon moyen de frottement et la Zone 3 sur un rayon intérieur. Ces zones d'observations définies sur le patin sont également définies sur le disque.

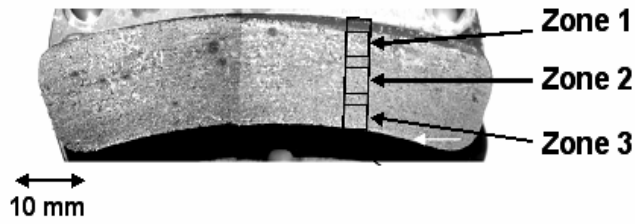


Figure III-11 : Surface du patin et repérage des zones d'observations à plus fort grossissement.

La Figure III-12 présente des observations du patin dans la Zone 1 ainsi que la position des analyses réalisées en X-EDS (numérotées de 1 à 3). Les Figures III-12a et b présentent des observations de la Zone 1, à la même échelle, respectivement en électrons secondaires et en électrons rétrodiffusés. En électrons rétrodiffusés, les constituants métalliques (fibres d'acier, particules de cuivre et de laiton) sur lesquels sont formées les plaques de troisième corps apparaissent en clair. Les particules de graphite sont observables en noir sur les deux modes d'observations. La matrice apparaît entre ces éléments et contient les fibres minérales. Un lit de poudre recouvre localement la matrice. Les détails de la zone 1 observé à plus fort grossissement montrent la formation de plaques planes sur une fibre d'acier et sur une particule de laiton (respectivement Figure III-12c et d).

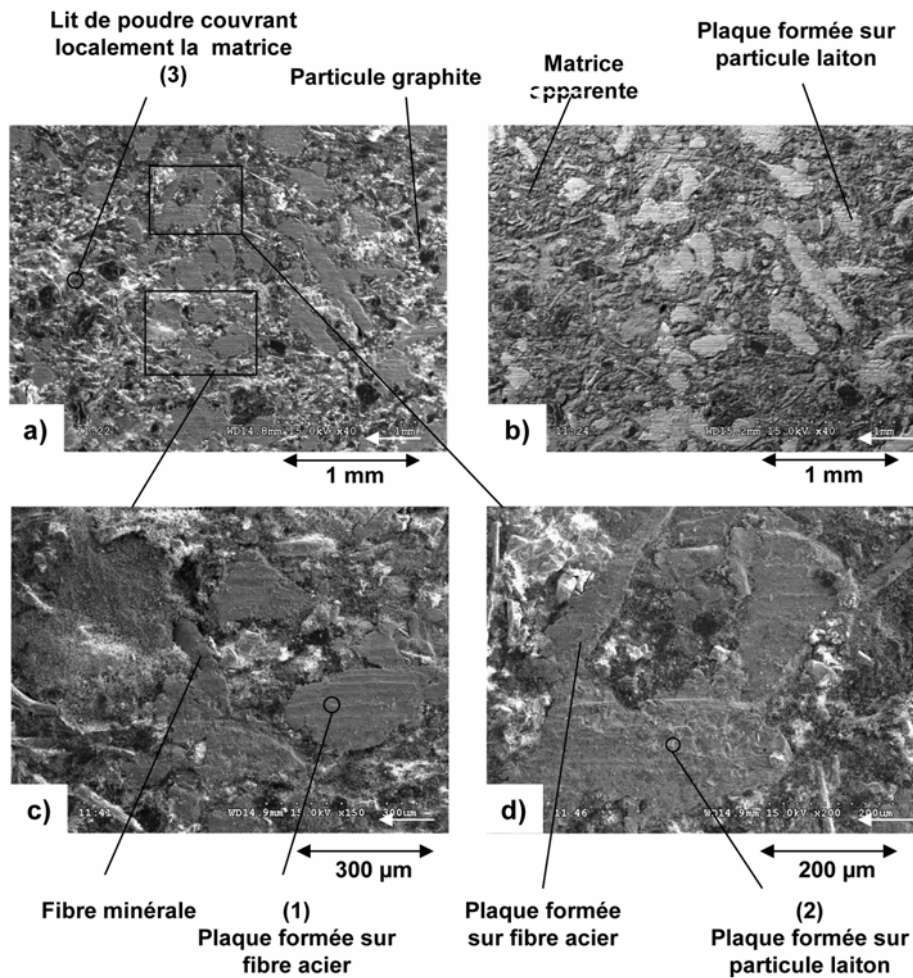


Figure III-12 : Observations MEB de la Zone 1 sur le patin a) en électrons secondaires et b) en électrons rétrodiffusés, c et d) détails en électrons secondaires. Les pointés en analyse X-EDS sont numérotés de (1) à (3).

Les spectres des analyses aux pointés (1) et (2) réalisées sur ces deux plaques (Figure III-13a et b) confirment la nature des constituants sur lesquels elles se sont formées : les spectres présentent respectivement des pics importants pour l'élément Fe et pour les éléments Cu et Zn et des pics secondaires pour les autres éléments. Une analyse a été également réalisée sur le lit de poudre (pointé (3) et Figure III-13c) : tous les éléments présents dans les constituants des matériaux se retrouvent dans la composition de ce lit de poudre de troisième corps.

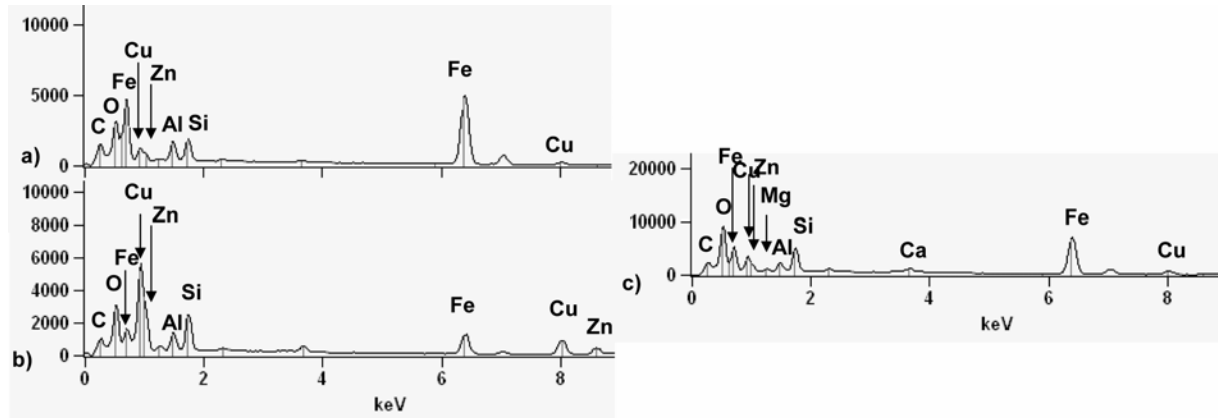


Figure III-13 : Spectres des analyses X-EDS des différents pointés sur la Zone 1 du patin
a) pointé 1, b) pointé 2, c) pointé 3

La surface du disque a été également observée dans la Zone 1 (Figure III-14) : des traces de glissement sont visibles sur cette zone située sur le rayon extérieur. Les lamelles de graphite contenues dans la fonte apparaissent par endroits à la surface.

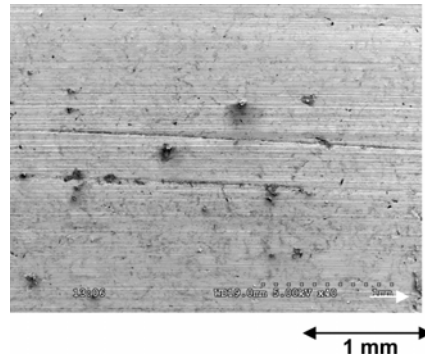


Figure III-14 : Observation MEB de la Zone 1 sur le disque

Les observations menées sur le patin dans la Zone 2 (Figure III-15) montrent la présence de particules de graphite, de particules minérales et de plaques planes de troisième corps formées sur des constituants métalliques (particules de laiton et fibres d'acier) comme déjà observé sur la Zone 1. Ces différents constituants ont été identifiés par analyses X-EDS. Contrairement à ce qui a été observé sur la Zone 1, on peut observer sur la Zone 2 entre ces différents constituants un lit de poudre couvrant la totalité de la matrice qui n'est plus apparente (Figure III-15). Des observations à plus fort grossissement (Figure III-15c et d) permettent de visualiser l'importante quantité de poudre entourant les particules de graphite et les plaques planes de troisième corps.

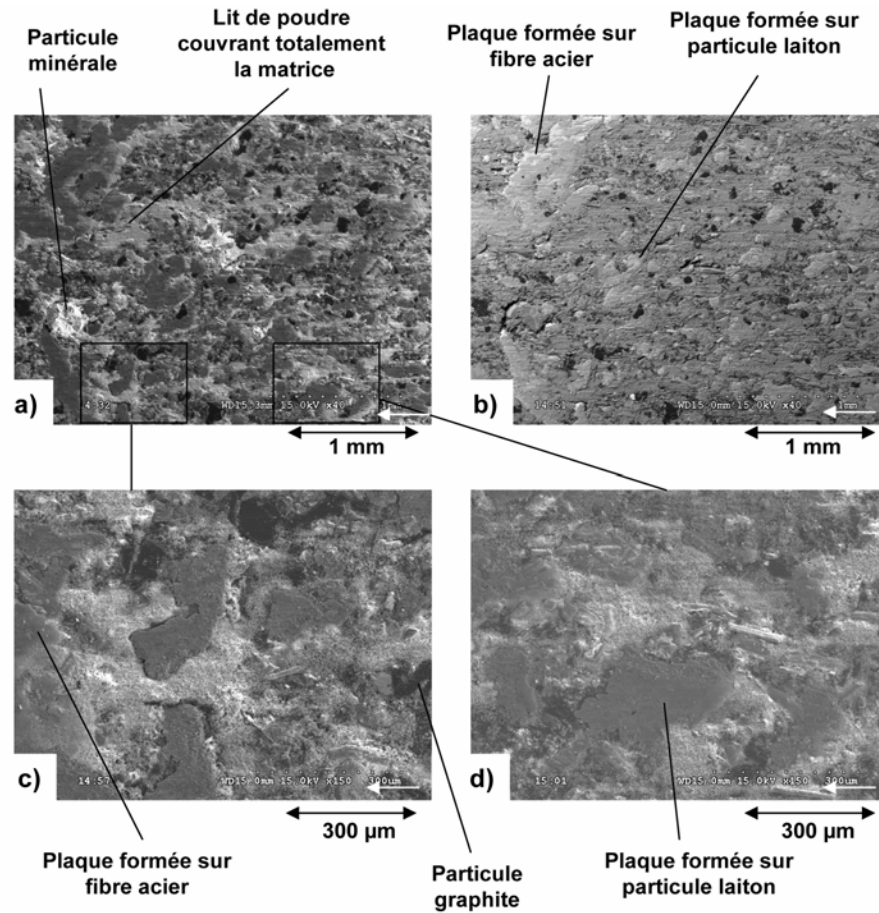


Figure III-15 : Observations MEB de la Zone 2 sur le patin a) en électrons secondaires et b) en électrons rétrodiffusés, c et d) détails en électrons secondaires.

La surface du disque observée au MEB dans la Zone 2 (Figure III-16a) présente un aspect marbré constitué de zones claires et de zones foncées.

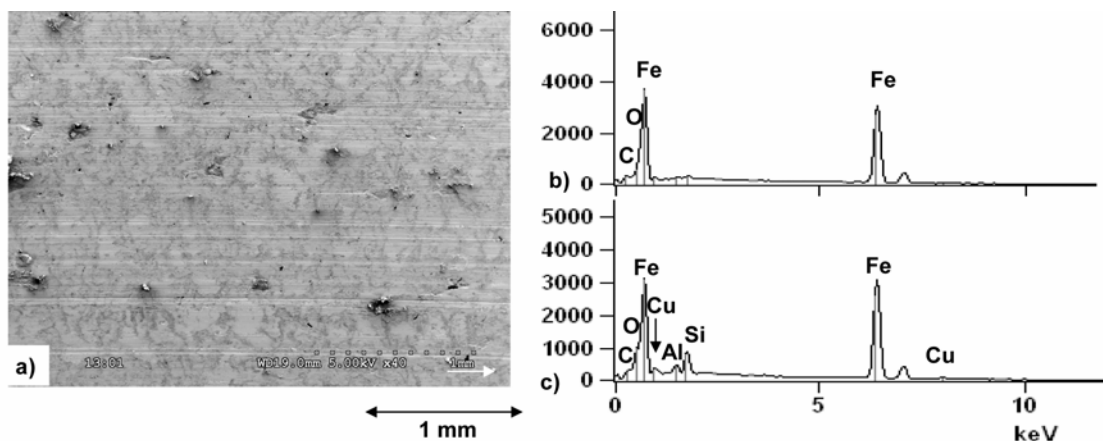


Figure III-16 : Zone 2 sur le disque a) observation MEB, b et c) spectres des analyses X-EDS réalisées respectivement dans une zone claire et dans une zone foncée

Des analyses X-EDS ont été réalisées dans les deux types de zones (Figure III-16b et c) : les zones claires correspondent à la surface de la fonte, caractérisée par la forte présence de l'élément Fe, et les zones foncées correspondent à la présence d'un troisième corps riche en élément Al et

Si accumulé suivant le réseau des lamelles de graphite. Le graphite des lamelles est apparent en surface par endroits.

Les observations menées sur le patin dans la Zone 3 révèlent la présence des mêmes constituants que ceux identifiés dans les deux premières zones étudiées : fibres et particules minérales, particules de graphite et plaques formées sur des constituants métalliques. La principale différence avec les observations précédentes réside dans la quantité de poudre présente à la surface : alors que la Zone 2 est totalement couverte de poudre, la Zone 3 se rapproche plus de la Zone 1 avec une matrice localement couverte de poudre, mais toutefois par une quantité de poudre plus importante que sur la Zone 1.

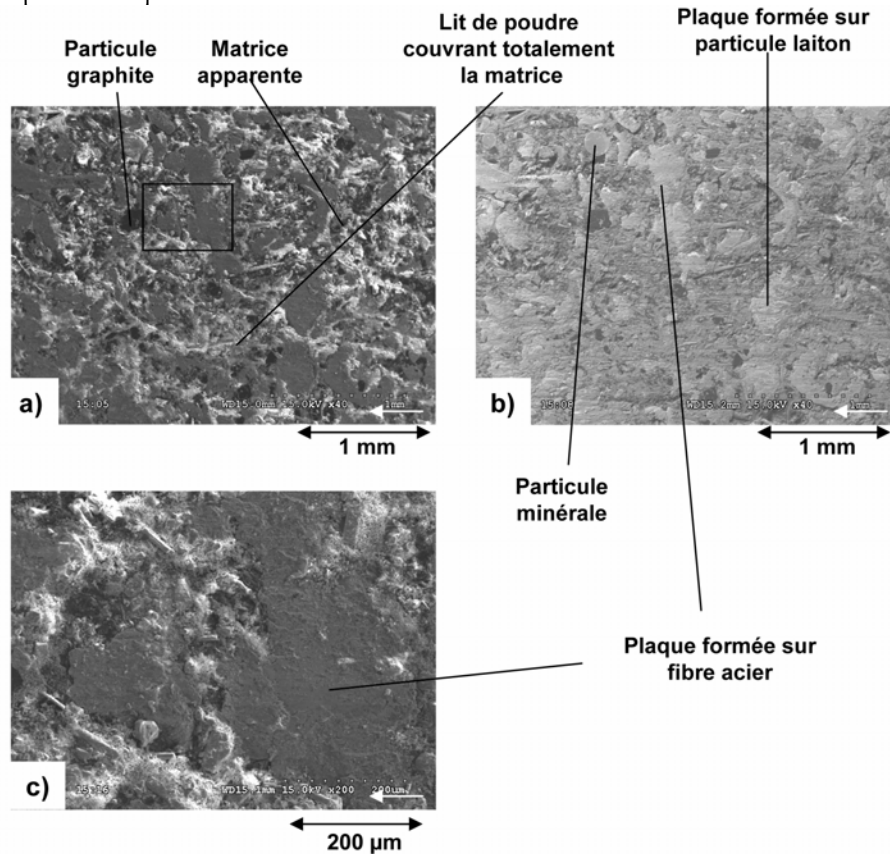


Figure III-17 : Observations MEB de la Zone 3) sur le patin a) en électrons secondaires et b) en électrons rétrodiffusés, c) détails en électrons secondaires à plus fort grossissement

La surface du disque dans la Zone 3 (Figure III-18) présente le même aspect marbré que celui observé dans la Zone 2. Des zones très claires sont observables et se révèlent par l'analyse X-EDS riches en cuivre.

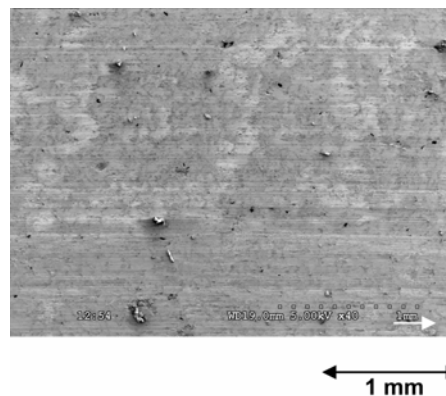


Figure III-18 : Observations MEB de la Zone 3 sur le disque

Sur le patin, différents constituants ont été identifiés sur les trois zones considérées : les particules de graphite, les particules et fibres minérales et les plaques planes formées sur les constituants métalliques. Les différences entre les zones étudiées apparaissent en termes de quantité de poudre couvrant la matrice : la Zone 2 sur le rayon moyen présente un lit de poudre couvrant totalement la matrice alors que sur les Zones 1 et 3, respectivement sur des rayons extérieur et intérieur, le lit de poudre ne couvre que localement la matrice. La surface du disque, apparaissant en clair, est couverte de troisième corps suivant le réseau de lamelles de graphite. Ce troisième corps, qui apparaît en sombre, confère un aspect marbré au disque. Cet aspect marbré s'intensifie vers l'intérieur de la piste de frottement et est accompagné sur le rayon intérieur de zones blanches riches en élément cuivre.

III.1.3.1.b. Mécanismes activés en freinage d'arrêt à haute énergie

Comme cela a été fait dans le paragraphe précédent pour le freinage d'arrêt à basse énergie, les surfaces du patin et du disque ont été observées après le freinage d'arrêt à haute énergie sur 3 zones numérotées de 1 à 3 du rayon extérieur au rayon intérieur.

Les investigations menées au MEB sur la Zone 1 (Figure III-19) montrent une surface presque totalement recouverte d'un lit de poudre localement compacté. Seules les particules de graphite et les plaques planes formées sur des constituants métalliques restent visibles en surface.

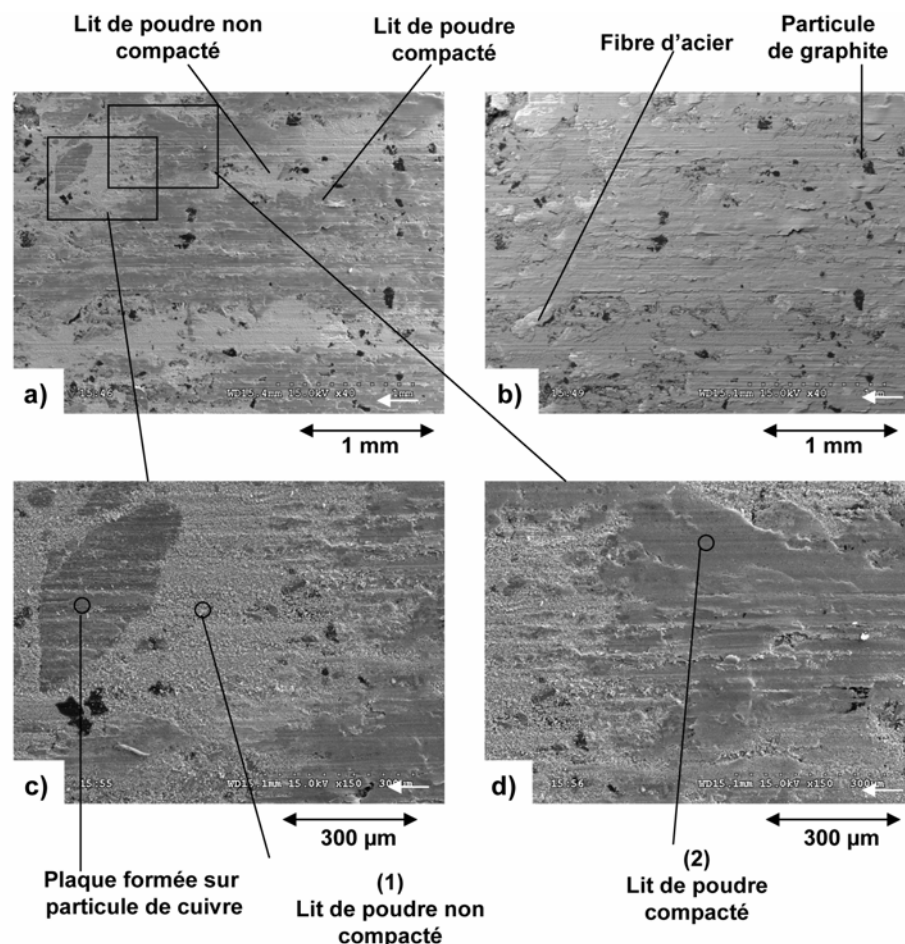


Figure III-19 : Observations MEB de la Zone 1 sur le patin a) en électrons secondaires et b) en électrons rétrodiffusés, c et d) détails en électrons secondaires à plus fort grossissement. Les pointés en analyse X-EDS sont numérotés (1) et (2).

Des analyses X-EDS ont été réalisées sur les lits de poudre non compactés (Figure III-20a) et compactés (Figure III-20b) : les résultats montrent que la composition est la même quelle que soit la forme que prend le lit de poudre. La seule différence semble donc être morphologique avec d'une part, un lit de poudre non compacté piégé sur la matrice sous la surface de glissement, donc ne participant pas au contact et, d'autre part, un lit de poudre compacté sous l'action du contact et présentant à sa surface des traces de frottement et d'écoulement.

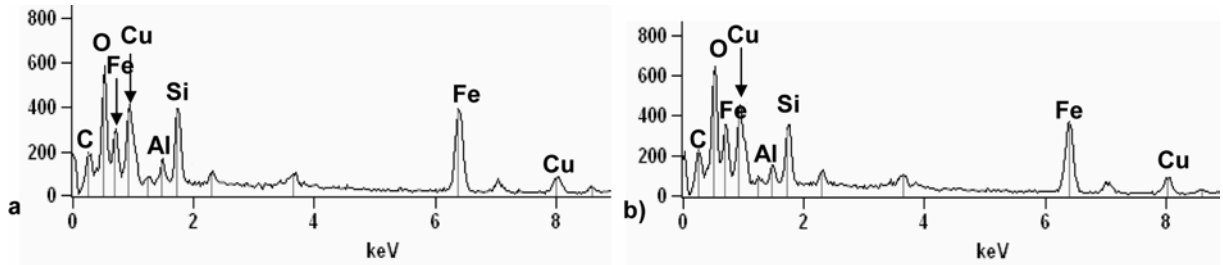


Figure III-20 : Spectres des analyses X-EDS des différents pointés sur la Zone 1 du patin
a) pointé 1, b) pointé 2

La surface du disque dans la Zone 1 après le freinage d'arrêt isolé à haute énergie présente de grandes similitudes avec celle observée dans la même zone après le freinage à basse énergie. La seule différence est la présence de quelques lits de poudre apparaissant blanchâtre qui recouvrent par endroits la surface, ce qui n'a pas été observé après le freinage à basse énergie (Figure III-21).

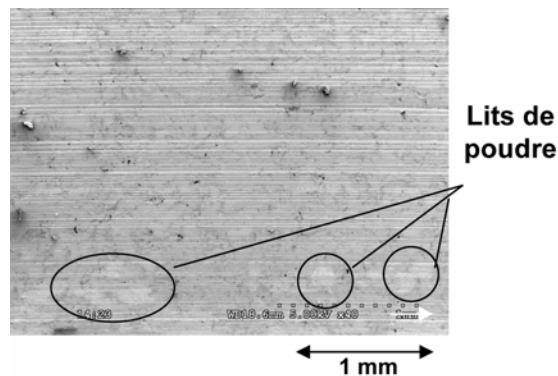


Figure III-21 : Observation MEB de la Zone 1 sur le disque

Sur la surface du patin dans la zone 2 (Figure III-22a et b), la matrice est bien apparente, très localement recouverte de poudre. Les plaques, d'une taille supérieure à celles observées après le freinage à basse énergie, sont formées sur des constituants métalliques. Les constituants minéraux ainsi que les particules de graphite sont eux aussi observables en surface. Sur la Figure III-22c, une plaque plane s'est formée sur une fibre d'acier et, par un phénomène de croissance, a rejoint deux particules minérales arasées proches jusqu'à les entourer partiellement. La Figure III-22d montre en détails une zone où la matrice est largement apparente et présente à sa surface des particules de graphite, des plaques de petites tailles ainsi que des fibres minérales arasées.

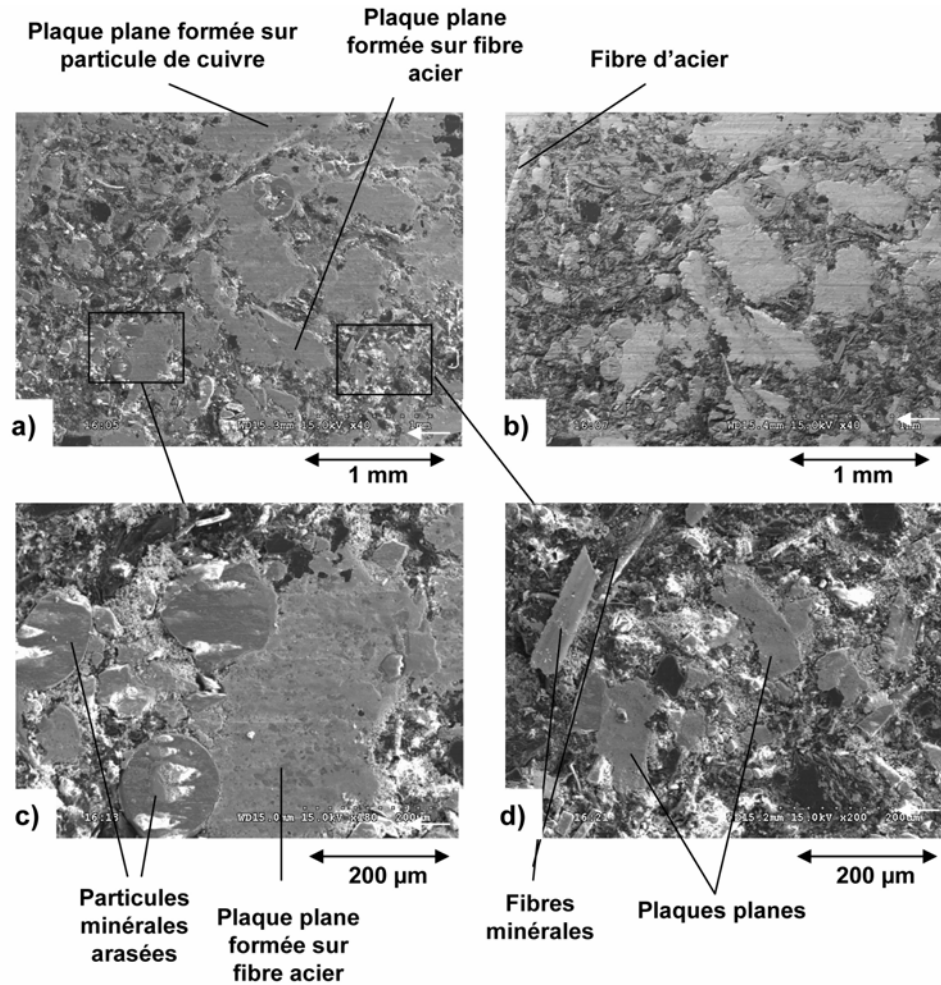


Figure III-22 : Observations MEB de la Zone 2 sur le patin a) en électrons secondaires et b) en électrons rétrodiffusés, c et d) détails en électrons secondaires.

La surface du disque dans la Zone 2 est présentée en Figure III-23. Elle présente un aspect marbré de zones claires (fonte), zones foncées (troisième corps riche en Si et Al accumulé en surface suivant le réseau de lamelles de graphite) et des zones blanches riches en cuivre. Le graphite des lamelles est apparent par endroits. Ces observations sont similaires à celles réalisées sur le patin après le freinage à basse énergie dans la Zone 3.

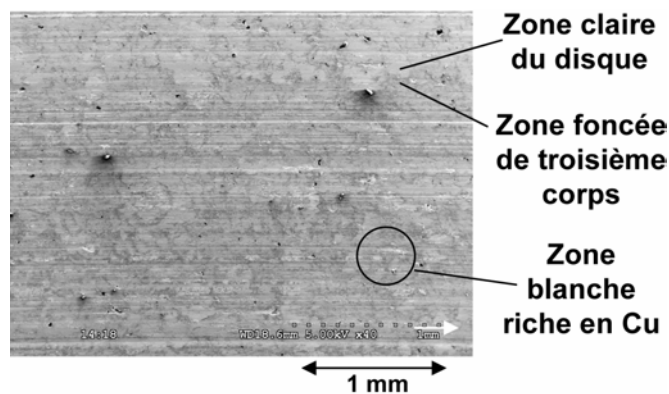


Figure III-23 : Observation MEB de la Zone 2 sur le disque

Sur le rayon intérieur du patin (Zone 3 Figure III-24), la surface de la matrice est partiellement apparente, couverte par endroits d'un lit de poudre et de fragments de petite taille des différents constituants du matériau composite. Les constituants métalliques et minéraux sont très marqués par de profondes traces de glissement plus visibles en électrons rétrodiffusés. La Figure III-24c montre l'empreinte laissée dans la matrice par une particule déchaussée. Sur la Figure III-24, la matrice est couverte d'éléments de petite taille, plaques ou fragments de constituants, ainsi que de poudre.

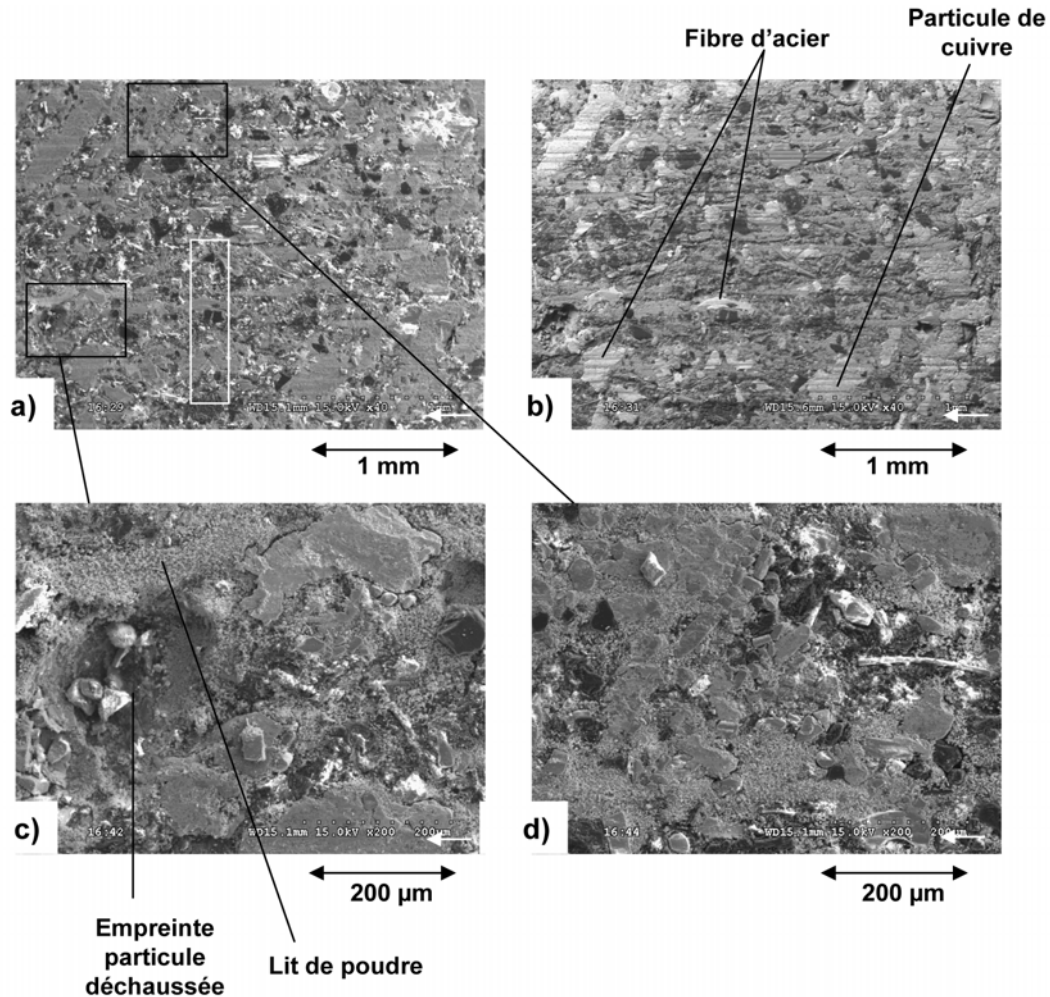


Figure III-24 : Observations MEB de la Zone 3) sur le patin a) en électrons secondaires et b) en électrons rétrodiffusés, c) et d) détails en électrons secondaires

La surface du disque après l'essai à haute énergie dans la Zone 3 (Figure III-25) est similaire à celle observée dans la Zone 2. Sur la Figure III-25b, la Zone 3 est observée à plus fort grossissement en électrons rétrodiffusés (à gauche) et en électrons secondaires (à droite) : un réseau de fissures en surface, constituant le lieu privilégié d'accumulation du troisième corps, provoque localement un écaillage de la surface du disque. Les sites d'amorçage des fissures sont proches des particules de graphite (en noir), lieux de concentration de contrainte conduisant à la fissuration [Ghaderi 2003, Lathabai 1998]. La Figure III-25d montre l'accumulation de troisième corps le long du réseau de lamelles de graphite. Deux analyses X-EDS ont été réalisées l'une sur la fonte, la seconde sur le troisième corps accumulé (Figure III-26) : le spectre de la fonte présente un pic important de Fe accompagné de carbone, tandis que et le spectre du troisième corps révèle la présence des éléments Cu, Si, Al provenant du patin, du fer provenant majoritairement du disque, ainsi qu'une présence importante d'oxygène provenant des différents oxydes contenus dans le troisième corps.

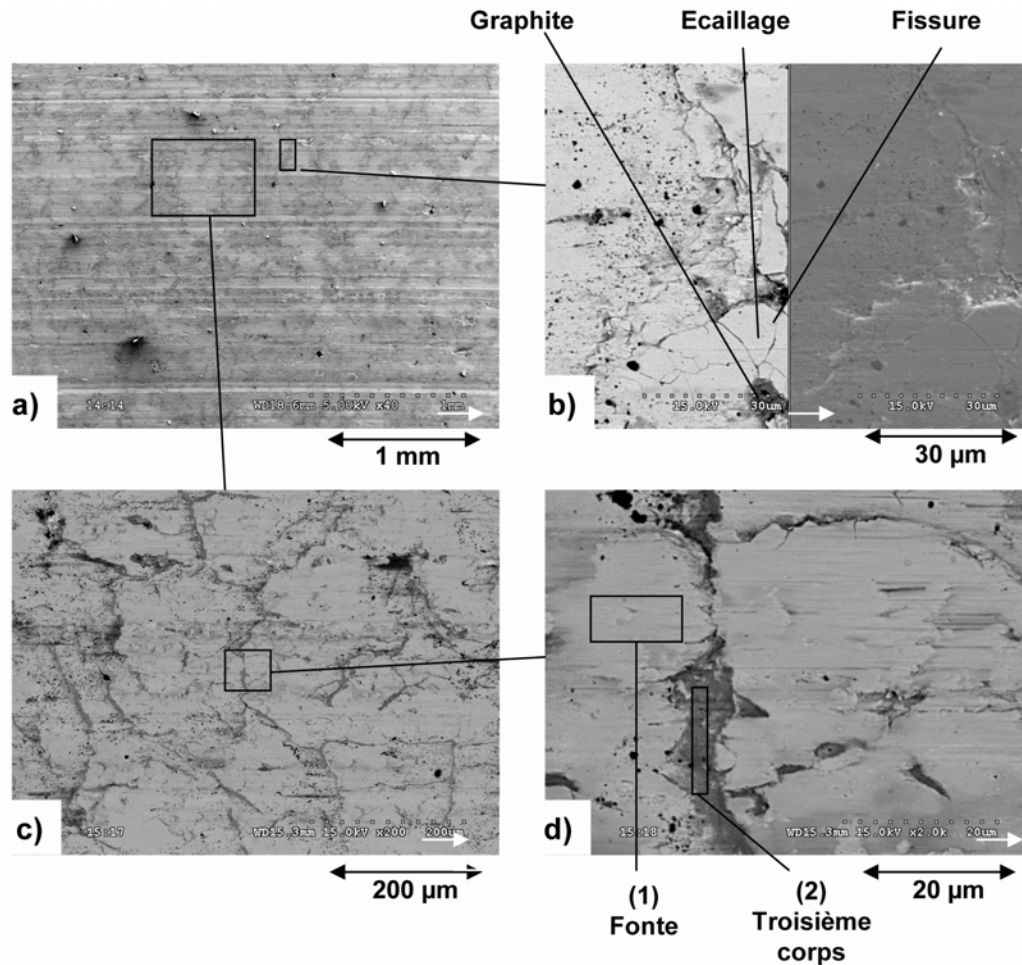


Figure III-25 : Observations MEB de la Zone 3 sur le disque a) en électrons secondaires, b) détail en électrons rétrodiffusés à gauche et secondaires à droite, c) et d) détails en électrons secondaires et localisation des pointés d'analyse X-EDS

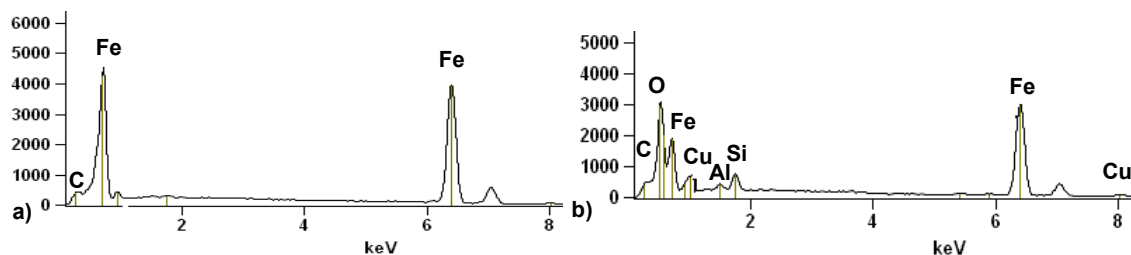


Figure III-26 : Spectres des analyses X-EDS des différents pointés sur la Zone 3 du disque a) pointé 1, b) pointé 2

Sur le patin, les différents constituants précédemment observés après le freinage à basse énergie l'ont été également après le freinage à haute énergie : les particules de graphite, les plaques formées sur les constituants métalliques et les particules et fibres minérales. Sur le rayon extérieur du patin (Zone 1), un lit de poudre compacté ou non compacté recouvre totalement la matrice ne laissant apparaître en surface que les plaques planes et les particules de graphite. Sur la Zone 2 située sur le rayon moyen de frottement, la surface du patin présente des plaques de taille importante et une matrice apparente. Sur le rayon intérieur, en Zone 3, la surface du patin est marquée d'une part par des traces de glissement en surface des plaques et des particules minérales, et, d'autre part, par la présence de fragments de petites tailles de différents

constituants. Les investigations menées sur le disque montrent le même aspect marbré que celui observé après le freinage à basse énergie. Les zones blanches riches en cuivre sont observables ici sur les Zones 2 et 3. La Zone 3 présente à proximité des lamelles de graphite des fissures et des traces d'écaillage.

III.1.3.1.c. Conclusions sur les mécanismes physiques activés

Les investigations menées après les deux types de freinage ont conduit à des observations qui sont assez semblables avec des caractères communs d'un freinage à l'autre, toutefois sans que la position radiale sur la piste de frottement des zones observées corresponde exactement.

L'intérieur de la piste de frottement, comprenant la Zone 3 pour le freinage à haute énergie et les Zones 2 et 3 pour le freinage à basse énergie, présente sur le patin une matrice peu couverte de poudre et sur le disque un troisième corps sombre riche en Si et Al accumulé le long du réseau de lamelles de graphite de la fonte et un troisième corps clair riche en Cu. Après le freinage à haute énergie, le disque présente des fissures et de l'écaillage, tandis que sur le patin, la taille des plaques portantes dans la Zone 2 (rayon intérieur fortement sollicité par les points chauds) est supérieure à ceux des plaques observées dans la Zone 3 (rayon moyen). Bettge a également observé l'influence de la sévérité de la sollicitation sur la taille des plaques de troisième corps formées sur la garniture lors d'essais de freinage : des énergies dissipées élevées conduisent à la formation de plaques présentant une taille et une épaisseur importantes [Bettge 2003].

Dans l'extérieur de la piste de frottement, correspondant à la Zone 2 pour le freinage à basse énergie et à la Zone 1 pour le freinage à haute énergie, un lit de poudre couvre totalement la matrice. Ce lit de poudre, non compacté dans le cas du freinage à basse énergie, apparaît très compacté dans le cas du freinage à haute énergie et présente des traces de frottement et d'écoulement en surface. Sur le disque, le troisième corps riche en Si et Al est toujours présent.

Dans la Zone 1 du patin pour le freinage à basse énergie, la surface du patin est largement apparente et n'est couverte que très localement de poudre et la surface du disque présente le même troisième corps riche en Si et Al que celui observé sur le patin, mais en quantité moins importante.

III.1.4. Conclusions

Le comportement du contact disque garniture pour le couple de matériaux étudié a été étudié au cours de deux freinages d'arrêt isolés, l'un à basse énergie et l'autre à haute énergie. Le freinage à haute énergie constitue une sollicitation sévère du contact. Cette sollicitation sévère a conduit à des températures de masse élevées, de 240°C et 180°C mesurées à 2 mm sous la surface de frottement respectivement dans le disque et dans le patin, tandis que les températures mesurées aux mêmes endroits au cours du freinage à basse énergie n'atteignent respectivement que 100°C et 80°C.

L'influence de la sévérité du freinage sur la sollicitation thermique de surface a été analysée à partir des thermogrammes de la piste de frottement du disque. Deux phénomènes ont été observés : le phénomène de bande chaude et le phénomène de points chauds.

Pour les deux freinages étudiés, dès le début du freinage, une bande chaude prend naissance sur le rayon extérieur de la piste de frottement, puis migre radialement jusqu'au rayon intérieur de la piste. Cette bande chaude présente des gradients thermiques circonférentiels que l'on peut associer à la répartition circonférentielle non uniforme de la puissance dissipée, compte tenu des écarts de forme du disque qui engendrent une modulation de l'effort normal pendant le freinage. Dans le cas du freinage à haute énergie, la bande chaude, qui est plus intense et plus localisée que dans le cas du freinage à basse énergie, évolue par intensification des gradients thermiques circonférentiels, ce qui conduit à la formation des points chauds. Ces points chauds sont

régulièrement répartis sur la circonférence de la piste et se caractérisent par une forte intensité du rayonnement infrarouge. Pour les deux freinages, la fin de freinage est caractérisée par la disparition progressive des phénomènes de localisation thermique et l'homogénéisation de la température de surface, par élargissement de la bande chaude à l'intérieur de la piste pour le freinage à basse énergie, par expansion et migration radiale des points chauds vers l'extérieur de la piste pour le freinage à haute énergie.

Ces deux phénomènes de localisation thermique, qui dépendent de la sévérité du freinage, ont été étudiés par plusieurs auteurs dont les résultats sont cohérents avec nos observations [Anderson 1990, Day 1990, Dufrénoy 1995, Panier 2004]. Leur apparition résulte des déformées du disque et de la garniture sous l'effet des gradients thermiques qui entraînent une localisation radiale du contact. Dans le cas des points chauds, les déformations thermomécaniques du disque entraînent une déformée ondulatoire, créant ainsi une succession de creux et de bosses le long de la circonférence de la piste de frottement. La localisation du contact sur les bosses y entraîne la formation puis l'expansion des points chauds.

Lors du freinage à haute énergie, la thermographie du disque a révélé un autre phénomène : la formation d'une bande discontinue de couleur sombre sur le thermogramme, correspondant donc à un rayonnement infrarouge localement élevé. Cette bande sombre discontinue apparaît en aval du front chaud formé par les points chauds et suit la migration radiale de ce front chaud vers l'extérieur de la piste. Cette bande discontinue se forme circonférentiellement entre les points chauds, donc dans les creux de l'ondulation du disque. Elle peut donc difficilement être expliquée par un phénomène de localisation thermique, les creux du disque étant peu sollicités par le frottement. En fait, cette bande discontinue de plus forte luminance infrarouge doit être associée à une importante variation locale de l'émissivité de la surface du disque, donc à une variation de l'état de cette surface.

L'étude de l'évolution du coefficient de frottement a révélé un comportement différent pour chacun des deux freinages étudiés. Au cours du freinage à basse énergie, le coefficient de frottement est stable autour de 0,3 pendant les deux premiers tiers du freinage avant d'effectuer une remontée importante pour atteindre 0,42 au moment de l'arrêt. Dans le cas du freinage d'arrêt à haute énergie, l'évolution du coefficient de frottement montre un comportement tribologique perturbé pendant la première partie du freinage avec d'importantes fluctuations qui atteignent leur maximum entre la 12ème et la 15ème seconde du freinage. Ensuite le coefficient de frottement se stabilise autour de 0,28 jusqu'à la fin du freinage. Les perturbations du coefficient de frottement en début du freinage correspondent à la migration de la bande chaude et la période des plus fortes fluctuations, de la 12ème à la 15ème seconde, correspond à l'apparition de l'ondulation du disque et à la formation des points chauds sur le rayon intérieur de la piste de frottement. Ainsi, les phénomènes de localisation thermique sous sollicitation sévère perturbent le comportement tribologique du contact disque patin. Le contact retrouve un comportement stable lors de la phase d'expansion et de migration des points chauds. La fin du freinage à haute énergie n'est pas caractérisée par une remontée du coefficient de frottement, comme dans le cas du freinage à basse énergie, mais au contraire par une légère diminution du coefficient de frottement.

La morphologie des surfaces de frottement qui ont été observées dans plusieurs zones réparties le long d'un rayon de la piste de frottement peut être corrélée à la sévérité de leur sollicitation en fin de freinage. Ainsi, la dernière région fortement sollicitée de la piste de frottement avant la fin du freinage correspond à la zone intérieure pour le freinage à basse énergie (dernière position de la bande chaude) et à la totalité de la piste pour le freinage d'arrêt à haute énergie (dernière position des points chauds). Dans ces zones, la surface du patin laisse apparaître la matrice du matériau composite qui n'est couverte que très localement de poudre tandis que la surface de frottement du disque présente des plaques de troisième corps riche en cuivre, et un

troisième corps riche en Si et Al piégé dans le réseau de lamelles de graphite. Ainsi, une sollicitation sévère ne permet pas l'accumulation de poudre à la surface du patin tandis qu'elle conduit à la formation d'un troisième corps riche en cuivre provenant du patin sur la surface du disque. A l'extérieur de ces zones, donc dans la partie extérieure de la piste de frottement, la présence d'un troisième corps riche en cuivre n'est pas observée à la surface du disque tandis que, sur la surface du patin, la matrice du matériau composite est totalement recouverte d'un lit de poudre. Dans le cas du freinage à basse énergie, la bande chaude s'est localisée en fin de freinage sur la partie intérieure après sa migration, ce qui est cohérent avec le lit de poudre non compacté observé dans la zone extérieure, montrant que cette zone n'a pas été sollicitée par le frottement en fin de freinage et que le contact est resté localisé dans la partie intérieure de la piste. Dans le cas du freinage à haute énergie, les points chauds s'étendent et migrent jusqu'à atteindre le rayon extérieur de la piste et les observations ont montré que le lit de poudre accumulé sur la surface extérieure du patin était compacté dans cette zone.

III.2. Influence sur le contact d'une sollicitation sévère de type succession de freinages avec cumul

Les successions de freinages considérées se composent à l'origine de 20 freinages mais pour des raisons techniques seulement 19 freinages d'arrêt à basse énergie ont été réalisés. Deux types de successions ont été réalisés : la première présente un temps de refroidissement suffisamment long entre deux freinages consécutifs afin de redescendre à une température initiale du disque et du patin inférieure à 50°C et la seconde succession avec cumul de chaleur est réalisée en imposant un temps court entre les freinages de manière à limiter le refroidissement du disque et du patin, conduisant ainsi à une sollicitation thermique sévère de freinage. Lors de la réalisation de ces deux successions de freinages, la sollicitation thermique est évaluée en surface par thermographie infrarouge et dans la masse par mesure de températures par thermocouples. L'impact du cumul de chaleur sur l'évolution du coefficient de frottement au cours des freinages est analysé. De plus, après les deux successions, les surfaces de frottement sont observées.

III.2.1. Influence sur les phénomènes thermomécaniques : évolution de la bande chaude

La sollicitation thermique est évaluée au cours des deux séquences en surface et dans la masse. Dans la masse, les réponses des thermocouples permettent la validation des niveaux de température atteints. En surface, la caméra infrarouge permet d'analyser l'influence du cumul de chaleur sur les gradients thermiques de surface obtenus pour les différents freinages à basse énergie réalisés au cours des deux séquences.

III.2.1.1. Validation des niveaux thermiques atteints

Les mesures de température de masse réalisées dans le patin et dans le disque sont les seules mesures de température accessibles et permettent de valider les niveaux de températures atteints au cours des successions. De même que pour l'étude des freinages d'arrêt isolés, le disque et le patin ont été équipés de thermocouples. Dans le disque, deux zones sont étudiées sur le rayon moyen de la piste de frottement (nommées zones n°1 et n°2) avec chacune deux thermocouples, l'un à 2 mm sous la surface frottante et l'autre à 5 mm. Dans le patin, un thermocouple mesure la température de masse à 2 mm sous la surface de frottement toujours sur le rayon moyen de frottement.

Les températures de masse atteintes dans le disque et dans le patin au cours de chaque freinage de la succession de freinages d'arrêt à basse énergie sans cumul de chaleur sont similaires à ceux

obtenus pour un freinage d'arrêt isolé. A titre d'exemple, la Figure III-27 présente l'évolution des différentes températures de masse relevées au cours du freinage 19 de la succession.

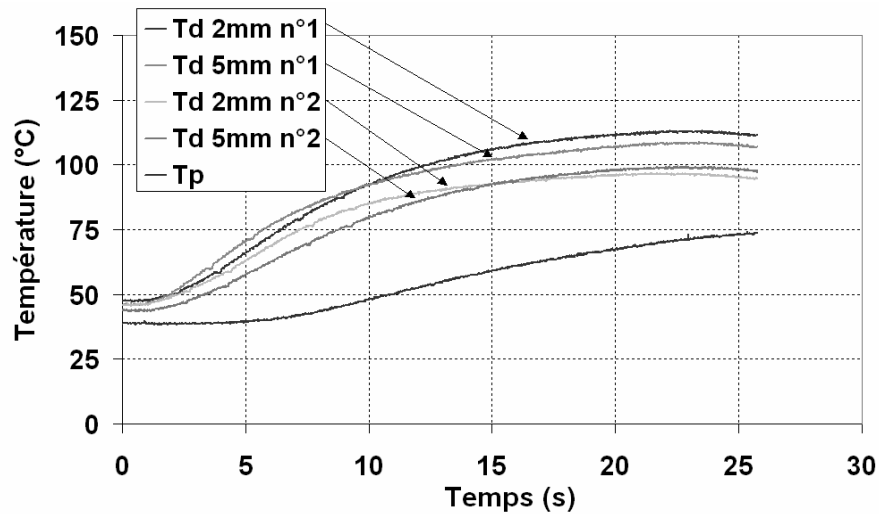


Figure III-27 : Evolution des températures de masse au cours du freinage 19 de la succession de freinages d'arrêt sans cumul de chaleur

Les niveaux maximaux atteints sont légèrement plus élevés que ceux obtenus pour le freinage d'arrêt isolé compte tenu du fait que la température initiale des éprouvettes est plus élevée. Tout comme au cours du freinage d'arrêt isolé, la différence de température obtenu dans le disque entre les deux zones 1 et 2 est attribuable à la position des thermocouples plus ou moins proche de localisations circonférentielles de contact. Les températures maximales atteintes dans la zone n°1 sont, pour les profondeurs de 2 et 5 mm, respectivement de 112,7 et 108,6°C. Pour les mêmes profondeurs, les températures atteintes dans la zone n°2 sont de 98,9 et de 96,8°C. Dans le patin, la température n'atteint pas son maximum au cours du freinage et la température à la fin du freinage est de 73,4°C.

La Figure III-28 présente les évolutions des températures de masse mesurées par les thermocouples placés dans le patin et dans le disque dans la zone n°2 au cours de la succession des freinages à basse énergie avec cumul de chaleur.

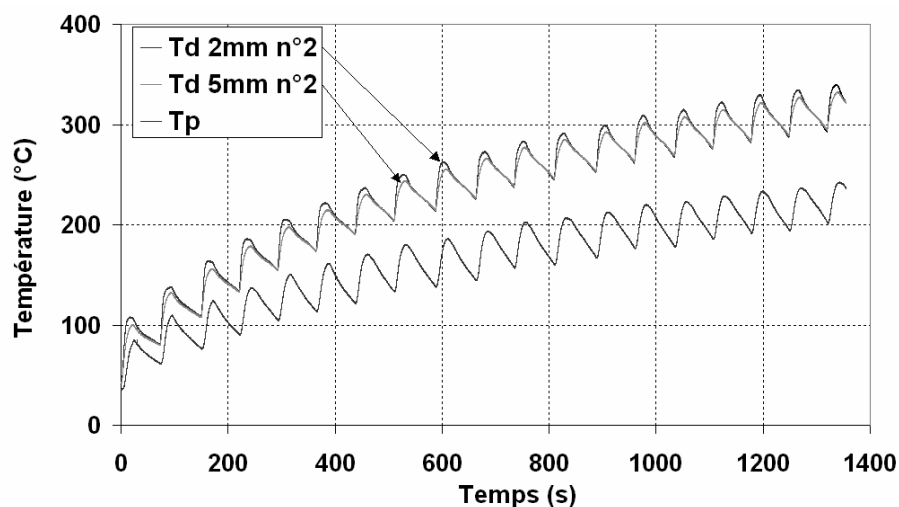


Figure III-28 : Evolution des températures de masse au cours de la succession de freinages d'arrêt avec cumul de chaleur

L'enchaînement rapide des freinages entraîne un cumul de chaleur. Au cours de chaque freinage, le maximum des températures de masse est atteint plus rapidement au début de la succession qu'à la fin de la succession. Cette différence a pour principale origine l'augmentation du flux de chaleur perdu par convection avec l'augmentation de la température. Au cours de la succession, la perte de chaleur par convection augmente conduisant à un gain de chaleur par cumul plus faible.

La Figure III-29 présente l'évolution des températures de masse relevées dans le disque et le patin au cours du dernier freinage de la succession. Les températures maximales atteintes dans la zone n°1 sont de 332,1 et 326,6°C respectivement à 2 et 5 mm, et dans la zone n°2, pour les mêmes profondeurs de mesure, les températures maximales sont de 339,8 et 335,1°C. Dans le patin, la température atteint un maximum de 242,1°C durant le freinage.

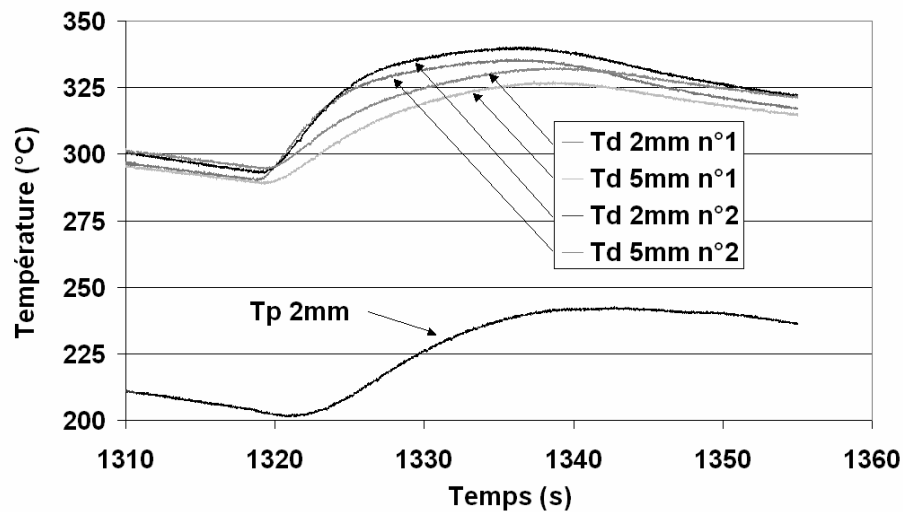


Figure III-29 : Evolution des températures de masse mesurées dans le disque et dans le pion au cours du dernier freinage de la succession avec cumul de chaleur

Un modèle permettant d'accéder à la température à l'interface patin-disque lors de la succession de freinages avec cumul de chaleur est en cours de développement en partenariat avec le L.M.E. de Valenciennes [Thevenet 2006a et b]. Ce modèle analytique de conduction prend en compte la sollicitation périodique du contact au cours de la succession de freinage et permet d'accéder à la fonction de transfert thermique complexe du disque, définie comme étant le rapport de la température de masse mesurée en un point du disque et la température à l'interface patin-disque. A partir des températures de masse mesurées dans le disque au cours des essais, la fonction de transfert permet de déterminer la température à l'interface disque-patin.

III.2.1.2. Evolution de la bande chaude

L'observation par thermographie infrarouge d'un huitième de la surface du disque a permis de suivre l'évolution des gradients thermiques de surface pendant les deux successions de freinages.

La plage de température pour chacun des freinages d'arrêt successifs sans cumul étant constante au cours de la succession, la configuration de la caméra infrarouge (choix du filtre et du temps d'intégration) a été choisie identique pour les 19 freinages. Cette configuration étant la même que celle utilisée pour le freinage d'arrêt isolé à basse énergie, les luminances obtenues peuvent donc être directement comparées.

La sollicitation thermique de surface observée pour chacun des freinages d'arrêt successifs reste la même au cours de la succession, identique à celle observée pour un freinage d'arrêt isolé à basse énergie. La Figure III-30 présente, pour le 19^{ème} freinage de la succession, l'évolution au cours du temps des moyennes des degrés de luminance calculées sur les 4 arcs positionnés sur les

4 rayons précédemment définis et numérotés de 1 à 4 du rayon extérieur au rayon intérieur. Au début du freinage, la bande chaude se forme à l'extérieur du disque engendrant des niveaux de luminance supérieurs à 10000 DL (Figure III-30a), alors que le reste de la piste, non sollicité dans le contact, reste à basse luminance. Jusqu'à $t = 15$ s, la bande chaude migre radialement du rayon extérieur vers le rayon intérieur avec des maxima de luminance de 14000 DL atteints successivement sur les rayons 2 à 4 (Figure III-30b à d). Après $t = 15$ s, les luminances les plus élevées sont mesurées sur la partie intérieure de la piste du disque (rayons 3 et 4) et vont perdre en intensité jusque la fin du freinage.

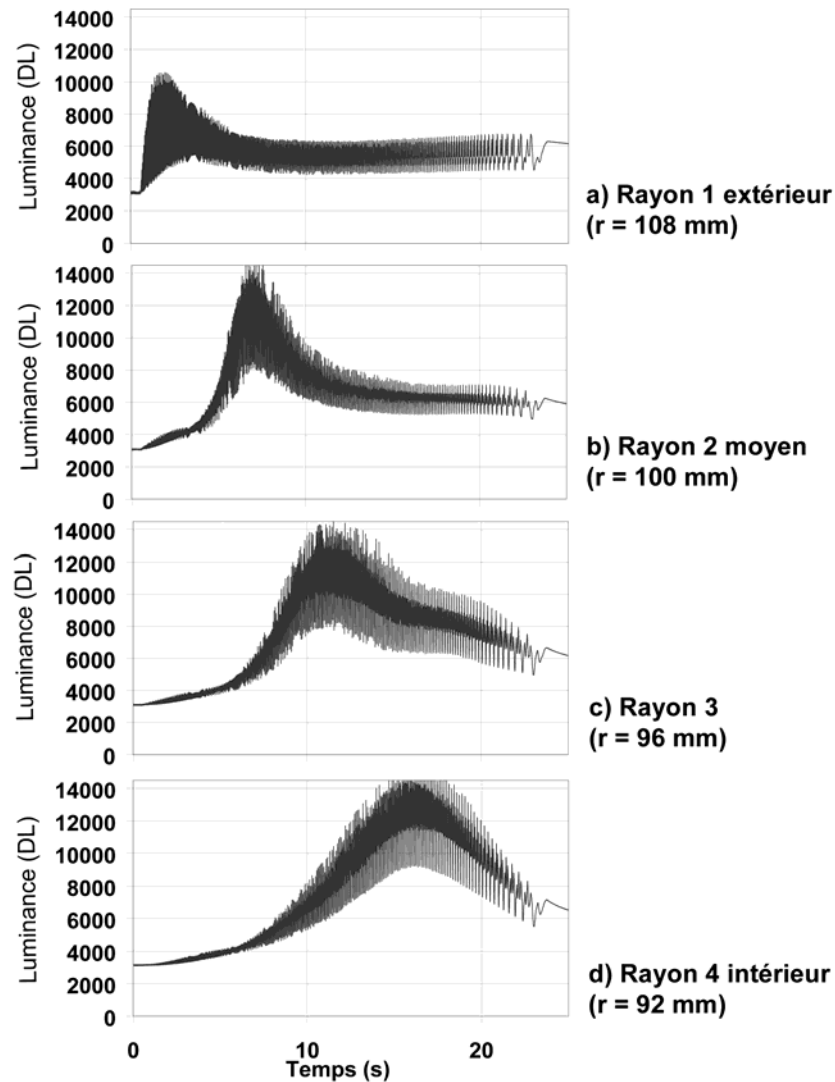


Figure III-30 : Evolution au cours du temps de la moyenne de la luminance (en DL) pour les rayons numérotés de 1 à 4 pendant le 19^{ème} freinage de la succession sans cumul de chaleur

Les températures de luminance calculées sur un huitième de la piste du disque atteignent pour le premier et le dernier freinage de la succession sans cumul de chaleur les valeurs maximales respectives de 87°C et de 84°C.

Au cours de la succession de freinages d'arrêt avec cumul de chaleur, la plage de température de surface pour chaque freinage augmente progressivement. Afin de bénéficier de bonnes conditions de mesure du rayonnement infrarouge de la surface du disque pendant toute la

succession, un changement de filtre et de temps d'intégration a été nécessaire entre le 16^{ème} et le 17^{ème} freinage entraînant une discontinuité en termes de luminance vue par le capteur de la caméra. Afin de comparer l'évolution des thermogrammes au cours de la succession avec cumul, les évolutions de la moyenne de la luminance sur les 4 rayons ont été converties en évolutions de la moyenne de température de luminance. Il ne s'agit pas ici de raisonner en termes de température de surface mais bien en termes de rayonnement infrarouge au cours des freinages sur les différentes parties de la piste du disque.

La Figure III-31 présente les évolutions de la moyenne des températures de luminance calculées sur les 4 rayons pour les freinages 01, 07, 13 et 19 de la succession avec cumul de chaleur. La succession étant réalisée avec cumul de chaleur, les niveaux thermiques atteints sont naturellement de plus en plus élevés.

Pour le freinage 01, la sollicitation thermique de surface est identique à celle observée au cours de la succession sans cumul de chaleur ou à celle observée pour le freinage d'arrêt isolé : le niveau de sollicitation maximal correspond à la bande chaude qui migre du Rayon 1 extérieur au Rayon 4 intérieur jusque $t = 15$ s, ne sollicitant thermiquement chaque rayon qu'un court instant, puis qui se localise à l'intérieur de la piste, pour enfin perdre en intensité jusqu'à homogénéisation de la température de surface.

Pour le freinage 19, la sollicitation thermique maximale est atteinte sur le Rayon 1 extérieur en début de freinage. Ensuite le Rayon 1 reste à un niveau thermique élevé tandis que la sollicitation thermique s'étend progressivement aux Rayons 2 à 4 pour atteindre ce dernier à $t = 9$ s. A cet instant, toute la surface de la piste de frottement du disque a un niveau thermique élevé, qui perd ensuite en intensité de manière homogène jusque à la fin du freinage.

Alors que, lors des premiers freinages, la bande chaude apparaît sur le rayon extérieur et sollicite successivement les différents rayons jusqu'au rayon intérieur à $t = 15$ s, à la fin de la succession la sollicitation thermique apparaît sur le rayon extérieur et s'étend à toute la piste atteignant plus rapidement le rayon intérieur à $t = 9$ s.

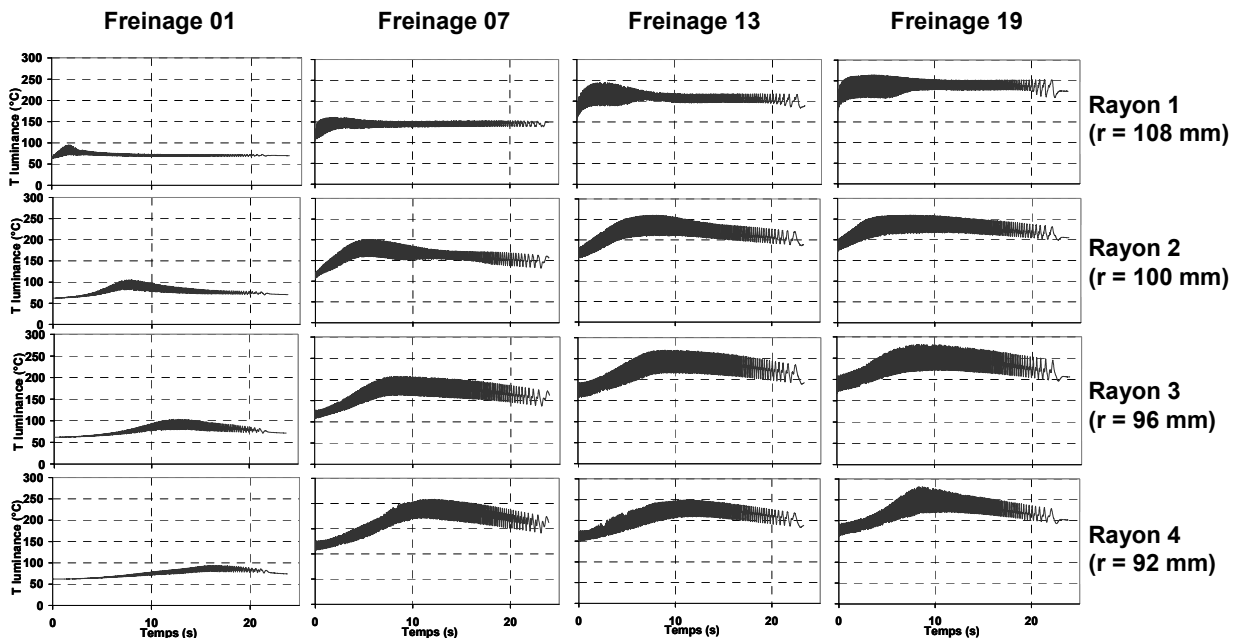


Figure III-31 : Evolution au cours du temps de la moyenne de la température de luminance calculée sur les rayons numérotés de 1 à 4 pour les freinages 01, 07, 13 et 19 de la succession avec cumul de chaleur

La Figure III-32 montre les thermogrammes d'une même zone de la piste du disque à 6 instants successifs du dernier freinage (Freinage 19) de la succession.

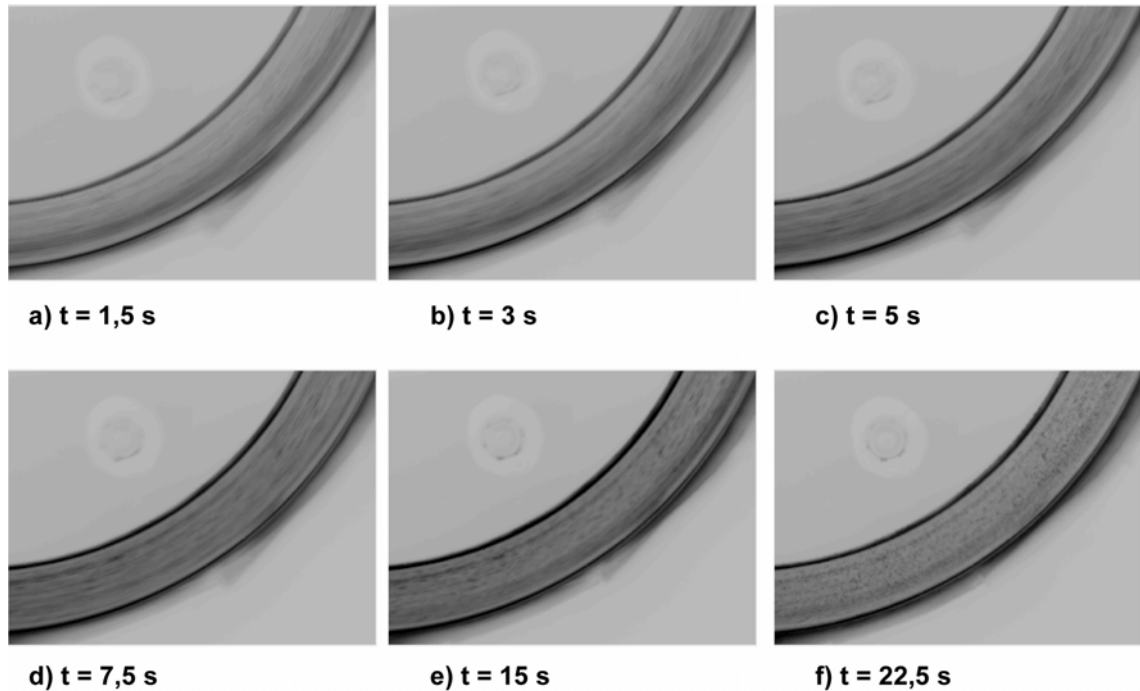


Figure III-32 : Rayonnement infrarouge d'une même zone du disque à 6 instants du Freinage 19 de la succession avec cumul de chaleur

Au début du freinage (Figure III-32a), la bande chaude se forme sur le rayon extérieur du disque. Jusque $t = 7,5$ s (Figure III-32b-d), la bande chaude s'étend rapidement à la totalité de la surface de la piste. La sollicitation thermique de surface reste homogène sur la piste de frottement et diminue en intensité jusque la fin du freinage (Figure III-32e-f).

Les valeurs moyennes de la température de luminance ont été calculées sur un huitième de la piste du disque pour les freinages 01, 07, 13 et 19 présentées en Figure III-31. Les valeurs maximales obtenues pendant ces freinages sont respectivement de 86, 179, 246 et 260°C montrant bien la progression dans le niveau de sollicitation thermique.

III.2.1.3. Conclusions sur les phénomènes thermomécaniques

Les mesures de température de masse dans le patin et dans le disque ont permis de valider les niveaux de température atteints au cours des successions. La succession sans cumul de chaleur a été réalisée avec un temps d'attente suffisant entre deux freinages consécutifs pour maintenir une même température initiale de freinage du début à la fin de la succession. Concernant la succession avec cumul de chaleur, le temps d'attente réduit imposé entre les freinages a permis cette fois de reproduire par cumul de chaleur l'élévation progressive des températures de masse prévue par le programme d'essais.

Lors de la succession de freinages sans cumul de chaleur, la sollicitation thermique de surface reste la même pour chaque freinage, identique à celle observée au cours du freinage d'arrêt isolé à basse énergie : une bande chaude étroite se forme sur le rayon extérieur puis migre vers le rayon extérieur avant de perdre en intensité jusqu'à l'homogénéisation de la température.

Pour la succession de freinages avec cumul de chaleur, la sollicitation thermique, identique à celle observée en freinage isolé pour le premier freinage de la succession, évolue progressivement

au cours de la succession : la sollicitation thermique apparaît toujours sur le rayon extérieur de la piste puis s'étend de plus en plus rapidement à la totalité de la surface de la piste conduisant à une homogénéisation de la sollicitation thermique de surface de plus en plus tôt pour chaque freinage, et dont le niveau ne cesse de progresser au cours de la succession.

III.2.2. Modification du coefficient de frottement

La Figure III-33a présente les évolutions du coefficient de frottement au cours de freinages représentatifs de la succession sans cumul de chaleur. L'évolution du coefficient de frottement au cours d'un freinage ne présente pas de variation majeure d'un freinage à l'autre et présente une grande similitude avec les résultats obtenus sur le freinage d'arrêt isolé à basse énergie. Une différence apparaît toutefois dans les premiers instants du freinage : le rapide saut du coefficient de frottement se modifie rapidement en début de succession pour conduire à une augmentation progressive du coefficient de frottement de 0,25 à 0,3, valeur atteinte à $t = 3$ s sur le dernier freinage. Ensuite, le coefficient de frottement reste stable autour de cette valeur jusque $t = 15$ s puis augmente jusque 0,42 à la fin du freinage, cette dernière augmentation étant accompagnée de fluctuations d'amplitude plus élevées.

La Figure III-33b présente les évolutions du coefficient de frottement pour 7 freinages d'arrêt représentatifs de la succession avec cumul de chaleur. L'évolution du coefficient de frottement, similaire au cours du premier freinage (Freinage 01) à celle observée lors de la succession sans cumul de chaleur ou en freinage isolé à basse énergie, se modifie au cours de la succession avec cumul de chaleur. Trois modifications principales interviennent au cours de cette succession et concernent différents instants du freinage :

- dans les premiers instants du freinage : la remontée du coefficient de frottement de 0,25 à 0,3 avant stabilisation à cette valeur disparaît au cours de la succession. Au cours du dernier freinage (Freinage 19), la valeur de 0,3 du coefficient de frottement est atteinte dès les premiers instants du freinage,
- jusque $t = 15$ s, le coefficient de frottement reste stable à 0,3 pour les freinages précédant le Freinage 10. Au cours du Freinage 10, une bosse, avec un maximum de 0,34, apparaît dans l'évolution du coefficient de frottement à $t = 10$ s. Cette bosse est observable lors des freinages suivants jusque la fin de la succession : le maximum atteint reste le même d'un freinage à l'autre mais il est atteint de plus en plus tard pour chaque freinage au fil de la succession (à $t = 10$ s au cours du Freinage 10, à $t = 15$ s au cours du Freinage 19),
- en fin du freinage, la remontée du coefficient de frottement de 0,3 jusque 0,45 observée lors du Freinage 01 n'apparaît plus que faiblement dès le Freinage 04 avec une remontée n'atteignant que 0,32. Au Freinage 07, la tendance s'inverse et le coefficient de frottement chute de 0,3 à 0,28 au moment de l'arrêt. Cette chute finale est observée jusque la fin de la succession. Pour les derniers freinages, le coefficient de frottement chute de 0,34 (maximum atteint sur la bosse) jusque 0,28. Comme le maximum sur la bosse est atteint de plus tardivement au fil de la succession, la durée de la chute finale du coefficient de frottement diminue de 13 s au Freinage 10 à 8 s au Freinage 19.

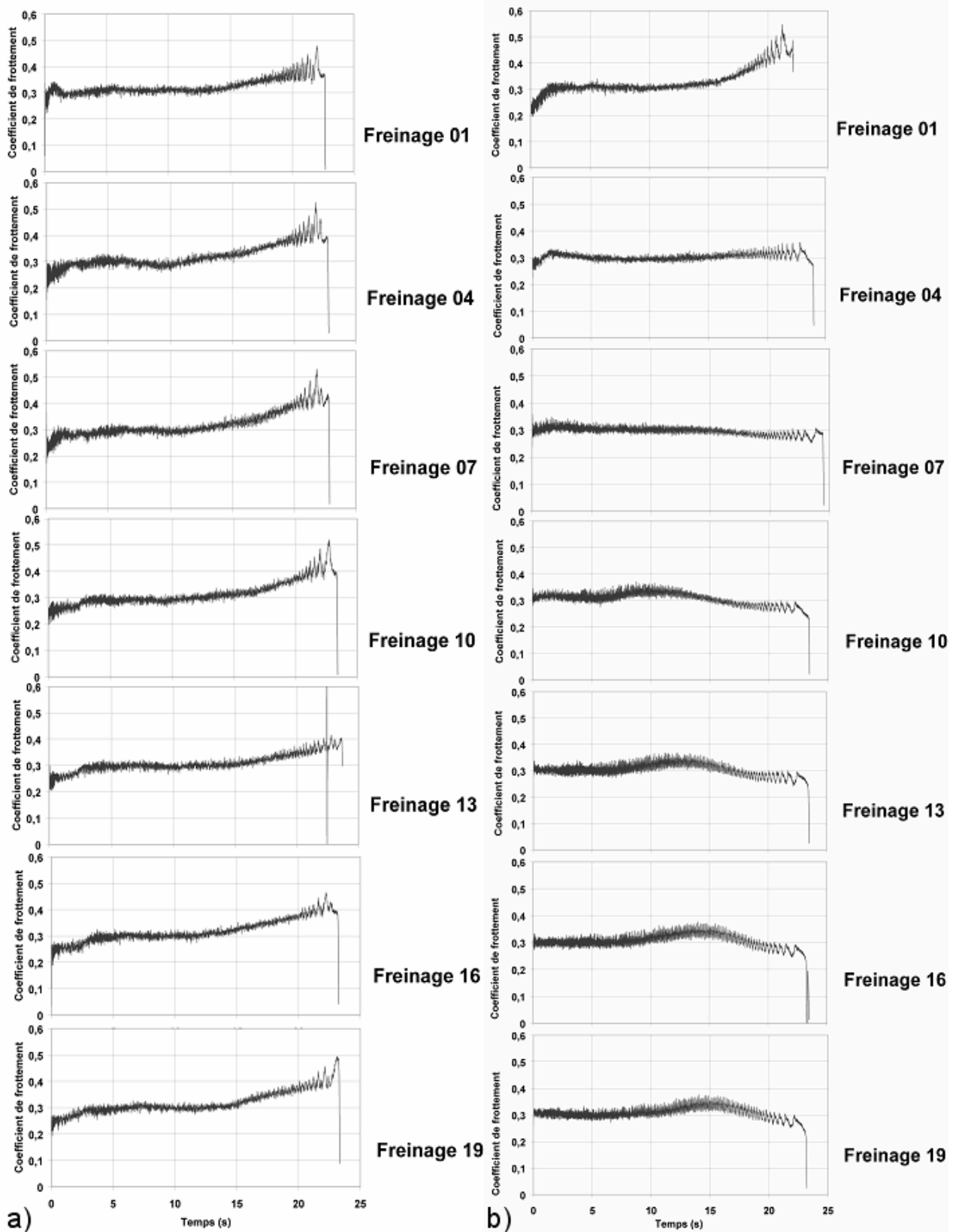


Figure III-33 : Evolutions du coefficient de frottement pour 7 freinages d'arrêt représentatifs de la succession a) sans cumul de chaleur, b) avec cumul de chaleur

L'évolution du coefficient de frottement au cours des freinages ne présente pas de modification majeure d'un freinage à l'autre au cours de la succession sans cumul de chaleur et reste très similaire à celle observée lors d'un freinage d'arrêt isolé à basse énergie.

En revanche, l'effet de la montée en température lors de la succession de freinages avec cumul d'énergie est observable. Au cours de cette succession, l'évolution du coefficient de frottement se modifie : en début de freinage le coefficient de frottement devient plus stable avec une valeur de 0,3 ; à mi-freinage, la stabilisation observée au début de la succession laisse place à une bosse avec un maximum de 0,34 qui apparaît de plus en plus tard. Au fur et à mesure de la succession ; à la fin du freinage, la remontée du coefficient de frottement observée sur le Freinage 01 laisse rapidement place à une chute du coefficient de frottement jusqu'à un minima de 0,28 dès le freinage 10.

La succession de freinages n'entraîne en elle même aucun effet d'histoire comme le montrent les résultats obtenus pour la succession sans cumul de chaleur. Les modifications du comportement tribologique pour la succession avec cumul de chaleur sont donc à attribuer à l'élévation progressive de la température au cours de la succession de freinages.

III.2.3. Mécanismes physiques activés en succession de freinages

Les surfaces de patins ayant frotté au cours des successions de freinages d'arrêt sans et avec cumul ont été observées au MEB et soumises à des analyses X-EDS. Tout comme pour le freinage d'arrêt à basse énergie, trois zones ont été étudiées : la Zone 1 sur le rayon extérieur, la Zone 2 sur le rayon moyen de frottement et la Zone 3 sur le rayon intérieur.

III.2.3.1.a. Mécanismes activés en succession de freinages d'arrêt sans cumul de chaleur

Les investigations menées sur la Zone 1 (Figure III-34) présentent des résultats similaires à ceux obtenus pour la même zone observée après le freinage d'arrêt isolé à basse énergie. La matrice est largement apparente et localement couverte d'un lit de poudre. Les fibres et particules minérales ainsi que les particules de graphite sont visibles en surface. Des plaques de troisième corps sont formées sur des constituants métalliques : les analyses X-EDS montrent que les plaques observées sur les Figures III-35 c et d se sont formées sur une particule de laiton et sur des fibres d'acier.

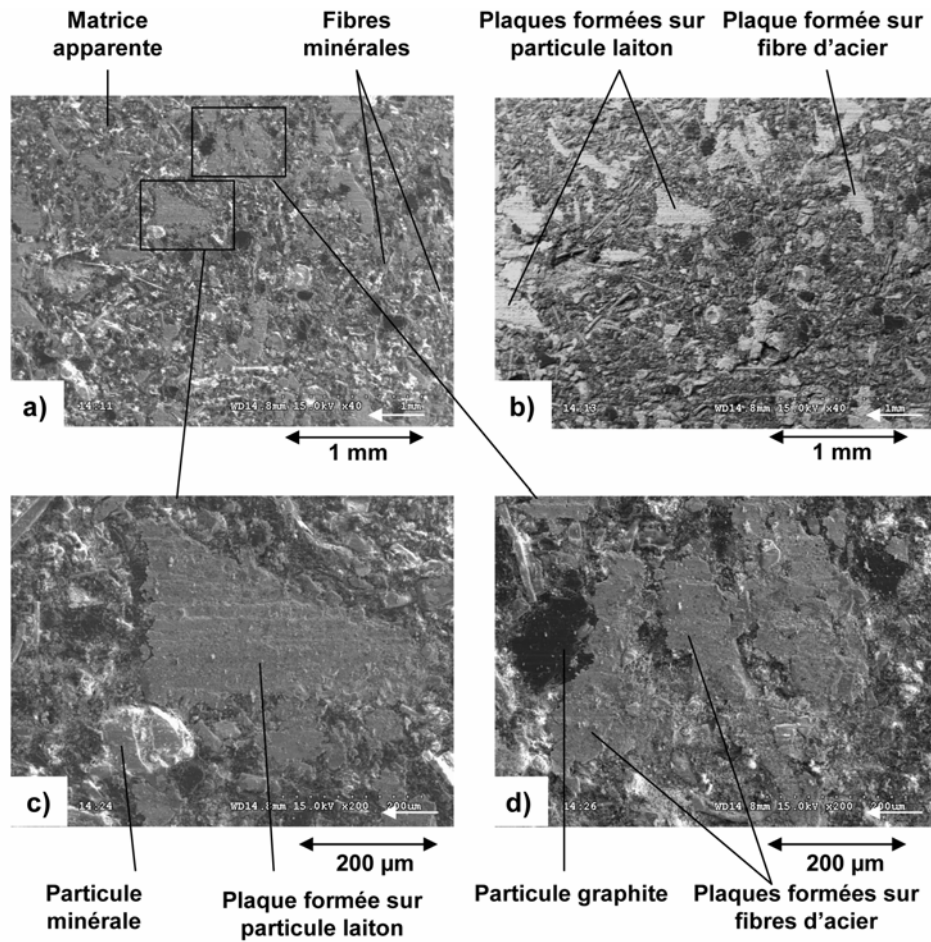


Figure III-34 : Observations MEB de la Zone 1 après succession sans cumul
 a) en électrons secondaires, b) en électrons rétrodiffusés, c et d) détails en électrons secondaires

Sur les Zones 2 et 3, les observations du patin montrent la présence d'un lit de poudre, plus ou moins épais, couvrant presque totalement la matrice.

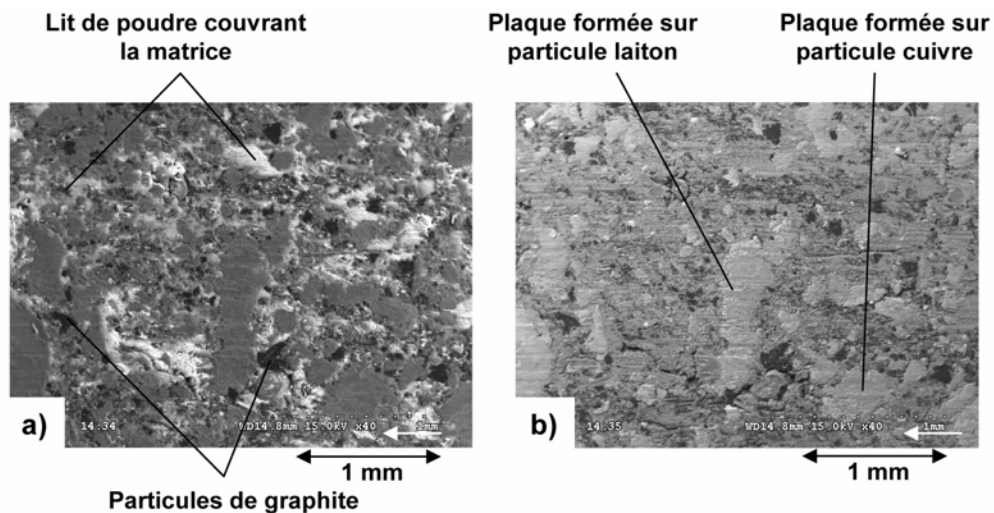


Figure III-35 : Observations MEB de la Zone 2 a) en électrons secondaires, b) en électrons rétrodiffusés

La Figure III-35 présente des observations réalisées sur la Zone 2 : en surface apparaissent des plaques formées sur des constituants métalliques (particules de laiton et de cuivre identifiées sur la Figure III-35b) ainsi que des particules de graphite.

III.2.3.1.b. Mécanismes activé en succession de freinages d'arrêt avec cumul de chaleur

L'observation de la Zone 1 conduit aux mêmes résultats que celle menée sur cette zone après la succession de freinages sans cumul : la matrice est le plus souvent bien apparente entre les particules de graphite arasées et les plaques planes, et recouverte seulement localement par un lit de poudre.

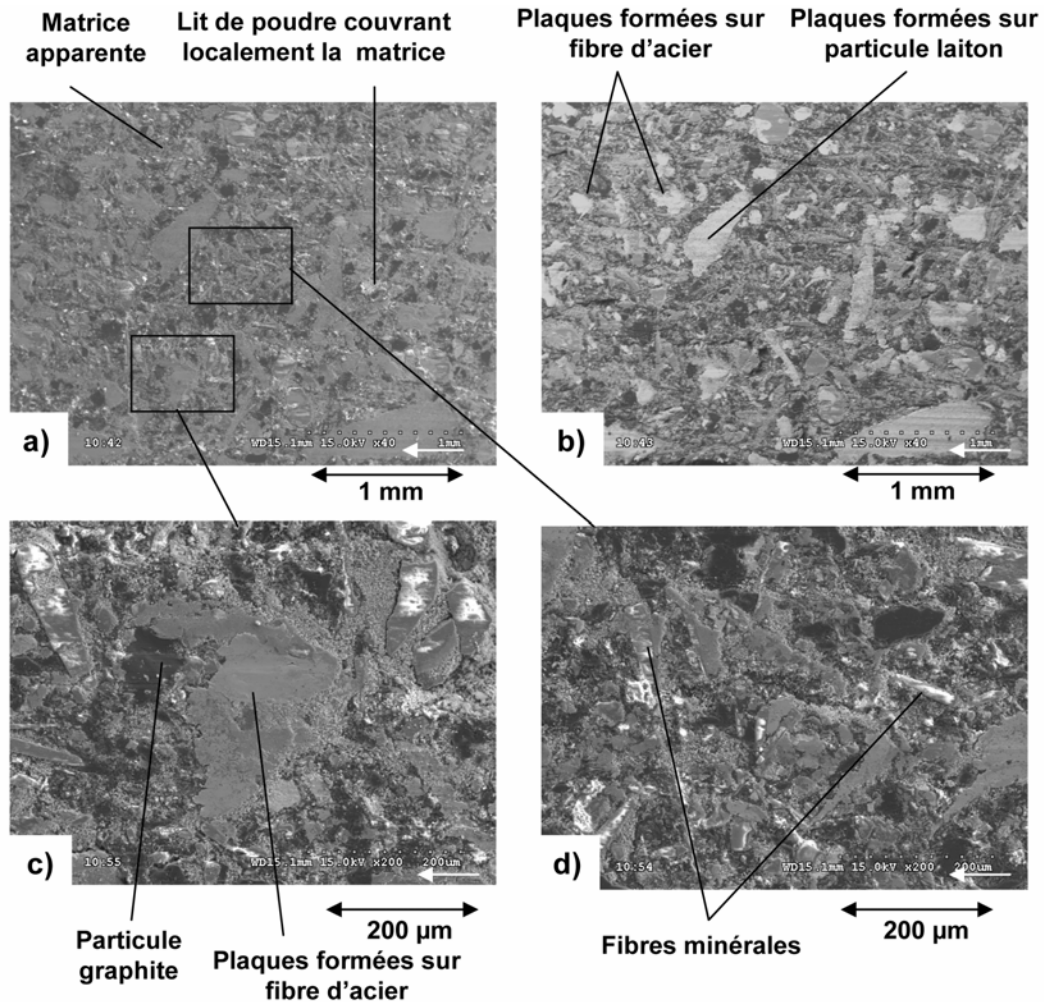


Figure III-36 : Observations MEB de la Zone 1 a) en électrons secondaires, b) en électrons rétrodiffusés, c et d) détails en électrons secondaires à plus fort grossissement

Sur la Zone 2 (Figure III-37), les constituants métalliques sur lesquels se forment les plaques sont moins facilement identifiables : alors qu'en électrons rétrodiffusés les éléments métalliques apparaissent en clair, sur la Figure III-37b, les constituants métalliques apparaissent moins nettement que sur la Zone 1 (Figure III-36b). Les plaques couvrant les constituants métalliques rendent plus difficile l'observation de ces constituants. Les observations de la Zone 2 révèlent également la présence d'un lit de poudre compacté couvrant localement la matrice qui reste encore majoritairement apparente.

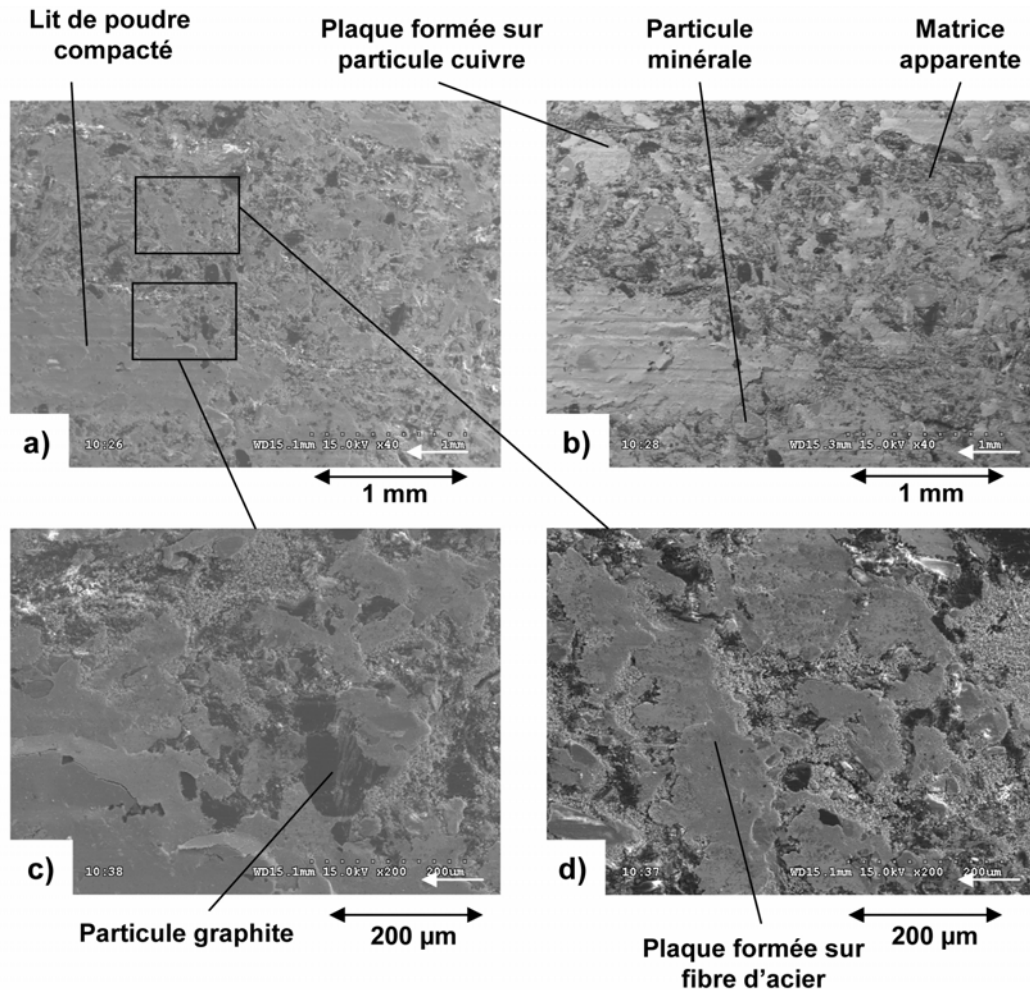


Figure III-37 : Observations MEB de la Zone 2 a) en électrons secondaires, b) en électrons rétrodiffusés, c et d) détails en électrons secondaires

La Figure III-38 présente les observations réalisées sur la Zone 3 : le lit de poudre compacté recouvre la quasi totalité de la surface ne laissant cette fois apparaître que très peu la matrice. En surface, les particules de graphite sont apparentes alors que les constituants métalliques sur lesquels se forment les plaques d'épaisseur plus importante sont moins aisément identifiables. La composition du lit de poudre a été analysée dans la zone de pointé circulaire (1) : le spectre d'analyse (Figure III-39) montre la présence des éléments caractéristiques du troisième corps provenant des constituants du patin et du disque.

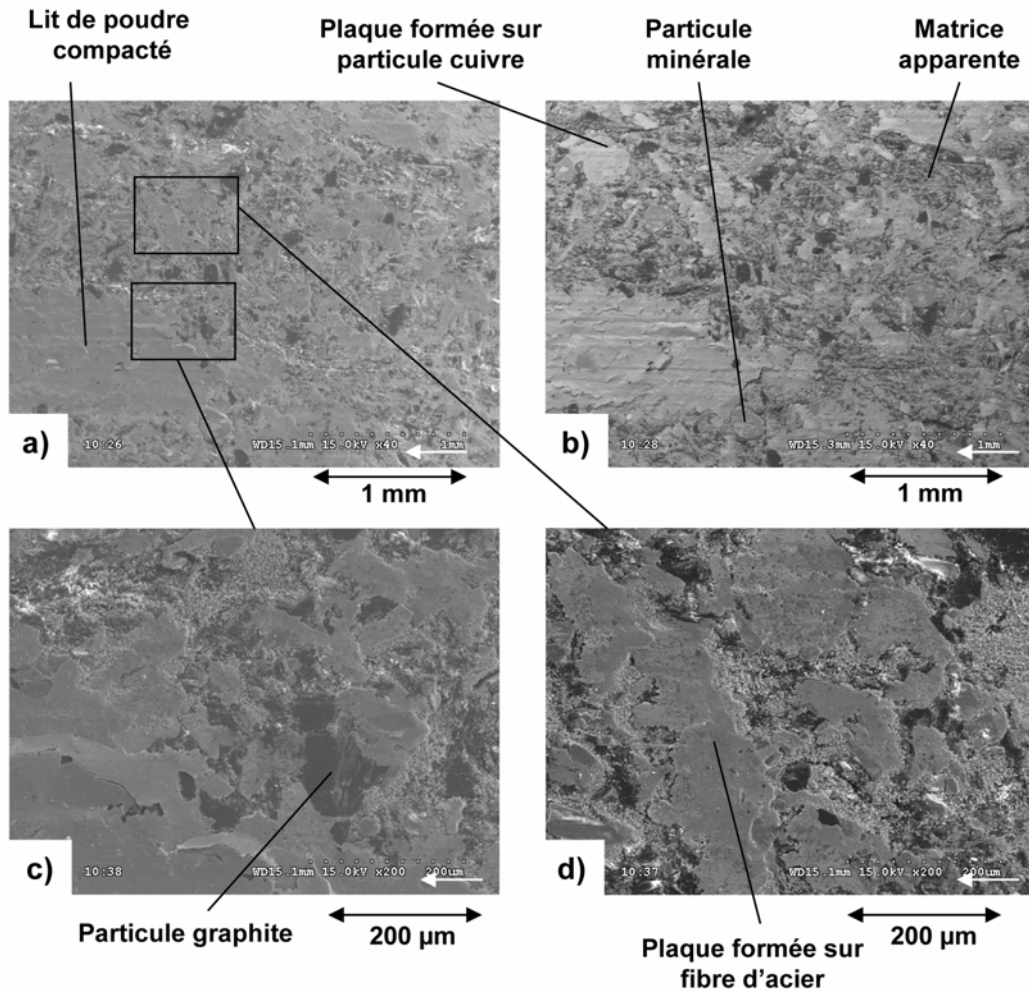


Figure III-38 : Observations MEB de la Zone 3 a) en électrons secondaires, b) en électrons rétrodiffusés, c et d) détails en électrons secondaires

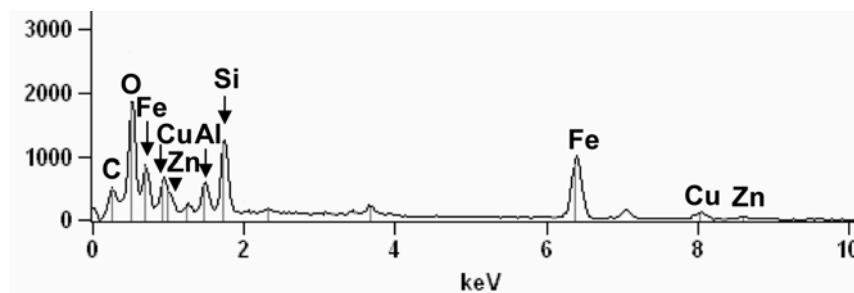


Figure III-39 : Spectre de l'analyse X-EDS du pointé (1) sur la Zone 3 du patin

III.2.4. Conclusions

La réalisation des deux successions de freinages sans cumul et avec cumul de chaleur a permis d'étudier l'influence du niveau de température atteint au cours de la succession sur le comportement du contact disque patin pour le couple de matériaux étudié. La succession sans cumul présente pour chacun de ses freinages la même évolution de température que celle obtenue en freinage isolé à basse énergie : à 2 mm de profondeur, dans le disque et dans le patin, les températures atteignent des maxima respectivement de l'ordre de 115 et 75°C. La succession avec

cumul de chaleur conduit à des valeurs en ces mêmes points de l'ordre de 340 et 245°C, et constitue donc bien, comme attendu, le niveau sévère de sollicitation pour ce type d'essai.

Les gradients thermiques de surface ont été observés par thermographie. Les phénomènes observés lors de la succession sans cumul sont similaires à ceux observés sur un freinage d'arrêt isolé à basse énergie : une bande chaude étroite se forme sur le rayon extérieur puis migre vers le rayon intérieur avant de perdre en intensité jusqu'à l'homogénéisation de la température. La succession avec cumul de chaleur donne des résultats identiques à ceux obtenus en freinage isolé à basse énergie, mais les gradients thermiques de surface évoluent au cours de la succession : la sollicitation thermique apparaît sur le rayon extérieur et s'étend rapidement à la totalité de la surface de la piste conduisant à une homogénéisation de la sollicitation thermique. La succession de freinages avec cumul permet ainsi d'atteindre un niveau de sollicitation thermique de surface élevé tout en évitant l'apparition en surface de phénomènes de localisation thermique importants [Bulthé 2005b].

L'évolution du coefficient de frottement au cours des freinages ne présente pas de modification majeure d'un freinage à l'autre de la succession sans cumul de chaleur et reste très similaire à celle observée lors d'un freinage d'arrêt isolé à basse énergie. En revanche, lors de la succession avec cumul, l'effet de la montée en température est très visible. Alors que pour les premiers freinages de la succession, une remontée du coefficient de frottement est observée en fin de freinage, une chute du coefficient de frottement marque la fin des freinages à partir du 7^{ème} freinage de la succession. Il est à noter que l'absence de gradients thermiques de surface importants au cours de la succession avec cumul de chaleur permet un comportement stable du coefficient de frottement même à température élevée.

Les observations de surface ont été menées sur chaque patin après le dernier freinage des deux successions. Sur le patin ayant frotté au cours de la succession sans cumul de chaleur, les observations conduisent à des résultats proches de ceux obtenus pour un seul freinage d'arrêt isolé à basse énergie : la matrice est apparente sur l'extérieur de la piste de frottement alors que sur les rayons moyen et intérieur un lit de poudre couvre la matrice. La quantité de poudre observée après la succession est plus importante que celle observée après le freinage isolé où elle ne couvrirait que le rayon moyen. Les observations menées après la succession avec cumul montrent sur le rayon extérieur une matrice apparente, et du rayon moyen au rayon intérieur, une quantité de poudre croissante et compactée sous l'action du frottement. Ces lits de poudre ont donc participé au contact à la fin du freinage.

CHAPITRE IV. ANALYSE DES MECANISMES DE FROTTEMENT EN FREINAGE D'ARRET ISOLE A HAUTE ENERGIE

IV.1. Freinages interrompus : méthodologie pour l'analyse des mécanismes de frottement.....	101
IV.2. Formation et migration de la bande chaude	105
IV.2.1. Zone chaude après le passage de la bande chaude	106
IV.2.2. Zone froide avant le passage de la bande chaude.....	107
IV.2.3. Débits de troisième corps.....	108
IV.3. Formation et expansion des points chauds.....	110
IV.3.1. Zone chaude de localisation des points chauds	112
IV.3.2. Zone froide extérieure aux points chauds.....	114
IV.3.3. Zone de transition : migration des points chauds.....	115
IV.3.4. Débits de troisième corps.....	117
IV.4. Discussion et conclusions.....	117

Deux types de freinage d'arrêt isolés ont été présentés dans le Chapitre III, l'un à basse énergie et l'autre à haute énergie. Lors de ces freinages, les observations en thermographie ont permis de suivre les phénomènes de localisation thermique de surface et de corrélérer ces phénomènes avec l'évolution du coefficient de frottement dans le cas du freinage à haute énergie. La caractérisation de surface faite à partir d'observations post-mortem du pion et du disque a montré un lien entre l'historique des phénomènes de localisation thermique pendant les freinages et la répartition du troisième corps en surface en fin de freinage. Ce lien montre qu'il existe une interaction entre les phénomènes de localisation thermique et les mécanismes physiques de frottement. Des corrélations analogues ont également été mises en évidence pour le dernier freinage des successions sans et avec cumul de chaleur. Toutefois, les observations post-mortem effectuées en fin de freinage ne permettent pas de suivre l'évolution des mécanismes physiques de frottement activés pendant le freinage, en particulier de suivre leur interaction avec les phénomènes thermiques locaux et transitoires qui caractérisent les freinages d'arrêt.

Dans ce but, trois techniques expérimentales ont été mises en oeuvre de manière complémentaire dans le cas du freinage d'arrêt isolé à haute énergie : i) l'interruption du freinage à des instants typiques de manière à caractériser les surfaces de frottement aux principales étapes du freinage d'arrêt, ii) l'observation en vidéo rapide de la piste de frottement du disque pendant le freinage de manière à mieux rendre compte du caractère transitoire des phénomènes étudiés, iii) la technique FIB (Focused Ion Beam, faisceau d'ions focalisé) en microscopie ionique afin de caractériser localement des sections droites des surfaces de frottement.

La mise au point du dispositif d'observation en vidéo de la piste du disque a été réalisée par Matthieu François au cours de son post-doctorat au laboratoire. Il a associé à une caméra CCD un stroboscope et un système de synchronisation avec la position du disque sur le tribomètre de freinage de manière à visualiser une zone précise de la piste de frottement du disque à chaque tour pendant le freinage. Les essais ainsi que l'analyse des résultats ont été réalisés en commun avec Matthieu François [François 2005, 2006, Bulthé 2005].

La technique FIB a été mise en oeuvre par le BAM (Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin) en collaboration avec Werner Österle [Osterle 2006a et b]. Cette technique permet de découper dans les matériaux des empreintes de plusieurs dizaines de micromètres de profondeur et de largeur, les zones découpées pouvant être observées avec précision au microscope ionique à balayage (SIM).

IV.1. Freinages interrompus : méthodologie pour l'analyse des mécanismes de frottement

Le choix des interruptions du freinage d'arrêt isolé à haute énergie a été effectué en considérant les étapes qui caractérisent l'évolution des phénomènes de localisation thermique et la localisation de ces phénomènes sur la surface de frottement du disque pendant le freinage. Ainsi, les neuf thermogrammes de la surface du disque de la Figure IV-1 forment une reconstitution de l'évolution des phénomènes de localisation thermique et permettent de définir une cartographie de la surface à chaque étape en fonction de la sollicitation thermique du disque. Rappelons que ces thermogrammes du disque complet ont été reconstitués par associations de huit images infrarouges de huitièmes de la piste de frottement.

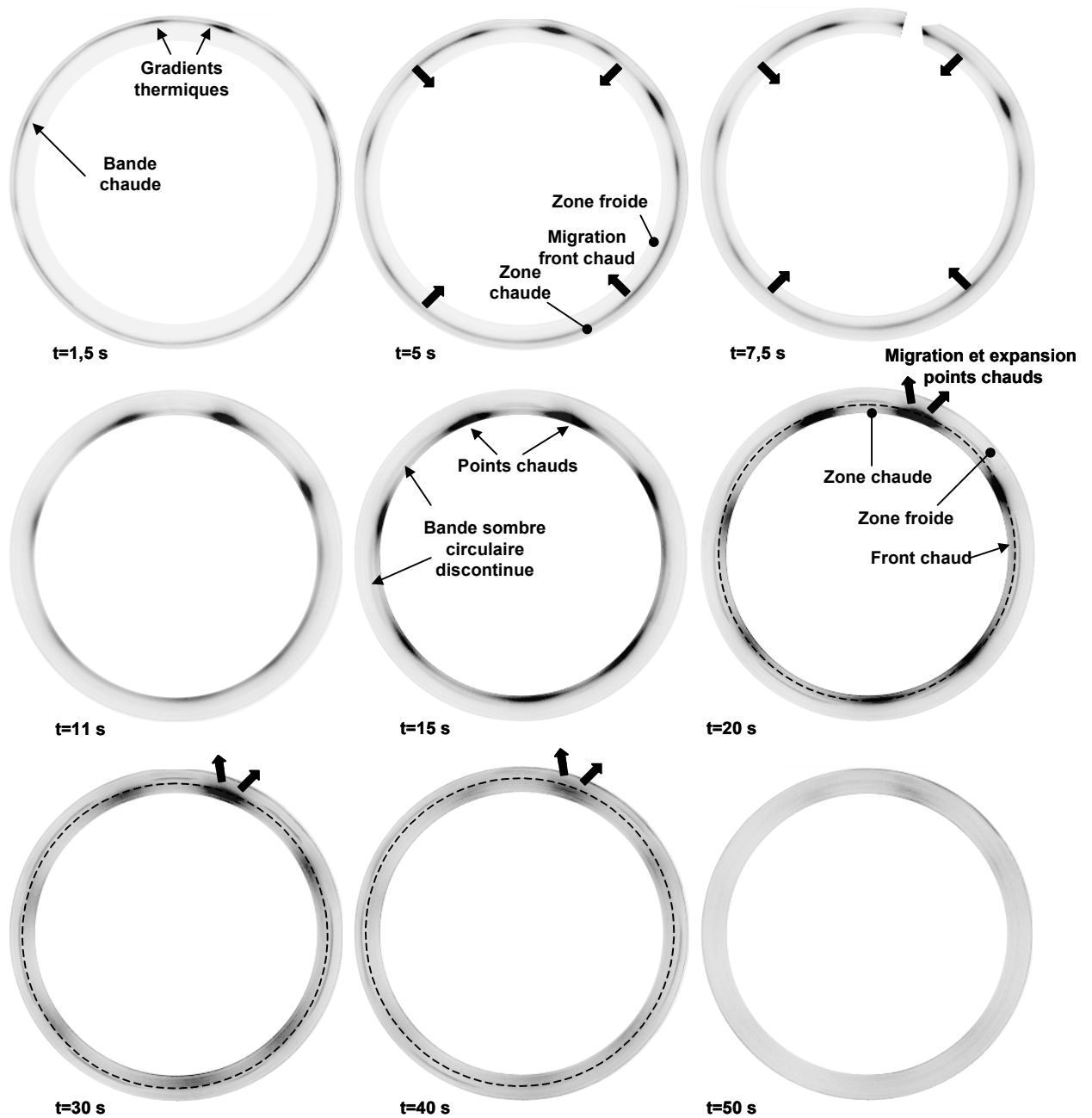


Figure IV-1 : Thermogrammes de la piste de frottement du disque représentatifs des étapes de la formation et de la migration des phénomènes de localisation thermique

A $t = 1,5$ s, la bande chaude se forme sur l'extérieur de la piste de frottement du disque et constitue un front chaud. Jusqu'à $t = 11$ s, la bande chaude, et donc le front chaud, migrent radialement sur la piste du disque du rayon extérieur jusqu'au rayon intérieur. Ainsi, à chaque instant, ce front chaud sépare la piste de frottement en deux zones : la zone chaude, partie extérieure de la piste qui a été sollicitée par la bande chaude, et la zone froide, partie intérieure de la piste non encore sollicitée par la bande chaude. A $t = 11$ s, la bande chaude, qui est localisée sur le rayon intérieur de la piste, donne naissance aux points chauds par regroupement et intensification des gradients thermiques circonférentiels apparus pendant la phase de migration. Ces points chauds augmentent en intensité jusqu'à $t = 15$ s. A cet instant, les points chauds apparaissent régulièrement répartis sur la circonférence. A partir de cet instant et jusqu'à la fin du freinage, les points chauds grossissent et migrent vers le rayon extérieur, provoquant la formation d'un second front chaud qui se déplace cette fois du rayon intérieur vers le rayon extérieur. De

même que dans le cas de la migration de la bande chaude initiale, la piste de frottement est à nouveau partagée en une zone chaude, la partie intérieure sollicitée par les points chauds, et une zone froide, la partie extérieure de la piste en aval des points chauds.

Cinq essais ont été menés, dans les mêmes conditions expérimentales que le freinage qui vient d'être décrit, et interrompus à cinq instants, numérotés de 1 à 5 dans l'ordre chronologique, qui ont été choisis de manière à étudier les mécanismes physiques de frottement associés aux phases de formation et de migration des phénomènes de localisation thermique. Les interruptions 1 et 2 (respectivement à $t = 1,5$ s et $t = 5$ s) permettent de caractériser les phases de formation et de migration de la bande chaude, les interruptions 3 et 4 (respectivement à $t = 12$ s et $t = 20$ s), celles de formation et migration des points chauds, l'interruption 5 (à $t = 50$ s) permet de caractériser la surface lorsque sa température s'homogénéise avec la disparition des points chauds. Pour chacun de ces 5 essais interrompus un disque et un patin neufs ont été utilisés, le disque et le patin ayant été préparés en suivant le même protocole que celui utilisé pour les essais présentés au chapitre précédent.

La Figure IV-2 présente les résultats obtenus au moment de l'interruption pour chacun des cinq essais interrompus, à savoir : le thermogramme du disque complet, et à la même échelle, une photographie d'ensemble du patin et, placé en correspondance, un zoom d'un secteur angulaire du thermogramme du disque. La reconstitution des thermogrammes du disque complet pour chaque freinage interrompu montre bien les étapes de formation et de migration des phénomènes de bande chaude (interruptions 1 et 2) et de points chauds (interruptions 3 et 4) puis l'homogénéisation de la température de surface (interruption 5), ces phénomènes étant typiques mais plus ou moins marqués d'un freinage à l'autre.

Pour chaque interruption, la position du front chaud délimitant la zone froide et la zone chaude est identifiée sur le détail du thermogramme et est transposée sur la surface du patin. Sur cette surface, un lit de poudre est observable sur un rayon situé en aval du front chaud pour les interruptions 1 à 4. Alors que la bande chaude migre de l'extérieur vers l'intérieur de la piste, le lit de poudre est observé à l'intérieur sur la zone froide (interruptions 1 et 2), tandis que, lorsque les points chauds s'étendent vers l'extérieur de la piste, le lit de poudre est observé à l'extérieur sur la zone froide. Le lit de poudre apparaît peu dense pour les interruptions 1 et 2 lors de la migration de la bande chaude alors que lors de l'expansion et de la migration des points chauds, il est plus important et s'intensifie avec la migration vers le rayon extérieur. Pour l'interruption 5, le lit de poudre apparaît compacté et couvre une grande partie de la piste de frottement sur le rayon extérieur. Ainsi, la migration radiale des phénomènes de localisation thermique s'accompagne de la formation d'un lit de poudre qui se déplace en aval du front chaud et s'intensifie au fur et à mesure du déroulement du freinage. On peut considérer que ce lit de poudre se forme par accumulation de poudre provenant d'un débit source de troisième corps émis par le front chaud.

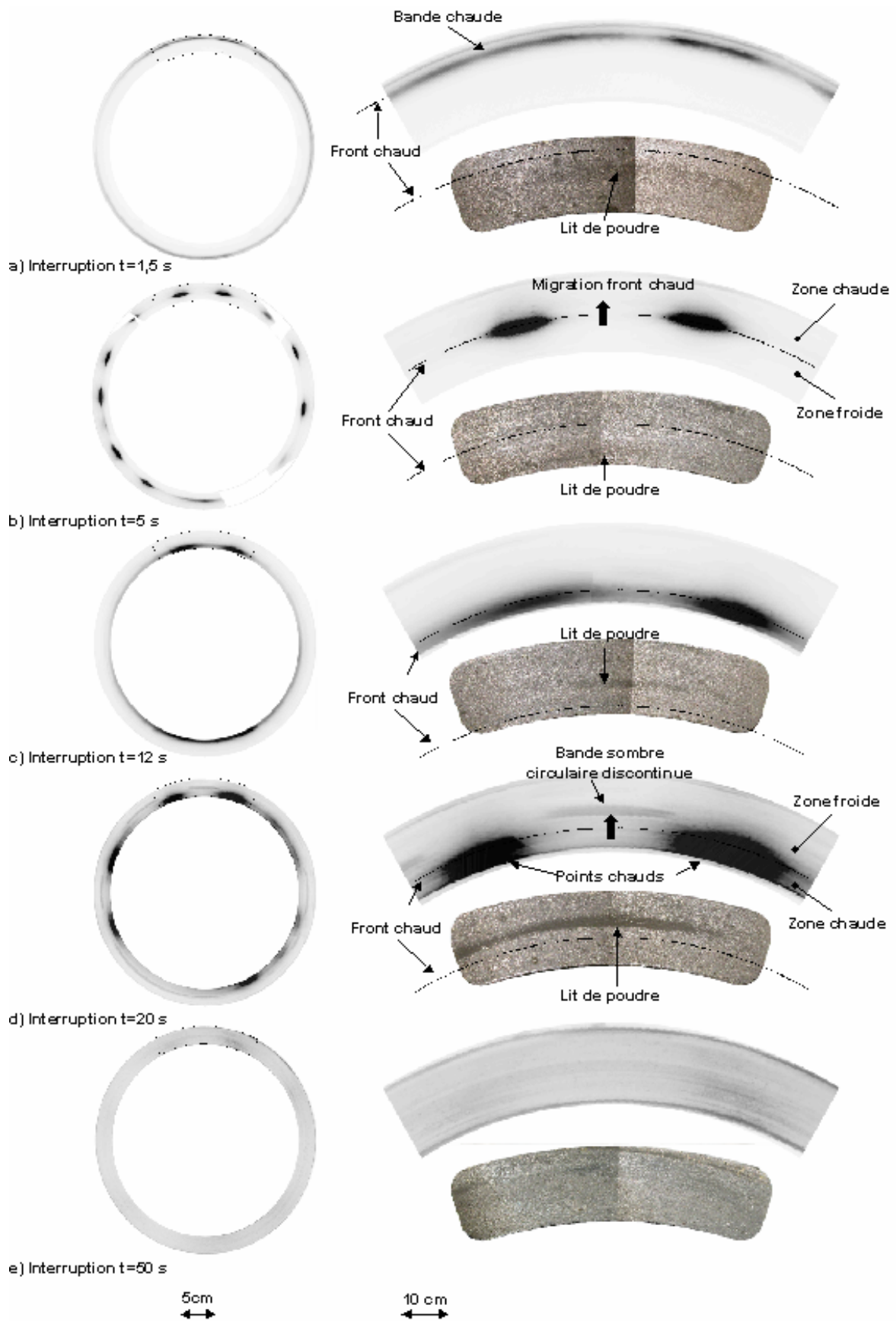


Figure IV-2 : Thermogramme du disque complet et zoom du thermogramme associé à l'observation de la surface frottante du patin à chaque interruption : a) formation de la bande chaude, b) migration de la bande chaude, c) formation des points chauds, e) homogénéisation de la température de surface

Notons également, sur le thermogramme de l'interruption 4, la présence de la bande sombre circulaire discontinue qui avait également été observée en thermographie lors de l'essai de freinage isolé à haute énergie (Chapitre 3).

Ces premières observations confirment les résultats du chapitre précédent sur les interactions entre les phénomènes de localisation thermique et les mécanismes physiques de frottement. L'objet des deux paragraphes suivants est l'étude de ces mécanismes pour la formation et la migration de la bande chaude d'une part, la formation et la migration des points chauds d'autre part. Les observations des surfaces effectuées après l'interruption 5 n'apportent pas d'éléments nouveaux par rapport aux observations présentées dans le chapitre précédent lors de l'étude du freinage d'arrêt isolé à haute énergie, elles ne sont donc pas présentées dans ce chapitre.

Rappelons que l'état initial des couples disque patin avant les freinages à haute énergie interrompus correspond à celui d'un freinage d'arrêt à basse énergie (paragraphe I.3.1.3.), pour lequel les surfaces du disque et du patin ont été caractérisées au Chapitre III. Dans les descriptions qui suivent, l'état initial des surfaces fait ainsi référence aux surfaces étudiées après ce freinage.

IV.2. Formation et migration de la bande chaude

L'étude de la formation et de la migration de la bande chaude, ainsi que des débits de troisième corps associés, repose, d'une part, sur l'observation des surfaces après les interruptions 1 et 2, d'autre part, sur l'observation de la surface du disque en vidéo rapide en début de freinage. La Figure IV-3 présente la localisation des zones chaudes et froides après les interruptions 1 et 2 et dans lesquelles les observations ont été faites.

Aucune différence notable n'a été observée localement entre les zones observées après les deux essais, ainsi les résultats sont présentés de manière globale pour les observations de la zone froide et celle de la zone chaude.

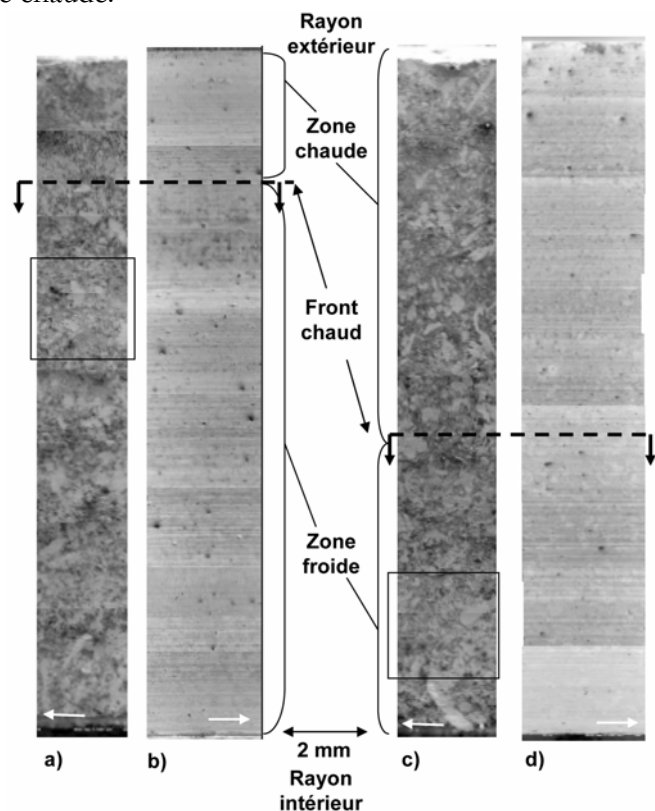


Figure IV-3 : Localisation des zones froide et chaude sur les bandes radiales étudiées des surfaces de frottement du patin (a et c), du disque (b et d) après les interruptions 1 (a et b) et 2 (c et d)

IV.2.1. Zone chaude après le passage de la bande chaude

La Figure IV-4 présente des observations MEB des surfaces du disque et du patin dans la zone chaude après le passage de la bande chaude.

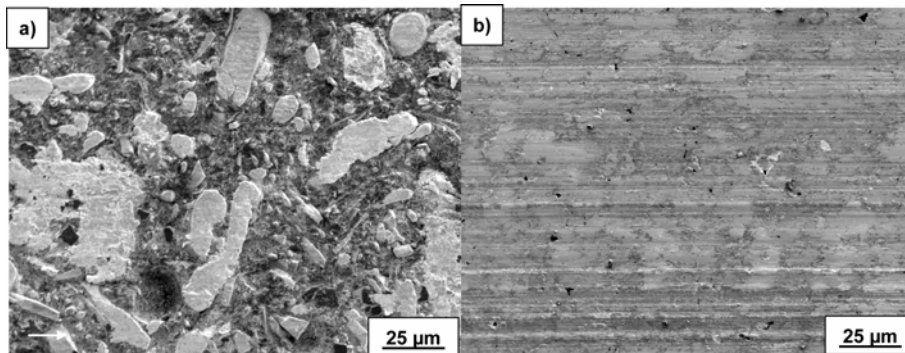


Figure IV-4 : Surface du disque (a) et du patin (b) dans la zone chaude

Sur la surface du patin, des particules et fibres minérales arasées ainsi que des fibres métalliques sur lesquelles se forment les plaques de troisième corps de petites tailles sont identifiables. En l'absence de poudre, la matrice est bien apparente. Sur la surface du disque, des fissures sont visibles et la surface du disque (zones les plus claires) est couverte d'un troisième corps (zones plus sombres). Des poudres sont apparentes en surface, accumulées dans le sens du glissement.

Pour appuyer ces résultats, une section du disque a été réalisée par la technique FIB dans le sens du glissement dans une zone couverte de 3^{ème} corps. La section a ensuite été observée en microscopie ionique à balayage avec un tilt de 43,8° (Figure IV-5a et b). Le dépôt de platine nécessaire pour procéder à la découpe FIB est visible à la surface du disque. Sous le dépôt de platine, la microstructure du disque est observable et une lamelle de graphite ainsi qu'une fissure reliant l'extrémité de la lamelle et la surface sont visibles. La microstructure perlitique de la fonte apparaît déformée. A plus fort grossissement, entre le dépôt de platine et la matrice, l'observation montre bien la couche de troisième corps dont l'épaisseur atteint 1 μm.

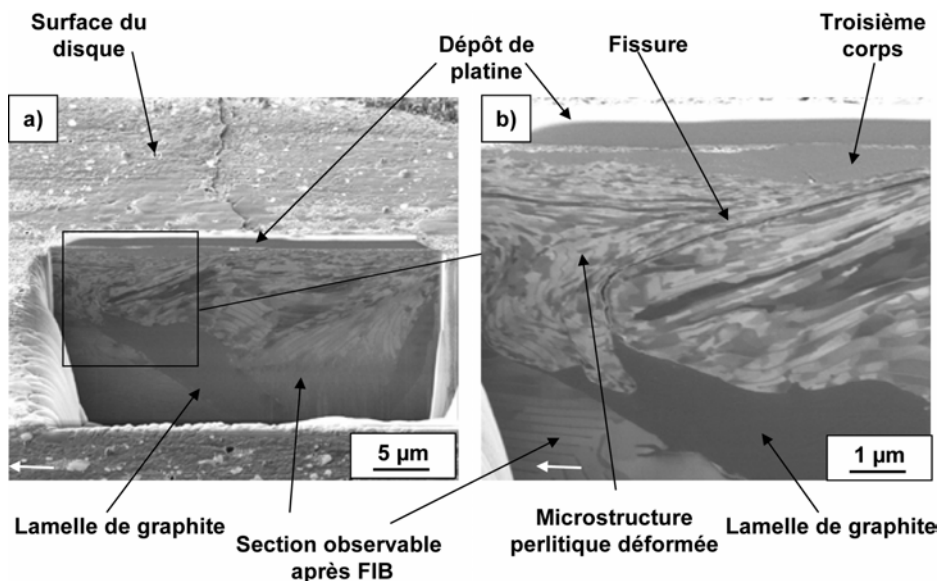


Figure IV-5 : Surface du disque dans la zone chaude : a et b) Observations de coupes FIB à deux grossissements (tilt à 43,8°)

Le passage de la bande chaude du freinage à haute énergie a donc conduit à des modifications importantes des surfaces de frottement par rapport à leur état initial observé après le freinage d'arrêt à basse énergie : côté patin, la matrice n'est plus couverte de poudre et la taille des plaques planes de 3^{ème} corps est plus faible après le passage de la bande chaude, côté disque, le troisième corps couvre plus largement la surface et des fissures sont visibles.

IV.2.2. Zone froide avant le passage de la bande chaude

Les observations dans la zone froide du disque et du patin sont présentées en Figure IV-6. La surface du patin est couverte localement d'un lit de poudre peu dense laissant apparaître les constituants qu'il couvre tels les plaques et les fibres minérales. Les observations de la surface du disque montrent la présence d'un troisième corps sombre couvrant partiellement la fonte ainsi que l'accumulation de ce troisième corps le long du réseau de lamelles de graphite.

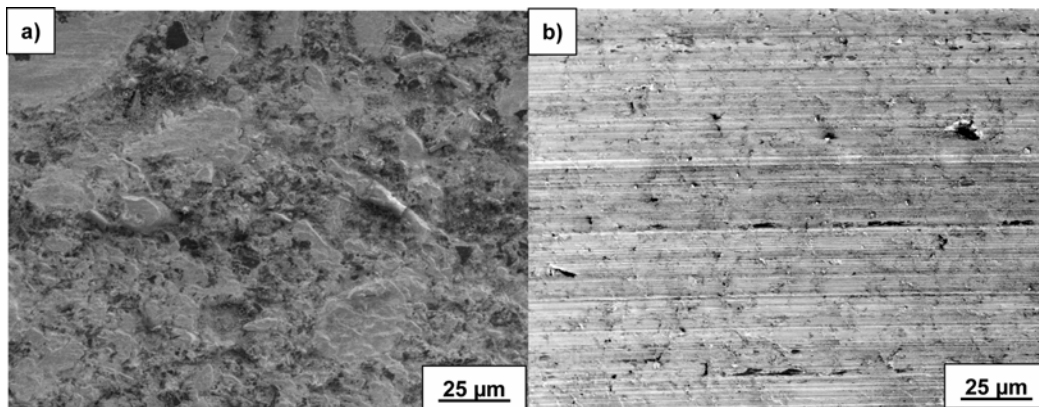


Figure IV-6 : Surface du disque a) et du patin b) dans la zone froide

A la surface du patin, le lit de poudre visible à plus faible grossissement (Figure IV-3) est observé en Figure IV-7 à plus fort grossissement. Les poudres couvrent ici la quasi totalité de la surface recouvrant les plaques et fibres arasées encore discernables. Les observations de la zone froide ont montré que le lit de poudre était d'autant moins dense que l'on s'éloignait du front chaud.

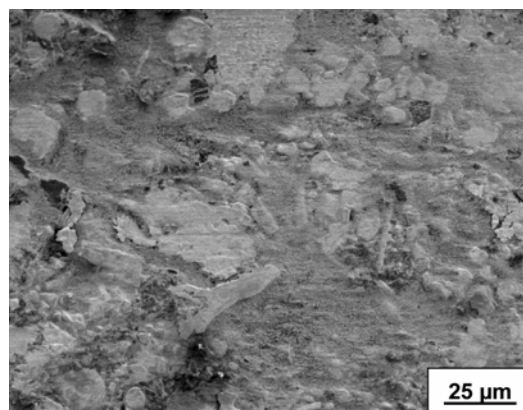


Figure IV-7 : Observation du lit de poudre formé sur le patin

Là aussi, pour la zone froide, l'effet des premières secondes du freinage à haute énergie est visible à la surface du patin : l'épais lit de poudre partiellement compacté couvrant le rayon intérieur après le freinage à basse énergie n'est plus observable a laissé place à un lit de poudre moins dense formé en aval du front chaud et dont la densité diminue lorsque l'on s'éloigne du

front chaud. Les observations menées sur le disque ne présentent quant à elles pas de différence avec celles obtenues après le freinage à basse énergie.

IV.2.3. Débits de troisième corps

Les observations précédentes ont montré que la migration de la bande chaude s'accompagnait de débits de troisième corps par la formation de poudre en amont et en aval de cette migration. Toutefois, la quantité de poudre produite lors d'un unique freinage d'arrêt isolé à haute énergie est trop faible pour être observée en vidéo rapide. Les mêmes phénomènes de formation et de migration de bande chaude se produisant à basse énergie et, les essais de freinages cumulés ayant montré que la quantité de poudre qui circule dans le contact croît avec le nombre d'essais, la formation des lits de poudre à la surface du disque a été suivie en vidéo rapide sur un freinage d'arrêt isolé à basse énergie qui a été précédé de plusieurs freinages à basse énergie.

La Figure IV-8 présente les images obtenues en vidéo rapide à différents instants du freinage d'arrêt isolé à basse énergie. La position du front chaud est repérée par la ligne pointillée et son sens de migration est indiqué par la flèche noire.

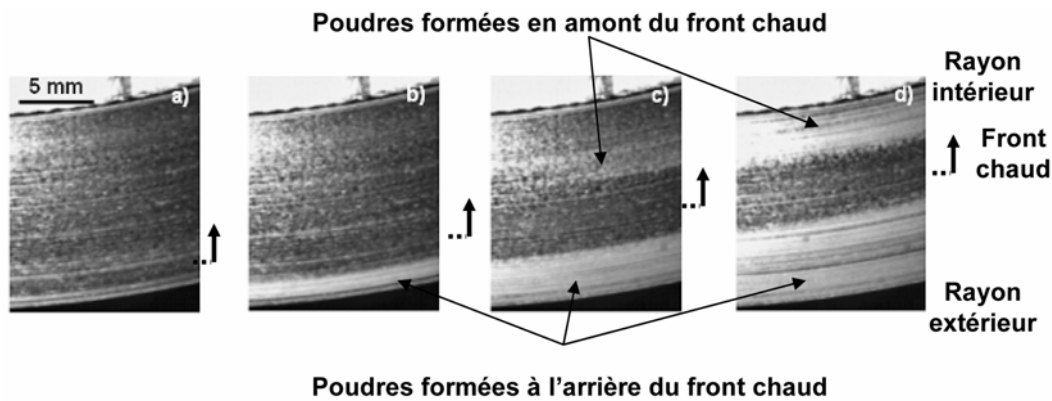


Figure IV-8 : Observations en caméra vidéo de la piste du disque a) $t = 0,5 \text{ s}$,
b) $t = 1,5 \text{ s}$, c) $t = 5 \text{ s}$, d) $t = 10 \text{ s}$

Au tout début du freinage, à $t = 0,5 \text{ s}$ (Figure IV-8a), le front chaud est localisé sur le rayon extérieur de la piste. À $t = 1,5 \text{ s}$ (Figure IV-8b), la migration radiale du front chaud laisse derrière elle un lit de poudre qui s'étend ensuite avec le déplacement du front (Figure IV-8c et d), simultanément, sur les Figure IV-8c et d, des poudres apparaissent à la surface du disque en amont du front chaud et leur quantité augmente alors que le front s'approche du rayon intérieur.

La Figure IV-9 montre des images de la piste prises simultanément en vidéo rapide et en thermographie infrarouge afin de mieux corréliser le déplacement de la bande chaude et la formation des poudres à la surface du disque. Ces images montrent bien la formation des poudres en amont (b,a) puis en amont et en aval de la bande chaude.

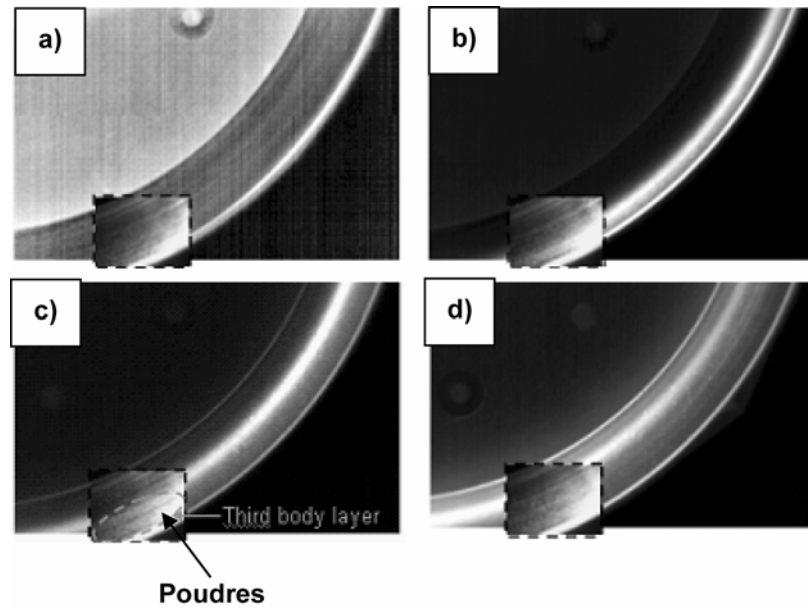


Figure IV-9 : Observations simultanées en vidéo rapide et en thermographie infrarouge de la piste du disque.
 Images a) avant le freinage et à b) $t = 1,5$ s, c) $t = 4$ s, d) $t = 11$ s

Afin de confirmer la mise en place des mêmes mécanismes de frottement au cours du freinage d'arrêt à haute énergie, deux freinages d'arrêt à haute énergie ont été réalisés sur un couple disque patin, avec une interruption du second freinage à $t = 2$ s. La Figure IV-10 montre des observations de bandes radiales de la piste de frottement sur le patin (a,b) et sur le disque (d,e) mises en correspondance avec le thermogramme du disque au moment de l'interruption du second freinage.

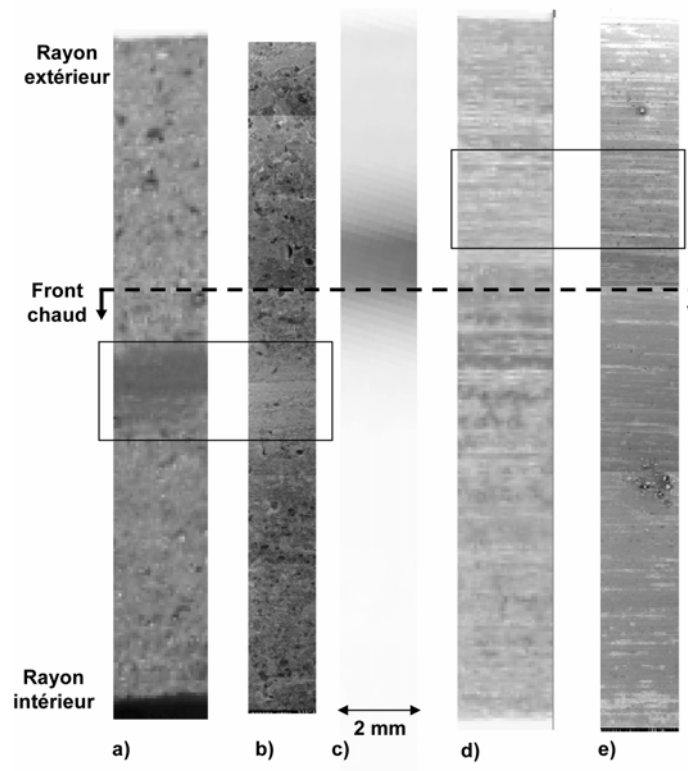


Figure IV-10 : Observations des surfaces après le freinage interrompu à 2 s :
 c) thermogramme du disque, observations optique et au MEB a-b) du patin et d-e) du disque

Les lits de poudre formés sur le disque et le patin sont encadrés en noir. Le lit de poudre formé sur le patin en aval du front chaud est plus important que celui observé après un unique freinage interrompu. Sur le disque, les poudres apparaissent en blanc sur l'observation optique (Figure IV-10d) et sont observées au MEB à plus fort grossissement (Figure IV-11). Ceci confirme bien la mise en place des mêmes mécanismes de frottement lors de la formation et de la migration de la bande chaude pour les freinages à basse et à haute énergie.

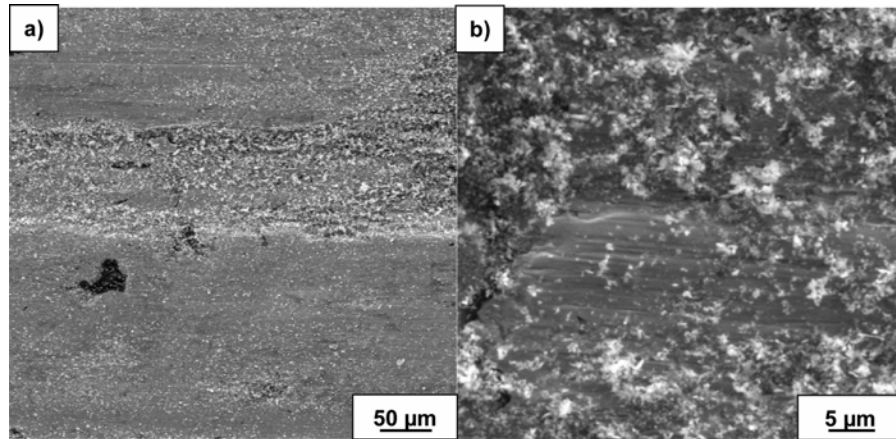


Figure IV-11 : Observations au MEB des poudres sur le disque en amont du front chaud

Le paragraphe suivant concerne l'étude des points chauds. Il est important de noter que, pour cette seconde phase du freinage à haute énergie, le balayage de la piste par la bande chaude a totalement modifié l'état initial issu du freinage d'arrêt à basse énergie.

IV.3. Formation et expansion des points chauds

De même que dans le cas de la bande chaude, les observations effectuées après l'interruption 3 et l'interruption 4 sont concordantes à l'échelle locale. Aussi, les phénomènes étant plus marqués à l'interruption 4, les observations présentées ci-après sont relatives à cette interruption.

Rappelons que l'origine des points chauds résulte de la déformation ondulatoire progressive de la piste de frottement du disque et que, à $t = 20$ s (interruption 4), ces points chauds atteignent leur intensité maximale. Les points chauds sont formés sur les bosses de l'ondulation tandis que, dans les creux, le lit de poudre accumulé en aval du front chaud se visualise sur le thermogramme du disque par la bande sombre circulaire discontinue. Afin de prendre en compte l'ondulation du disque dans l'étude, la surface du disque a été observée dans les creux et sur les bosses de cette ondulation.

La Figure IV-12 présente les observations de bandes radiales du disque sur une bosse (b) et dans un creux (d) respectivement, chacune étant associée à son thermogramme au moment de l'interruption (respectivement a et e). La Figure IV-12c présente une bande radiale de la surface du patin. Le thermogramme du point chaud présent sur la bosse (Figure IV-12a) permet de définir la zone chaude et la zone froide ; entre ces deux zones est définie la zone de transition. A ce grossissement, un lit de poudre est visible en amont du front chaud. La position de ce lit de poudre correspond à la position de la bande circulaire sombre discontinue observée en thermographie infrarouge à cet instant du freinage. Ainsi, cette bande sombre qui migre en aval des points chauds est due à la variation du rayonnement infrarouge de la surface du disque liée à la présence du lit de poudre. Ce rayonnement plus intense peut être lié à une variation d'état de surface et donc d'émissivité de la surface.

Des observations de surface au MEB réalisées dans les trois zones pour le disque et le patin sont présentées dans les paragraphes suivants. Elles sont complétées par des observations de coupes droites obtenues par le procédé FIB en microscopie ionique à balayage.

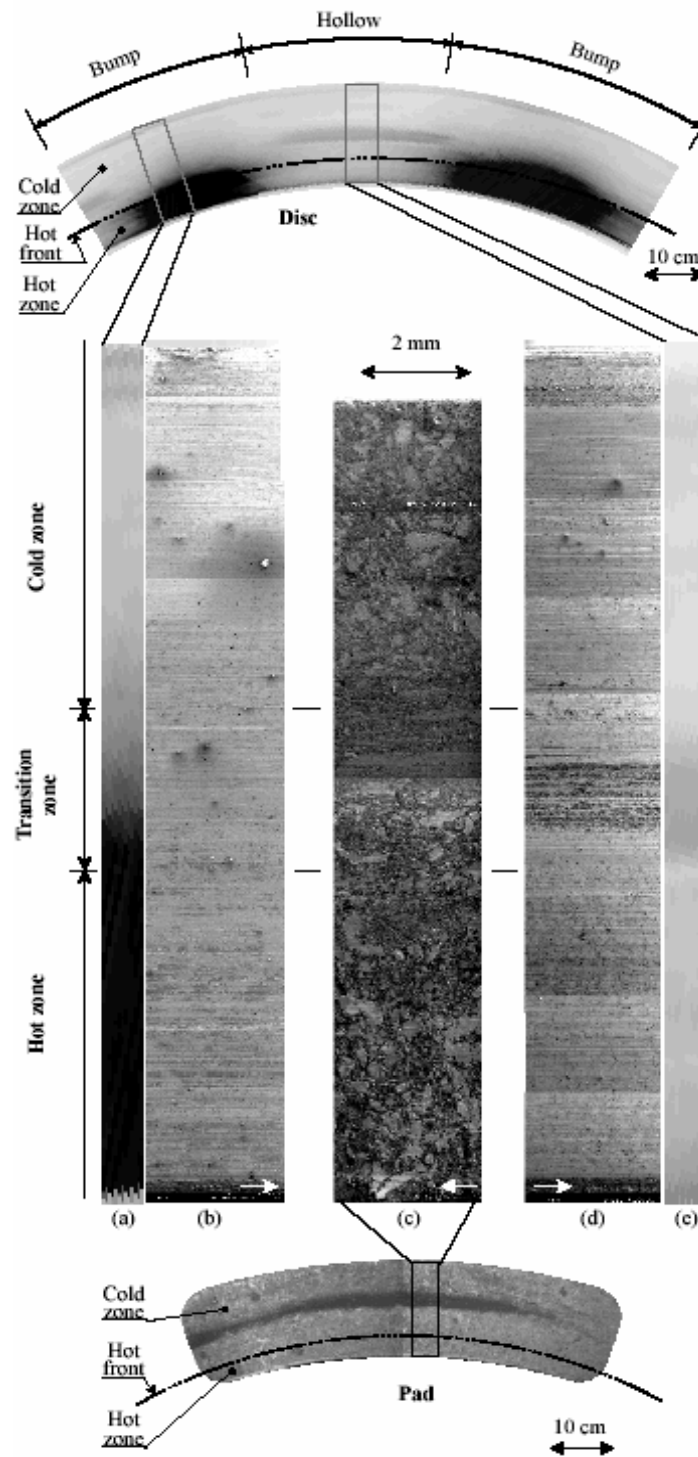


Figure IV-12 : Interruption à $t = 20$ s : observations des surfaces de frottement : bosse du disque (b) associée à son thermogramme (a) et creux du disque (d) associé à son thermogramme (e), patin (c)

IV.3.1. Zone chaude de localisation des points chauds

La Figure IV-13 présente des observations MEB en électrons secondaires réalisées dans la zone chaude sur le disque (sur une bosse a) et b) et dans un creux c) de l'ondulation du disque) et une observation MEB en électrons rétrodiffusés sur le patin (d).

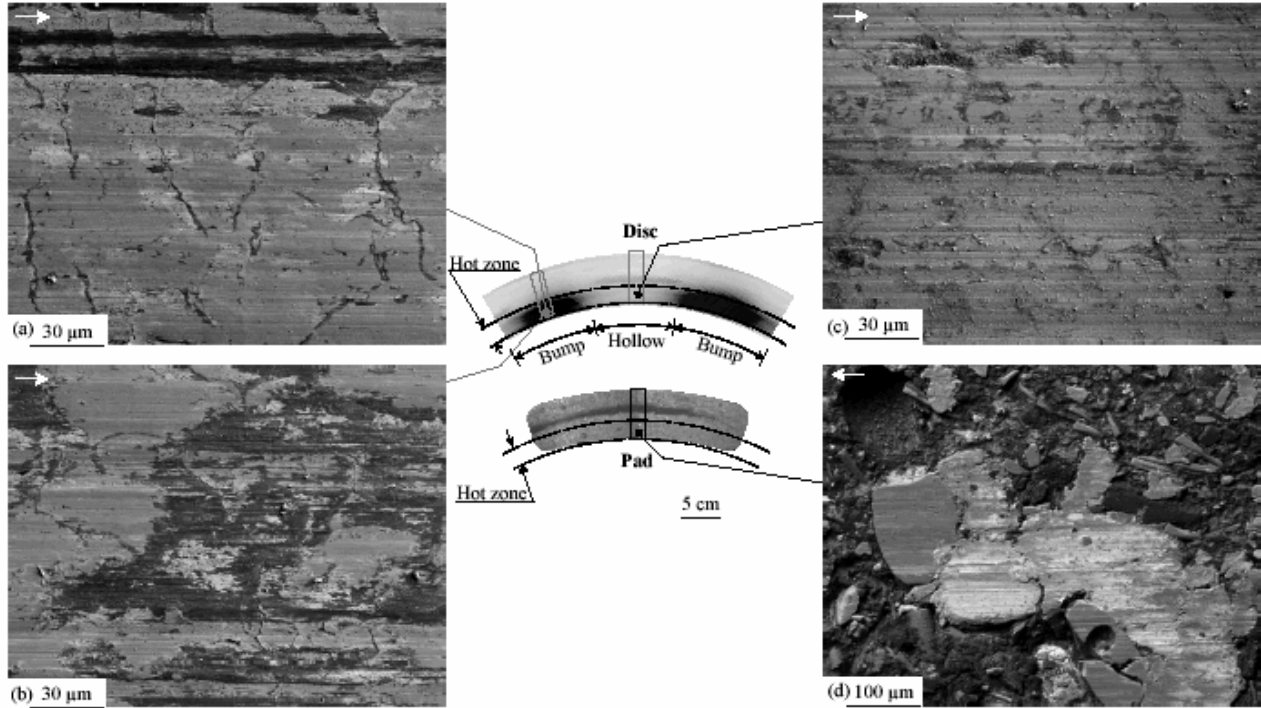


Figure IV-13 : Observation dans la zone chaude a) et b) d'une bosse de l'ondulation du disque, c) d'un creux de l'ondulation de disque et d) de la surface du patin

Dans la zone chaude sur une bosse du disque, le troisième corps compacté est présent en surface sous différentes formes : sur la Figure IV-13a, il est présent le long des lamelles de graphite et dans le sens du glissement, formant des traces sombres ; sur la Figure IV-13b, le troisième corps compacté couvre une large zone de la surface. Sur ces deux observations en électrons secondaires, un troisième corps apparaît également en blanc à la surface ; les analyses EDS ont montré que ce 3^{ème} corps est riche en cuivre. Des observations de coupes FIB ont été réalisées. La Figure IV-14 montre la position d'une coupe FIB sur la surface du disque.

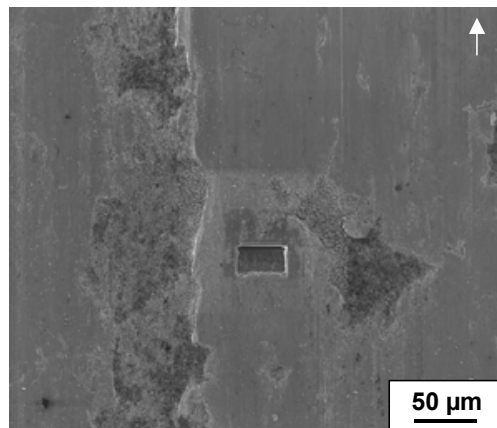


Figure IV-14 : Position de la coupe FIB sur une bosse de l'ondulation du disque dans la zone chaude

La section droite est ensuite observée au microscope ionique avec un tilt de $43,8^\circ$ (Figure IV-15a et b). Une poche de troisième corps atteignant une largeur maximale en surface de $1,5 \mu\text{m}$ et une épaisseur maximale de $0,5 \mu\text{m}$ est visible sous le dépôt de platine. La microstructure de la fonte est parfaitement visible sur cette coupe, et on remarque deux fissures inclinées qui sont probablement amorcées en surface et qui s'enfoncent dans les couches superficielles en suivant la texture métallographique, la plus courte sur plus de $5 \mu\text{m}$ et la deuxième sur plus de $20 \mu\text{m}$.

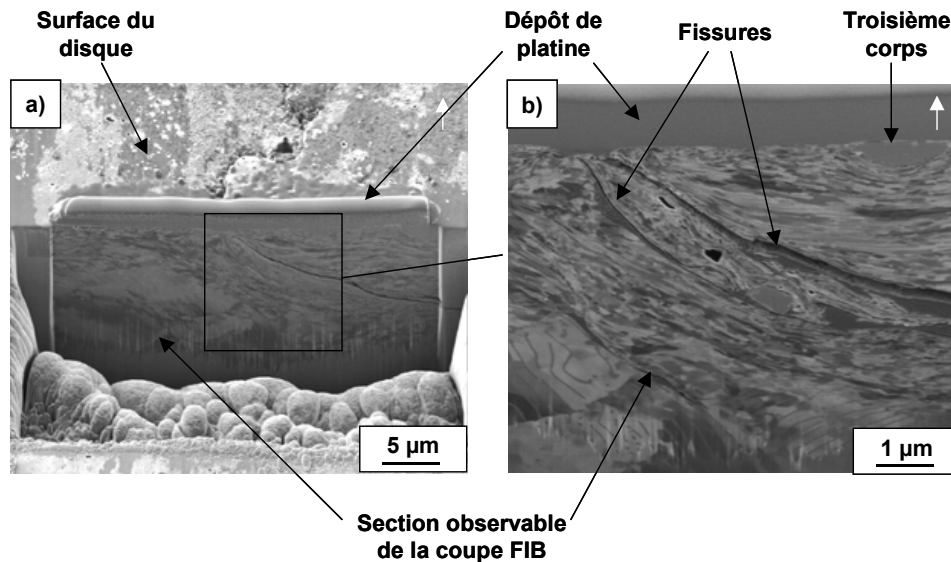


Figure IV-15 : Observations de la coupe FIB au microscope ionique effectuée sur une bosse de l'ondulation du disque dans la zone chaude (tilt à $43,8^\circ$)

Dans la zone chaude d'un creux sur la surface (Figure IV-13c), le troisième corps est présent sous deux formes : sous forme de poudre en surface ou accumulé dans des cavités et sous formes de plaques compactées présentes en surface allongées dans le sens du glissement et le long des lamelles de graphite. Des fissures s'amorcent à proximité des lamelles de graphite et leur propagation peut conduire à un phénomène d'écaillage en surface (Figure IV-16). Les cavités dans lesquelles la poudre s'accumule sont dues à l'écaillage de la fonte.

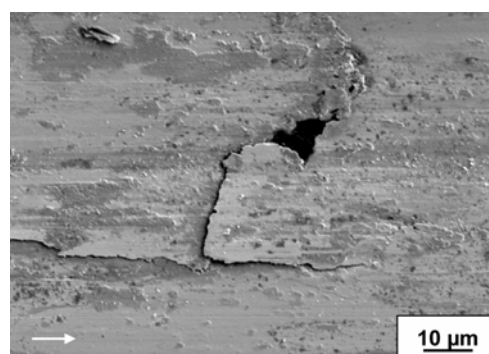


Figure IV-16 : Observations d'un creux de l'ondulation du disque dans la zone chaude : lamelles de graphite et écaillage de la fonte

Sur la surface du patin dans la zone chaude (Figure IV-13d), la surface non frottée du matériau composite est bien visible entre les particules minérales arasées et les plaques planes de troisième corps. Les plaques de troisième corps se sont ici étendues en s'appuyant sur une particule métallique et sur des particules minérales arasées. L'empreinte d'une particule déchaussée est également visible en surface. Une découpe FIB a été réalisée sur une plaque de troisième corps riche en éléments métalliques. Les observations de cette coupe (Figure IV-17) montrent que la

plaque s'est formée sur une particule de laiton. Au plus fort grossissement, on voit bien le caractère granulaire de cette plaque dont l'épaisseur maximale atteint $2\ \mu\text{m}$. Trois fragments de constituants minéraux de taille micrométrique sont également visible au sein de ce troisième corps. Il est également très intéressant d'observer que la plaque présente déjà plusieurs lignes de fragmentation, plutôt parallèles à la surface de frottement, laissant augurer de l'activation à venir de mécanismes de détachement. Il est d'ailleurs permis de se demander si la « marche » visible en surface sur la Figure IV-17b n'est pas déjà la manifestation d'un tel phénomène.

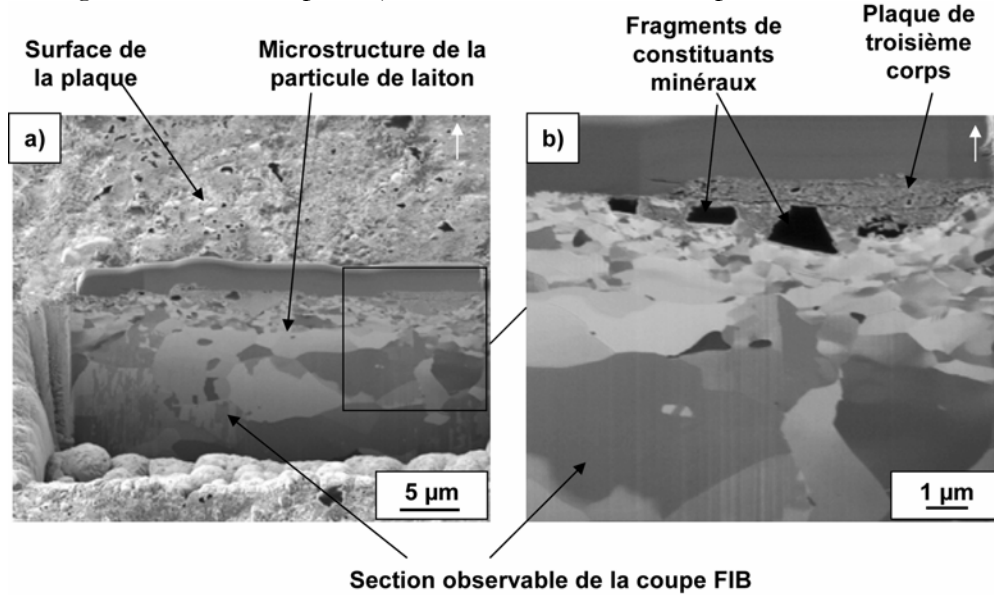


Figure IV-17 : Surface du patin dans la zone chaude : a et b) Observations d'une coupe FIB à différents grossissements (tilt à $43,8^\circ$)

IV.3.2. Zone froide extérieure aux points chauds

Dans la zone froide, les observations menées sur une bosse et dans un creux de l'ondulation du disque ne présentent pas de différences marquantes. Ces observations (Figure IV-18a) sont très semblables à celles obtenues pour le creux du disque dans la zone chaude (IV.3.1). L'observation en électrons rétrodiffusés de la surface du patin (Figure IV-18b) montre qu'elle est recouverte quasi-intégralement d'une fine couche de poudre de troisième corps, son épaisseur étant suffisamment fine pour laisser transparaître les constituants métalliques (en clair) qu'elle recouvre. La poudre remplit partiellement les zones en creux dans le fond desquelles la matrice laisse émerger des constituants minéraux et métalliques de tailles plus petites.

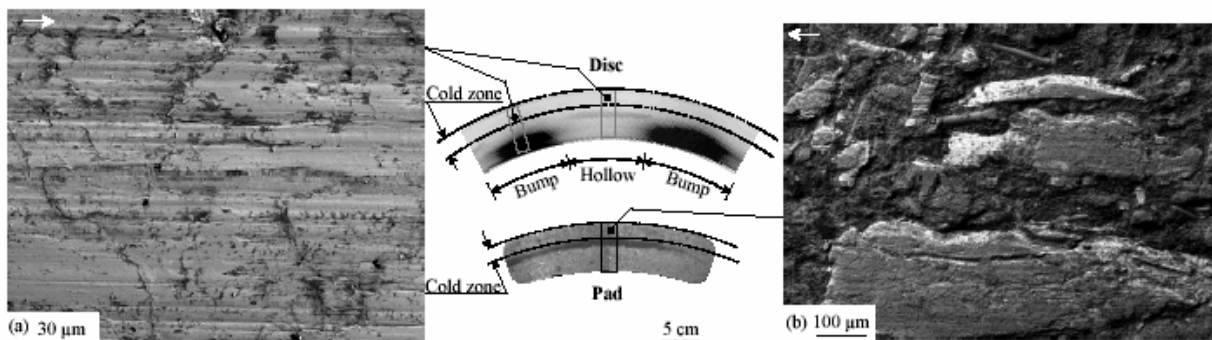


Figure IV-18 : Surface du disque a) et du patin b) dans la zone froide

IV.3.3. Zone de transition : migration des points chauds

La Figure IV-19 présente des observations MEB en électrons secondaires réalisées dans la zone de transition sur le disque (dans un creux a) et sur une bosse c) de l'ondulation du disque) et des observations MEB en électrons rétrodiffusés réalisées sur le patin (dans la partie intérieure dénudée d) et dans la partie extérieure couverte de poudre b).

Sur le disque, la zone de transition présente différents aspects suivant que l'on se place dans un creux ou sur une bosse. Au niveau des creux (Figure IV-19b), la surface du disque est couverte d'un lit de poudre disposé en bandes dans le sens du glissement. Sur les bosses (Figure IV-19a), la surface du disque apparaît plus lisse et non couverte de poudre. Selon les zones, sont visibles des plaques de troisième corps compacté, également alignées en bandes dans le sens du glissement ; sont visibles également nombre de lamelles de graphite émergeant en surface tandis que des traces de fissures parfois disposées en réseaux apparaissent en surface.

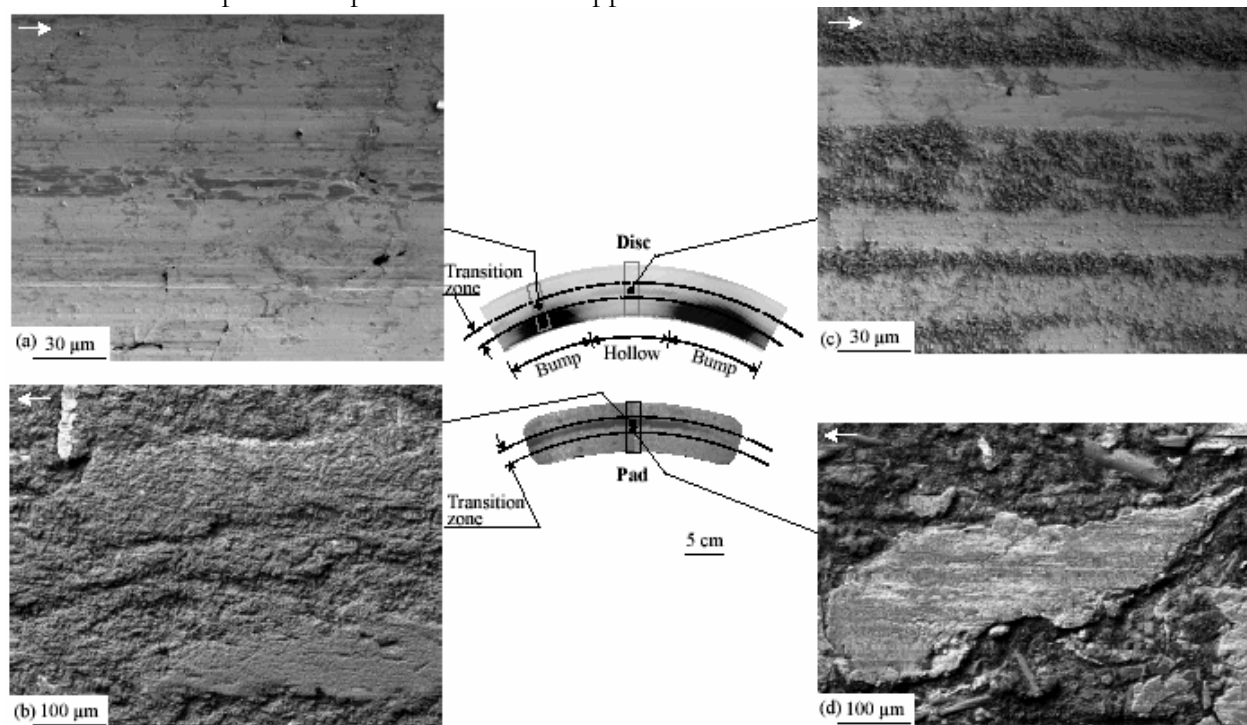


Figure IV-19 : Observation dans la zone de transition a) d'un creux et c) d'une bosse de l'ondulation du disque et du patin d) partie intérieure dénudée (côté zone chaude) et b) partie extérieure couverte de poudre (côté zone froide)

La Figure IV-20b montre une coupe FIB effectuée dans la partie centrale d'un lit de poudre au niveau d'un creux de l'ondulation du disque (Figure IV-20a). Au-dessus de la fonte dont on reconnaît la microstructure, on observe que l'épaisseur du lit de poudre peut atteindre 5 à 6 µm en prenant en compte le tilt à 43,8°. Sa structure granulaire est très peu compactée, comme en attestent le nombre, la répartition et la taille des porosités présentes dans la couche.

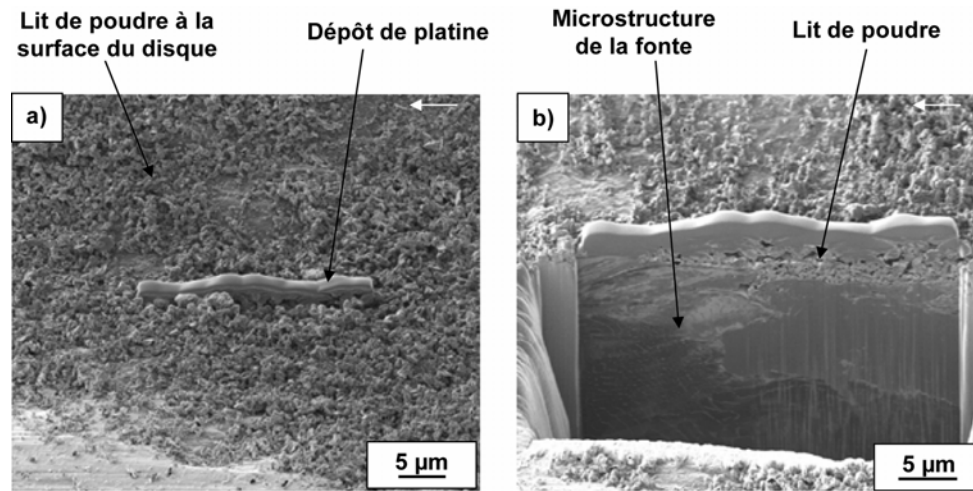


Figure IV-20 : Surface du creux du disque dans la zone de transition : a) lit de poudre et dépôt de platine avant coupe FIB et b) section de la coupe FIB (tilt à 43,8°)

Sur le patin, la zone de transition apparaît divisée en deux parties, selon que l'on considère la partie intérieure (Figure IV-19d côté zone chaude) ou la partie extérieure (Figure IV-19b côté zone froide). Dans la première, les plaques de troisième corps compacté, mais aussi les particules et fibres émergeant de la matrice du composite visibles dans les zones en creux, apparaissent plutôt dénudées, même si un léger voile de poudre semble présent. La deuxième partie est quand à elle recouverte quasi-intégralement d'un lit de poudre, suffisamment épais pour estomper les reliefs. Une coupe FIB a été réalisée dans un tel lit de poudre dans la zone extérieure. La Figure IV-21 montre que l'épaisseur de ce lit de poudre peut dépasser les 15 µm ; elle révèle clairement sa structure granulaire, plutôt faiblement compactée et on peut observer un gradient de tailles de particules, les plus grosses étant plus en profondeur et les plus fines en surface.

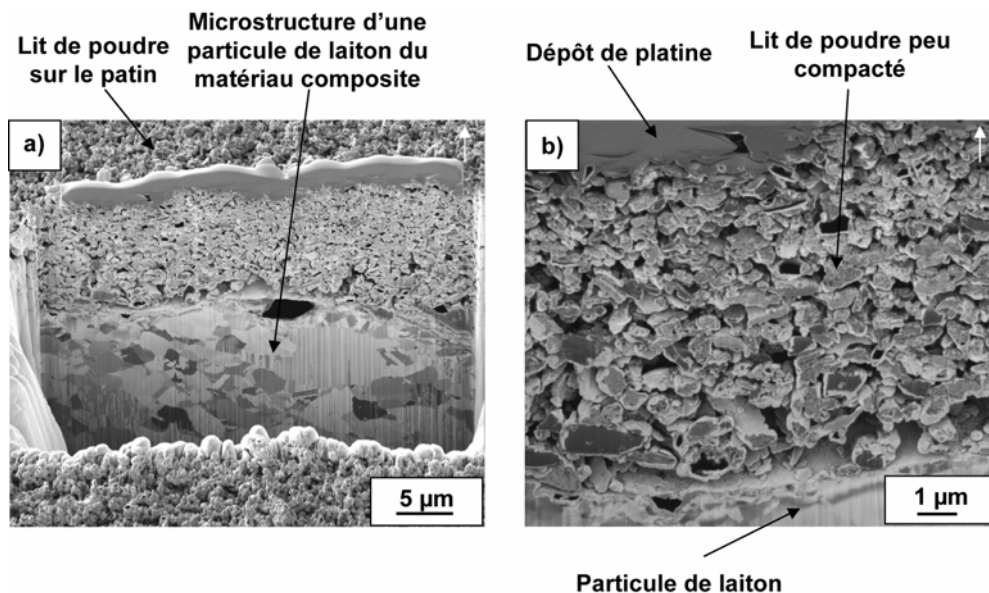


Figure IV-21: Observations d'une coupe FIB dans le lit de poudre accumulé sur la surface du patin dans la partie extérieure de la zone de transition (tilt à 43,8°)

Les lits de poudre observés dans les creux de l'ondulation du disque et à la surface du patin dans la zone extérieure de la zone de transition ont été soumis à des analyses X-EDS (Figure IV-22).

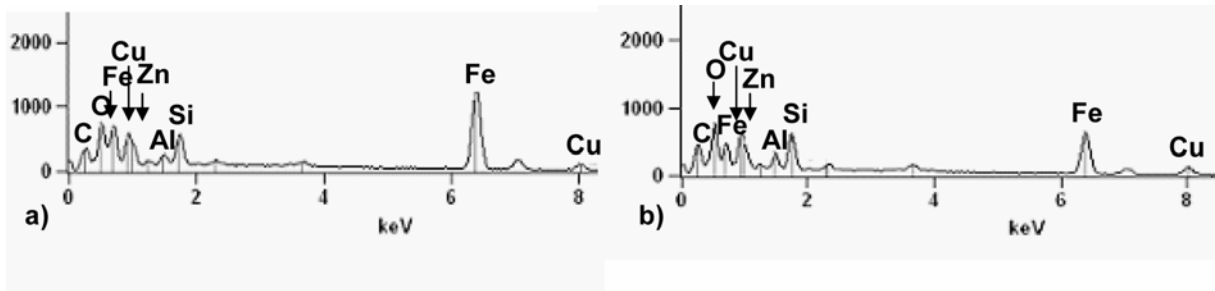


Figure IV-22 : Spectres des analyses X-EDS réalisées sur le lit de poudre
 a) dans un creux de l'ondulation du disque,
 b) dans la partie extérieure de la zone de transition sur le patin

Les résultats révèlent que ces deux lits de poudre ont la même composition, caractéristique du troisième corps, constituée d'éléments Fe, Cu et Zn provenant des constituants métalliques ainsi que des éléments Si et Al provenant des constituants minéraux.

IV.3.4. Débits de troisième corps

La Figure IV-23a met en évidence la bande de poudre circulaire discontinue observée en vidéo rapide sur la surface du disque à $t = 40$ s, pendant l'expansion et la migration des points chauds. La superposition des images obtenues en vidéo rapide et en thermographie infrarouge (Figure IV-23b) montre bien la correspondance de la bande sombre visible en infrarouge et de la présence du lit de poudre à la surface du disque.

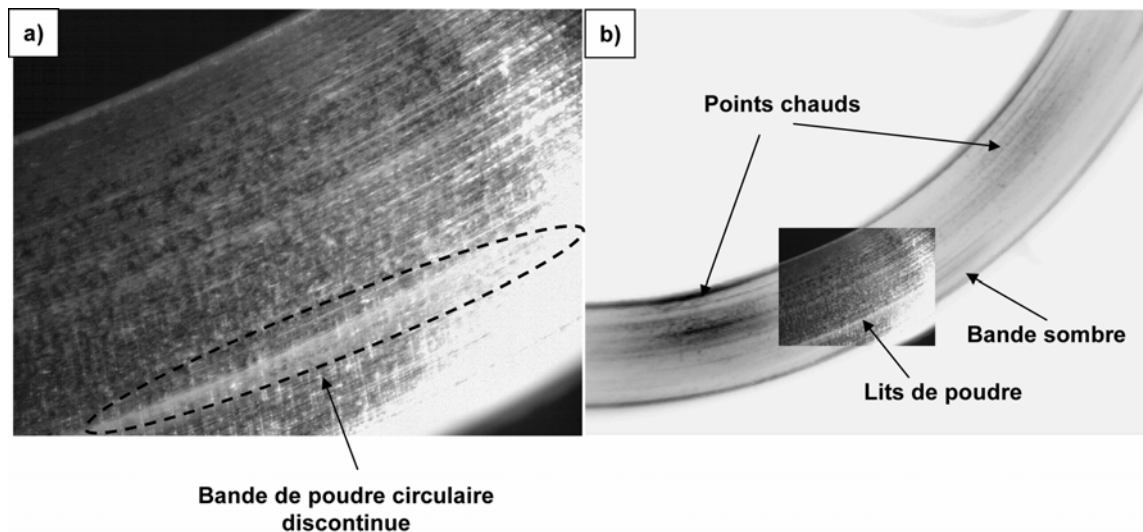


Figure IV-23 : a) Observation en vidéo rapide du lit de poudre formé dans un creux de l'ondulation du disque à $t = 40$ s,
 b) Superposition avec le thermogramme du disque au même instant

IV.4. Discussion et conclusions

L'étude des essais de freinage d'arrêt isolés présentée dans le chapitre III a montré qu'il existait une corrélation entre l'historique de la migration des phénomènes de localisation thermique de surface et les mécanismes physiques activés localement en surface dans le contact. Toutefois, les observations post-mortem aux freinages, révélatrices des surfaces après l'arrêt, ne permettaient pas l'étude de l'évolution de ces mécanismes pendant le freinage. Dans ce but, des essais de

freinages interrompus avant l'arrêt ont été réalisés afin de permettre l'étude de surfaces représentatives d'instantanés typiques du freinage d'arrêt isolé à haute énergie, c'est-à-dire lors de la formation et de la migration de la bande chaude d'une part, et lors de l'expansion et de la migration des points chauds d'autre part [Desplanques 2006a]. Les observations en microscopie électronique à balayage et les analyses EDS des surfaces, ont été complétées par des observations en microscopie ionique à balayage de sections droites des surfaces de frottement obtenues par le procédé FIB. D'autre part, les observations en vidéo rapide de la piste de frottement du disque pendant les essais de freinage ont permis de conforter les résultats obtenus à partir de l'étude des surfaces de frottement après interruptions du freinage.

Dans le cas de la bande chaude, premier phénomène de localisation thermique transitoire apparaissant au cours du freinage, sa migration du rayon extérieur au rayon intérieur de la piste de frottement est associée à la formation de lits de poudre sur le patin et sur le disque. Sur le patin, un lit de poudre allongé dans le sens de glissement se forme en aval de la bande chaude, dans la zone froide de la surface du patin, et migre radialement dans cette zone jusqu'au rayon intérieur de façon concomitante à la migration de la bande chaude. Sur le disque, de part et d'autre de la bande chaude, des poudres s'accumulent dans le sens du glissement. L'évolution de cette accumulation de poudre à la surface du disque a été clairement mise en évidence lors de l'observation de la piste en vidéo rapide. L'utilisation simultanée de la vidéo rapide et de la thermographie infrarouge a bien montré le lien entre le déplacement de la bande chaude et le développement des lits de poudre sur la surface du disque, en amont de la bande chaude dès le début du freinage, puis de part et d'autre de la bande chaude. Le développement de ces lits de poudre en surface dont l'observation a montré qu'ils étaient non compactés, montre que le contact reste ouvert en dehors de la bande chaude, donc qu'il se localise dans cette bande. Ainsi, les lits de poudre proviennent d'un débit source de troisième corps provenant de la bande chaude. Par ailleurs, la bande chaude, qui balaye radialement la piste de frottement, s'alimente des particules recirculées, provenant du lit de poudre observé sur le patin et du lit de poudre qui couvre l'aval de la piste du disque. Ce balayage explique également la migration radiale simultanée des lits de poudre et de la bande chaude en surface.

Ce scénario est cohérent avec les résultats obtenus par Olivier Roussette lors de l'étude d'un freinage d'arrêt sous sollicitations très sévères de freinage. Les conditions expérimentales qui avaient été adoptées dans son étude, à savoir un nombre de freinages de rodages plus important, avaient conduit à étudier un freinage d'arrêt à haute énergie avec une quantité de troisième corps recirculé beaucoup plus importante que dans la présente étude. Olivier Roussette [Roussette 2005] a ainsi montré qu'une bande de troisième corps se formait dans la bande chaude où se localise le contact (Figure IV-24a). Cette bande, d'un millimètre de large et de plusieurs micromètres d'épaisseur, avait une structure granulaire caractéristique du compactage de poudre (Figure IV-24b). Toutefois, n'ayant pu observer que la surface du patin, Olivier Roussette n'avait pu clairement mettre en évidence le rôle joué par la recirculation des poudres par le disque.

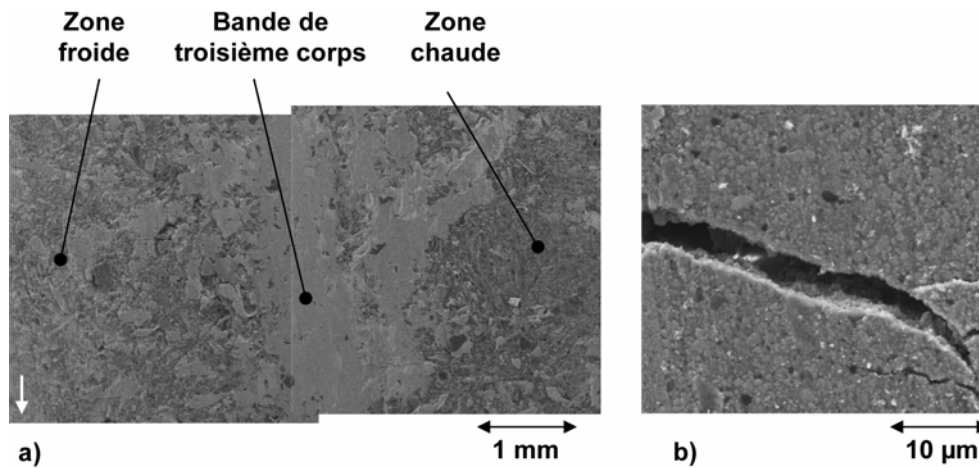


Figure IV-24 : a) Bande de troisième corps formée dans la bande chaude
 b) Structure granulaire de la bande de troisième corps [Roussette 2005]

Dans le cas des points chauds, les phénomènes mis en jeu sont plus complexes compte tenu de la distorsion ondulatoire du disque qui entraîne une succession de creux et de bosses de la piste de frottement dans le sens de glissement, donc une certaine "intermittence" du contact. Les points chauds, fixés sur les bosses de l'ondulation du disque, sont révélateurs de la localisation du contact sur ces bosses qui frottent sur toute la partie intérieure de l'aire apparente de contact. Leur expansion et leur migration conduit à la formation d'un front chaud qui migre radialement vers l'extérieur de la piste, augmentant ainsi au fur et à mesure du freinage l'aire de contact frottée. Les observations en thermographie ont montré que la migration de ce front chaud était accompagnée de la migration d'une bande sombre circulaire discontinue, qui se forme dans les creux de l'ondulation du disque en aval du front chaud. Les observations du disque post-mortem aux essais interrompus ainsi que les observations en vidéo rapide ont permis d'associer cette bande discontinue observée en thermographie avec la formation et la migration d'un lit de poudre dans les creux de l'ondulation du disque. De manière concordante pour le patin, dans une zone ayant la même position radiale que le lit de poudre observé sur le disque (appelée zone de transition), un lit de poudre s'accumule en surface, migrant également à la surface du patin en aval du front chaud. Les observations locales et les analyses EDS ont bien montré la concordance entre le lit formé sur le patin et celui formé dans les creux de l'ondulation du disque. Il y a ainsi, au fur et à mesure du balayage radial de la surface de frottement par le front chaud, un transfert des particules accumulées sur le patin vers les creux de l'ondulation du disque. Ce mécanisme complexe favorise ainsi l'alimentation en troisième corps des zones où se localise la portance, c'est-à-dire entre les bosses de l'ondulation du disque et la surface du patin.

La Figure IV-25 présente une vue schématique de ce circuit tribologique complexe et des mécanismes de frottement associés. La Figure IV-25a montre un thermogramme du disque correspondant à l'expansion et la migration des points chauds. Le front chaud délimitant les zones chaudes et froides est repéré. Sur cette figure, la délimitation de l'aire apparente de contact du patin est représentée en superposition. Elle correspond à une position particulière du patin et montre que sa surface peut couvrir simultanément un creux et une bosse de l'ondulation du disque. Les quatre Figure IV-25b-e montrent des sections radiale et circonférentielles du contact, la position de ces sections étant définie sur la Figure IV-25a.

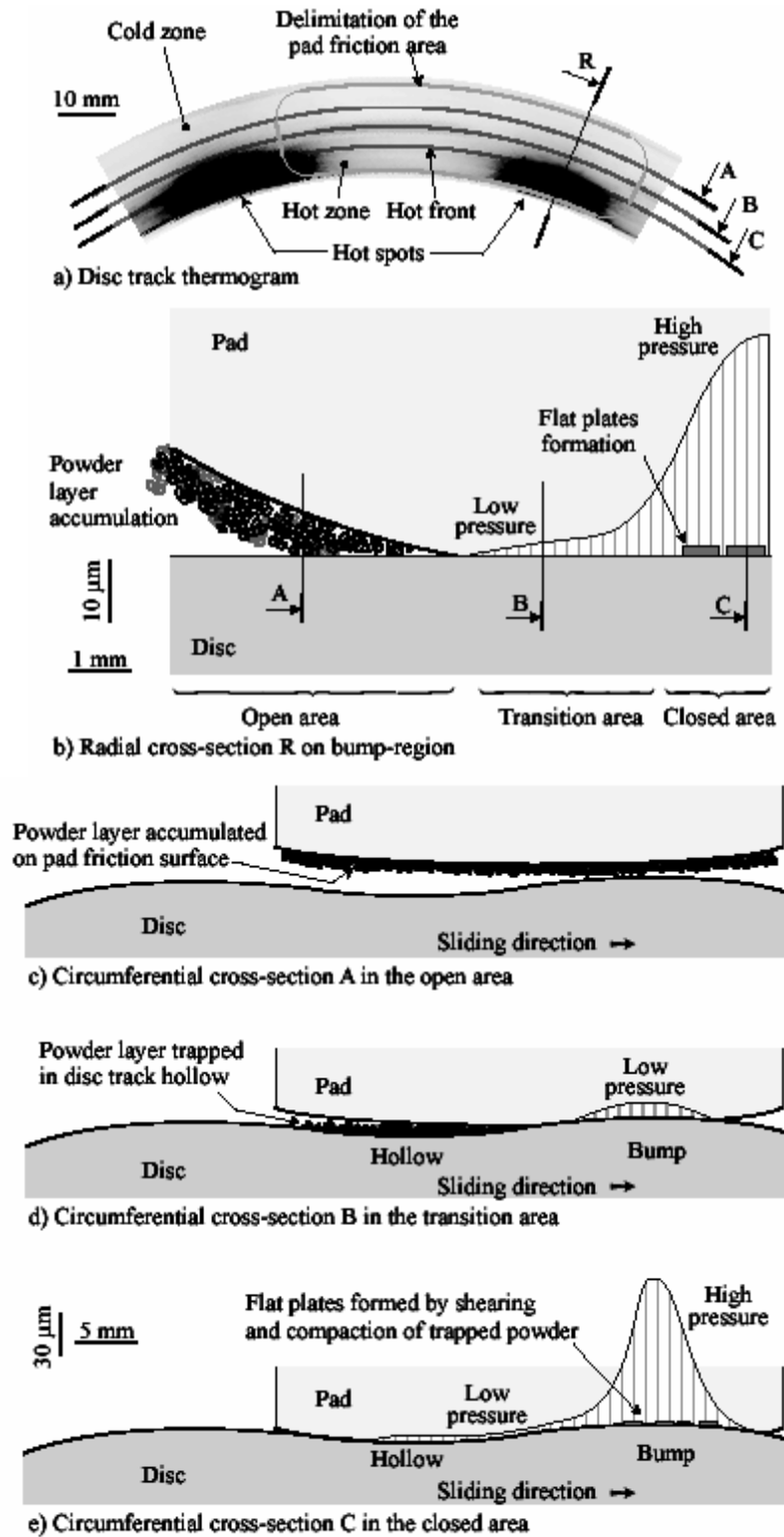


Figure IV-25 : Vue schématique des mécanismes de frottement : a) Thermogramme de la piste du disque avec délimitation de l'aire du patin, b) Section radiale R d'une bosse de l'ondulation du disque, c) Section circonférentielle A dans la zone ouverte du contact, d) Section circonférentielle B dans la zone de transition du contact, e) Section circonférentielle C dans le front chaud

La Figure IV-25b présente une section partielle radiale (section R) du contact sur un point chaud, i.e. sur une bosse de l'ondulation du disque. La présence d'un gradient thermique dans l'épaisseur du patin conduit à une déformée du patin en forme de "banane", ouvrant le contact vers l'extérieur en aval du front chaud, la dilatation du patin étant plus forte près de la surface de frottement qu'en profondeur. Ainsi, le contact se localise à l'intérieur de la piste de frottement, sur les bosses de l'ondulation où se dissipe la majeure partie de l'énergie. Les pressions de contact y sont donc élevées et la sollicitation y est très sévère. Comme l'a montré l'étude de la dégradation du contact en température et en frottement continu, une telle sollicitation conduit à un débit source de troisième corps important. Les particules produites sont éjectées vers l'aval, dans cette zone ouverte (zone froide), et une partie d'entre elles s'accumulent à la surface du patin et forment le lit de poudre qui a été observé. La section circonférentielle du contact dans la zone froide (Figure IV-25c) montre ainsi le contact ouvert et le lit de poudre accumulé en surface du patin, allongé dans la direction circonférentielle. La Figure IV-25d est une section circonférentielle du contact dans la zone de transition. Le contact, qui s'y ferme progressivement de la zone froide vers le front chaud, reste ouvert dans les creux de l'ondulation du disque tandis qu'il est fermé sur les bosses. Dans cette zone, les pressions de contact sont trop faibles pour conduire à la formation de plaques planes de troisième corps. Ainsi, les surfaces de frottement y apparaissent dénudées et les particules du lit de poudre présent sur le patin y sont progressivement balayées au fur et à mesure de la migration radiale du front chaud. Ce balayage entraîne une partie des particules dans les creux de l'ondulation du disque où le contact reste ouvert, donc où l'accumulation est possible. Il y a ainsi transfert du lit de poudre formé sur le patin vers le lit de poudre formé sur le disque. La Figure IV-25e est une section circonférentielle du contact dans le front chaud. Les pressions de contact sont plus élevées et la déformation du patin permet de fermer le contact dans les creux de l'ondulation du disque, cette fermeture s'effectuant radialement de manière progressive en s'approchant du front chaud. Ainsi, lors de la migration de ce front, les particules accumulées dans les creux de l'ondulation sont à leur tour balayées par le frottement et entraînées vers les bosses de l'ondulation, où elles contribuent à la formation des plaques planes de troisième corps sous l'action des pressions de contact élevées qui y règnent.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail de thèse s'inscrit dans une problématique industrielle rencontrée par les exploitants de réseaux suburbains. L'augmentation du trafic passager associée à la diminution de la durée interstation, autorisée par l'augmentation de la vitesse d'exploitation, conduisent à des puissances et des énergies à dissiper de plus en plus importantes des organes de friction. Ces sollicitations de plus en plus sévères des organes de friction conduisent à des températures de fonctionnement de plus en plus hautes qui entraînent en particulier une dégradation des matériaux composites organiques des garnitures de frein. Cela se traduit par des baisses de performance pouvant remettre en cause la sécurité (chute du coefficient de frottement, augmentation des distances d'arrêt...) et pénaliser l'équilibre économique (augmentation de l'usure...).

L'étude s'est ainsi intéressée à la caractérisation expérimentale du contact frottant disque garniture sous sollicitations sévères de freinage. Le couple de matériaux étudié consiste en une fonte à graphite lamellaire pour les disques et un matériau composite à matrice organique pour les patins. Il s'agit de matériaux utilisés sur les rames de train de banlieue Z-TER. On entend par sollicitations sévères de freinage des niveaux de températures moyennes de surface de l'ordre de 300°C, niveaux qui peuvent être atteints soit lors d'un freinage d'arrêt d'urgence, soit par une succession de freinages d'arrêt rapprochés. Si ces deux types de sollicitation peuvent être équivalents en termes de températures moyennes de surfaces, ils conduisent à des phénomènes de localisation thermique transitoires qui diffèrent par leur nature (bandes chaudes, points chauds) et leur intensité, entraînant des mécanismes de frottement et d'usure différents. Notre travail a mis en évidence les interactions tribologie thermique et physicochimie en visant à répondre aux trois objectifs suivants :

- caractériser à l'échelle macro les phénomènes de localisation thermique et identifier leur influence sur le coefficient de frottement,
- corrélérer à l'échelle locale ces phénomènes aux mécanismes physiques de frottement,
- identifier les conséquences de la dégradation du matériau composite organique avec la température sur le coefficient de frottement et les mécanismes physiques de frottement.

Le premier objectif implique la capacité de reproduire les sollicitations sévères rencontrées en service sur un dispositif expérimental de laboratoire. Le tribomètre de freinage du LML offrait un bon point de départ qu'il a fallu adapter dans le cadre de la présente étude. Une simulation numérique par éléments finis en thermique transitoire a ainsi permis de définir un nouveau montage, mettre en place l'isolant thermique ad hoc et dimensionner la géométrie des éprouvettes. Ainsi adapté, il a permis de reproduire effectivement les élévations de températures moyennes de surface escomptées dans le cas d'un freinage d'arrêt à haute énergie isolé et dans le cas d'une succession de 20 freinages d'arrêt à basse énergie avec cumul de chaleur.

Le recours à l'observation à l'échelle macro de la surface de frottement du disque par thermographie infra rouge a permis d'étudier les phénomènes de localisation thermique pendant les freinages. Le freinage d'arrêt à haute énergie est ainsi caractérisé par la migration radiale d'une bande chaude intense de l'extérieur vers l'intérieur de la piste de frottement puis par la formation de points chauds induits par la distorsion ondulatoire du disque. La puissance dissipée décroissant avec le temps, la fin du freinage est marquée par l'expansion progressive et l'atténuation des points chauds à mesure que la distorsion ondulatoire s'atténue avec l'homogénéisation de température dans le disque. En revanche, dans le cas de la succession de freinages d'arrêt à basse énergie avec cumul de chaleur, si chaque freinage se caractérise par la migration radiale du rayon extérieur vers le rayon intérieur d'une bande chaude peu intense, celle-ci est plus fine pour les premiers freinages de la succession alors qu'elle s'élargit et s'étend plus rapidement sur la totalité

de la surface de la piste de frottement pour les derniers freinages. Pour les deux types de sollicitations sévères, les phénomènes de localisation thermique ne sont pas similaires et conduisent à des évolutions différentes du coefficient de frottement instantané. Dans le freinage d'arrêt à haute énergie, le coefficient de frottement présente des fluctuations notables durant la phase de migration de la bande chaude, des fluctuations encore plus perturbées dans la phase de formation des points chauds tandis qu'il se stabilise dans la phase d'expansion des points chauds, la valeur moyenne du coefficient de frottement restant assez constante tout au long de l'essai. En revanche, dans le cas de la succession de freinages d'arrêt à basse énergie avec cumul de chaleur, la migration de la bande chaude perturbe peu le coefficient de frottement instantané. Toutefois, d'un freinage à l'autre de la succession, le comportement est très différent. Pour les premiers freinages, après une assez longue phase de stabilité, une remontée significative du coefficient de frottement est observée en fin de freinage. Pour les derniers, c'est une diminution qui est observée, consécutive à un passage par un maximum qui se produit de plus en plus tardivement. Ce phénomène n'est pas un effet d'histoire dû à la succession de freinage elle-même comme l'on montre les résultats obtenus pour une succession de freinage sans cumul de chaleur, mais qu'il est bien lié à l'élévation progressive de la température au cours de la succession de freinages avec cumul.

Pour atteindre le second objectif, la corrélation à l'échelle locale de ces phénomènes avec les mécanismes physiques de frottement a été établie à l'aide d'observations en cours d'essais de la surface du disque en vidéo rapide et d'observations et d'analyses des surfaces de frottement du patin et du disque après les essais. De façon générale, le troisième corps observé en surface est présent sous plusieurs formes. Sur les patins, on observe des plaques planes qui assurent la portance et des lits de poudre sous forme plus ou moins compactée. Sur les disques, les mêmes éléments sont observés, les lamelles de graphite jouant un rôle particulier sur le piégeage du troisième corps. Les phénomènes de localisation thermique conditionnent les mécanismes physiques locaux. La localisation thermique correspond à une zone fermée du contact dans laquelle le frottement intense génère un débit de particules alimentant les lits de poudre, la migration entraînant leur déplacement dans les zones ouvertes du contact. La formation des plaques planes, par compactage des lits de poudre piégés, est provoquée par la fermeture progressive de zones ouvertes. Ces phénomènes ont été plus particulièrement étudiés dans le cas du freinage d'arrêt à haute énergie, qui a l'avantage de présenter successivement des phénomènes de bandes chaudes et de points chauds. Une série de 5 essais interrompus à différents instants caractéristiques des phénomènes thermiques a été menée dans cet objectif. La bande chaude, qui migre radialement, correspond à une zone de contact fermée, qui se ferme vers l'avant et qui s'ouvre vers l'arrière. La migration du front chaud s'accompagne d'un lit de poudre dans les zones ouvertes, qui constitue le débit de recirculation du troisième corps observé sur le disque. Sur le patin, la fermeture progressive du contact piège le troisième corps recirculé en avant de la bande chaude, densifie le lit de poudre ainsi accumulé, ce qui conduira à la formation de plaques portantes. Les points chauds, circonférentiellement répartis, correspondent à une alternance de bosses et de creux sur le disque. Lors de leur passage cyclique sous le patin, le contact se ferme sur les bosses, où les plaques planes se forment par compactage des poudres, et reste ouvert au niveau des creux, espaces privilégiés pour le piégeage du troisième corps. Une représentation schématique a été proposée pour ce circuit tribologique.

Dans les zones de localisation, les niveaux de température très élevés entraînent une dégradation physicochimique du matériau composite à matrice organique dont l'influence est difficile à appréhender en situation de freinage. Pour ce troisième objectif, une série d'essais complémentaires de frottement continu à température contrôlée a été effectuée sur un tribomètre équipé d'une platine porte-disque chauffante et couplé à un spectromètre de masse pour analyser les dégagements gazeux produits au contact. Une étude préliminaire de la dégradation

physicochimique du matériau composite avec la température à été menée sur un thermogravimètre couplé à un spectromètre de masse. Cette étude a montré que la dégradation du matériau composite, et en particulier de la résine phénolique, s'accompagne de dégagements gazeux, dont de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone. Ces dégagements gazeux ont pu être utilisés comme indicateurs de la dégradation du matériau composite lors des essais de frottement continu. Si la dégradation s'accompagne d'une chute du coefficient de frottement, le matériau, une fois dégradé, offre à nouveau une bonne stabilité du coefficient de frottement avec la température. En contrepartie, le matériau dégradé présente un débit source de troisième corps plus important en cohérence avec un régime d'usure beaucoup plus sévère. A l'échelle microscopique, les fibres longues et les plus grosses particules émergent de la résine phénolique qui est dégradée sur une profondeur plus importante, laissant ainsi des dépressions plus profondes dans lesquelles de plus grandes quantités de poudre peuvent être piégées conduisant à des plaques planes portantes plus étendues. C'est ce mécanisme qui explique le bon comportement tribologique de ce matériau après dégradation physicochimique de sa matrice.

D'un point de vue industriel, ce travail a répondu au besoin d'une meilleure compréhension des phénomènes physiques de frottement et a permis de mieux appréhender la durabilité des matériaux de frottement sous sollicitations sévères, étape nécessaire à l'amélioration des performances des systèmes de freinage. Plus particulièrement, ce travail a montré, dans le cas d'un freinage d'arrêt à haute énergie représentatif d'un freinage d'arrêt d'urgence, que la sévérité d'une sollicitation de freinage ne peut être reproduite à l'échelle réduite en se basant uniquement sur les paramètres pression et vitesse. La complexité des phénomènes thermomécaniques mis en jeu nécessite un paramétrage des essais tenant compte des densités de flux et d'énergie dissipées et de la durée de freinage. Ceci devra être pris en considération dans l'avenir lors des campagnes d'homologation de nouveaux matériaux. De plus, l'étude réalisée a montré l'importance de l'effet d'histoire lors de successions de freinages rapprochés telles qu'on les rencontre en service sur les parcours de type urbain et suburbain. Là aussi, cet effet d'histoire doit absolument être pris en compte dans les stratégies de dimensionnement.

Parmi les perspectives envisagées pour la suite de ce travail, la première est de mener une caractérisation du circuit tribologique dans le cas de la succession de freinages avec cumul de chaleur, en appliquant le même protocole d'essais interrompus avant l'arrêt, et en ciblant quelques freinages choisis dans la succession pour mettre en évidence les phénomènes physiques. Les phénomènes de localisation thermique étant différents, et la montée en température étant beaucoup plus homogène, d'autres mécanismes tribologiques seront activés, même si le niveau de température maxi est similaire que celui atteint dans le cas d'un freinage d'arrêt à haute énergie isolé. De plus, cette sollicitation thermique élevée plus longue devrait induire une dégradation du matériau composite davantage en profondeur.

D'autre part, il serait intéressant de caractériser en profilométrie les surfaces frottées après le freinage à haute énergie et la succession de freinage avec cumul de chaleur, comme cela a été effectué ici dans le cas des essais de frottement continu. Cela permettrait de comparer les profondeurs des dépressions sous l'aire frottée et de caractériser les régimes d'usure respectifs.

En ce qui concerne la caractérisation des mécanismes physiques de frottement par des coupes droites grâce à la technique FIB, les premiers résultats obtenus en collaboration avec le BAM sont très prometteurs. La localisation des sites étudiés peut être choisie avec précision en prenant en compte la localisation des mécanismes activés dans le contact. De plus, cette technique permet aussi le prélèvement de lames minces pour analyser, par microscopie électronique par transmission, les couches les plus fines en surface des plaques planes de troisième corps où s'accommodent pour l'essentiel la vitesse de glissement.

Cette étude a bien montré l'influence de la dégradation du matériau composite sur le comportement disque-patin et le rôle majeur de certains éléments tels que fibres et particules dans la formation des plaques planes. Toutefois, la diversité des éléments en présence complexifie l'interprétation des résultats. L'utilisation de matériaux composites « modèles », dont la formulation plus simple que celle des matériaux industriels serait choisie, permettrait une meilleure compréhension de l'influence du matériau et de ses constituants sur les phénomènes physiques induits en freinage.

Enfin, le rôle important de l'oxydation a également été mis en évidence dans cette étude, par sa contribution à la dégradation de la matrice organique du matériau composite d'une part, à la formation des oxydes présents dans le troisième corps d'autre part. Cette influence de l'oxydation pourrait être investiguée grâce à la réalisation d'essais de freinage sous atmosphère contrôlée. A titre exploratoire, le développement sur le tribomètre de freinage d'un dispositif expérimental visant à priver le contact de l'oxygène de l'air ambiant a été entrepris dans cet esprit.

REFERENCES

- Anderson 1990** Anderson A.E., Knapp R.A., *Hot spotting in automotive friction systems*, Wear 135 (1990) 319-337.
- Berthier 1988** Berthier Y., *Mécanismes et tribologie*, Thèse INSA de Lyon-Université Claude Bernard (1988).
- Berthier 1996** Berthier Y., *Maurice Godet's third body approach*, Tribology Series 32 (1996) 21-30.
- Berthier 2001** Berthier Y., *Background on friction and wear*, Lemaître Handbook of Materials Behavior Models, Academic Press Section 8.2. (2001) 676-699.
- Bettge 2003** Bettge D., Starcevic J., *Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes*, Wear 254 (2003) 195-202.
- Bijwe 2005** Bijwe J., Nidhi, Majumdar N., Satapathy B.K., *Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials*, Wear 259 (2005) 1068-1078.
- Bodovillé 2001** Bodovillé G., *Modélisation thermomécanique de disques de frein TGV et simulation à l'échelle réduite*, Thèse Université des Sciences et Technologie de Lille (2001).
- Bulthé 2005** Bulthé A.-L., François M, Desplanques Y., Degallaix G., *Comportement d'un couple disque-patin sous sollicitations de freinage et observations in situ du 3ème corps*, 17ème Congrès Français de Mécanique Troyes (2005).
- Bulthé 2005b** Bulthé A.-L., Desplanques Y., Degallaix G., Sabatier L., Delaye L., *Corrélation entre comportement tribologique et thermique sous deux types de sollicitations sévères pour le couple fonte à graphite lamellaire/composite à matrice organique*, Journées Internationales Francophones de Tribologie, «Tribologie dans les transports», Tarbes à paraître (2005).
- Bulthé 2006a** Bulthé A.-L., Desplanques Y., Degallaix G., Berthier Y., *Mechanical and chemical investigation of the temperature influence on the tribological mechanisms occurring in OMC/ Cast iron friction contact*, 12th Nordic Symposium of Tribology, NordTrib 2006 Helsingor (Danemark) (2006).
- Bulthé 2006c** Bulthé A.-L., Desplanques Y., Degallaix G., Berthier Y., *Mécanismes tribologiques et physico-chimiques activés avec la température dans un contact frottant CMO/Fonte GL*, Journées Francophones de Tribologie, «Tribologie et couplages multiphysiques», Lille à paraître (2006).

- Cedip** , *CEDIP JADE IRFPA Cameras Documentation.*
- Cho 2005** Cho M.H., Kim S.J., Kim D., Jang H., *Effect of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study*, *Wear* 258 (2005) 1682-1687.
- Cho 2006** Cho M.H., Ju J., Kim S.J., Jang H., *Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb₂O₃, MoS₂) for automotive brake friction materials*, *Wear* 260 (2006) 855-860.
- Copin 2000** Copin R., *Etude du comportement tribologique de couples de matériaux industriels sur tribomètre reproduisant les conditions de freinage ferroviaire*, Thèse Université des Sciences et Technologie de Lille (2000).
- Costa 1997** Costa L., Rossi di Montelera, Camino G., Weil E.D., Pearce E.M., *Structure-charring relationship in phenol-formaldehyde type resins*, *Polymer Degradation and Stability* 56 (1997) 23-35.
- Day 1990** Day A.J., *Brake interface temperature prediction*, Disc and Drum Brake Performance-Temperatures and Thermal Effects in Braking Second Brakes Workshop, University of Bradford (1990).
- Descartes 2002** Descartes S., Berthier Y., *Rheology and flows of solid third body: background and application to an MoS_{1.6} coating*, *Wear* 252 (2002) 546-556.
- Desplanques 2001** Desplanques Y., Degallaix G., Copin R., Berthier Y., *A tribometer for the study of materials under railway braking conditions*, G. Dalmaz et al. (Eds.), *Tribology Research: From Model Experiment to Industrial Problem*, Elsevier, Amsterdam (2001) 381-391.
- Desplanques 2003a** Desplanques Y., Roussette O., Degallaix G., Dauphin J.-Y., Avoine J., *Caractérisation du troisième corps en freinage haute énergie*, J. Int. Frnacophones de Tribologie JIFT 2003 à paraître aux Presses Polytechniques de Lausanne (2003).
- Desplanques 2004** Desplanques Y., *De la fatigue cryogénique à la tribologie appliquée au freinage : contribution à la caractérisation du comportement de matériaux*, Habilitation à Diriger des Recherches Université des Sciences et Technologie de Lille (2004).
- Desplanques 2004b** Desplanques Y., Roussette O., Degallaix G., Dauphin J.-Y., Avoine J., *Démarche expérimentale pour l'étude des matériaux de friction en freinage*, Int. Coll. on Technological Innovation for Land Transportation TILT, GRRT Eds. 2 (2003) 501-508.
- Desplanques 2006a** Desplanques Y., Roussette O., Degallaix G., Copin R., Berthier Y., *Analysis of tribological behaviour of pad-disc contact in railway braking. Part 1: Laboratory test development, compromises between actual and simulated tribological triplets*, *Wear* (2006) In press.

- Desplanques 2006b** Desplanques Y., Bulthé A.-L., Degallaix G., Sabatier L., Bertheau J., *Transient aspects of local physical mechanisms induced by friction in braking*, Journées Européennes de Freinage - JEF 2006 (2006).
- Dufrénoy 1995a** Dufrénoy P., *Etude du comportement thermomécanique des disques de frein vis à vis des risques de défaillance*, Thèse Université des Sciences et Technologie de Lille (1995).
- Dufrénoy 1995b** Dufrénoy P., Weichert D., *Prediction of railway disc brake temperatures taking the bearing surface variations into account*, J. of Mechanical Engineering Science. Proc. Instn Mech. Engrs, Part F 209 (1995) 67-76.
- Dufrénoy 2004** Dufrénoy P., *Two/three dimensional hybrid model of the thermomechanical behaviour of a disc braking system.*, J. of Mechanical Engineering Science. Proc. Instn Mech. Engrs, Part F 218 (2004) 17-30.
- EMS 1991** *Elsevier Materials Selector*, Edited by Norman A. Waterman and Michael F. Ashby ISBN 1851666079 (1991).
- Eriksson 1999** Eriksson M., Bergman F., Jacobson S., *Surface characterization of brake pads after running under silent and squealing conditions*, Wear 232 (1999) 163-367.
- Eriksson 2000** Eriksson M., Jacobson S., *Tribological surfaces of organic brake pads*, Tribology International 33 (2000) 817-827.
- Eriksson 2002** Eriksson M., Bergman F., Jacobson S., *On the nature of tribological contact in automotive brakes*, Wear 252 (2002) 26-36.
- Filip 2002** Filip P, Weiss Z., Rafaja D., *On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications*, Wear 252 (2002) 189-198.
- François 2005** François M., Desplanques Y., Degallaix G., *Correlation between the dynamics of third body and the severity of rubbing during braking tests*, 32th Leeds-Lyon on Tribology, Lyon (France) (2005).
- François 2006** François M., Bulthé A.-L., Desplanques Y., Degallaix G., *Experimental device for observation of rubbing surface during braking tests*, TriboTest (2006) In press.
- Gaussorgues 1999** Gaussorgues G., *La thermographie infrarouge : Principes, technologies et applications*, Ed. Tec&Doc (1999).
- Ghaderi 2003** Ghaderi A.R., Nili Ahmadabadi M., Ghasemi H.M., *Effect of graphite morphologies on tribological behaviour of austempered cast iron*, Wear 255 (2003) 410-416.
- Godet 1984** Godet M., *The third body approach, a mechanical view of wear*, Wear 100 (1984) 437-452.

- Gouider 2004a** Gouider M., *Tribologie des composites carbone/carbone. Echelles et contributions relatives de la mécanique et de la physico-chimie*, Thèse INSA de Lyon - Université Claude Bernard (2004).
- Gouider 2004b** Gouider M., Berthier Y., Jacquemard P., Rousseau B., Bonnamy S., Estrade-Szwarckopf H., *Mass spectrometry during C/C composite friction: carbon oxidation associated with high friction coefficient and high wear rate*, *Wear* 256 (2004) 1082-1087.
- Ho 2005** Ho S.C., Chern Lin J.H., Ju C.P., *Effect of fiber addition on mechanical and tribological properties of a copper/phenolic-based friction material*, *Wear* 258 (2005) 861-869.
- Ingo 2004** Ingo G.M., D'Uffizi M., Falso G., Bultrini G., Padeletti, *Thermal and microchemical investigation of automotive brake pad wear residues*, *Thermochimica Acta* 418 (2004) 61-68.
- Jang 2004** Jang H., Ko K., Kim S.J., Basch R.H., Fash J.W., *The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials*, *Wear* 256 (2004) 406-414.
- Kato 2003** Kato H., *Severe-mild wear transition by supply of oxide particles on sliding surface*, *Wear* 255 (2003) 426-429.
- Kim 2000** Kim S.J., Jang H., *Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp*, *Tribology International* 33 (2000) 477-484.
- Kim 2006** Kim S.J., Cho M.H., Cho K.H., Jang H., *Complementary effects of solid lubricants in automotive brake lining*, *Tribology International* (2006) In press.
- Kristkova 2004** Kristkova M., Filip P., Weiss Z., Peter R., *Influence of metals on the phenol-formaldehyde resin degradation in friction composites*, *Polymer Degradation and Stability* 84 (2004) 49-60.
- Lathabai 1998** Lathabai S., *An SEM study of mild-to-severe wear transition in grey cast iron during dry sliding*, *Scripta Materiala* 38 (1998) 1557-1562.
- MFM 1983** *Manuel des fontes moulées*, Edited by Charles F. Walton et Timothy J. Opar Editions techniques des industries de la fonderie (1983).
- Newcomb 1959a** Newcomb T.P., *Flow of heat in a composite solid*, *British Journal of Applied Physics* 10 (1959) 204-206.
- Newcomb 1959b** Newcomb T.P., *Transient temperatures attained in disk brakes*, *British Journal of Applied Physics* 10 (1959) 339-340.
- Newcomb 1960** Newcomb T.P., *Temperatures reached in friction clutch transmissions*, *Journal of Mechanical Engineering Science* 2 (1960) 273-287.

- Osterle 2001** Osterle W., Griepentrog M., Gross Th., Urban I., *Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes*, Wear 251 (2001) 1469-1476.
- Osterle 2004** Osterle W., Urban I., *Friction layers and friction films on PMC brake pads*, Wear 257 (2004) 215-226.
- Osterle 2006a** Osterle W., Urban I., *Third body formation on brake pads and rotors*, Tribology International 29 (2006) 401-408.
- Osterle 2006b** Osterle W., Müller U., Bulthé A.-L., Degallaix G., Desplanques Y., Dmitriev A., *Third body formation of two different brake pad materials designed for railway application*, Journées Européennes de Freinage - JEF 2006 (2006).
- Ostermeyer 2003** Ostermeyer G.P., *On the dynamics of the friction coefficient*, Wear 9 (2003) 852-858.
- Pajani 1989** Pajani D., *Mesure par thermographie infrarouge*, ADD Editeur (1989) 418 p.
- Panier 2004** Panier S., Dufrenoy P., Weichert D., *An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes*, Wear 256 (2004) 817-827.
- Panier 2005** Panier S., Dufrenoy P., Brunel J.F., Weichert D., *Progressive waviness distortion: a new approach of hot spotting in disc brakes*, J. of Thermal Stresses 28(1) (2005) 47-62.
- Roman-Martinez 1996** Roman-Martinez M.C., Cazorla-Amoros D., Linares-Solano A., *Structural study of phenolformaldehyde char*, Carbon 34 (1996) 719-727.
- Roussette 2001** Roussette O., Desplanques Y., Degallaix G., Avoine J., Gallo Y., *Comportement tribologique en freinage à haute énergie de granitures en matériaux organiques*, J. Int. Francophones de Tribologie JIFT 2001 Tribologie de Matériaux Organiques SIRPE (2002) 36-45.
- Roussette 2003** Roussette O., Desplanques Y., Degallaix G., *Thermal representativity of tribological reduced-scaled testing*, Comptes Rendus Mécanique 331 (2003) 343-349.
- Roussette 2005** Roussette O., *Etude tribologique de couples de matériaux sous sollicitations de freinage très sévères. Application à un frein à performance améliorées.*, Thèse Université des Sciences et Technologie de Lille (2005).
- Satapathy 2004** Satapathy B.K., Bijwe J., *Performance of friction materials based on variation in nature of organic fibres. Part 1 Fade and recovery behaviour*, Wear 257 (2004) 573-584.
- Thevenet 2006a** Thevenet J., Bulthé A.-L., Siroux M., Desplanques Y., *Etude des transferts thermiques lors d'un contact périodique patin-disque sur un*

tribomètre de freinage, Congrès Français de Thermique - SFT 2006 (2006).

Thevenet 2006b

Thevenet J., Bulthé A.-L., Siroux M., Desplanques Y., Desmet B., Degallaix G., *Etude des transferts thermiques lors d'un contact périodique sur un tribomètre de freinage*, Journées Européennes de Freinage - JEF 2006 (2006).

Trick 1995

Trick K.A., Saliba T.E., *Mechanisms of the pyrolysis of phenolic resin in carbon/phenolic composite*, Carbon 33 (1995) 1509-1515.

ANNEXE A. : CARACTERISATION DU COUPLE DE MATERIAUX ETUDIE

A.1. Matériau composite à matrice organique

Afin de déterminer la composition des différents constituants du matériau composite, un échantillon poli du matériau a été observé en microscopie électronique à balayage (MEB) et analysé par spectroscopie à énergie dispersive (EDS). Les observations au MEB ont été réalisées en électrons rétrodiffusés : les nuances de gris du plus clair au plus foncé correspondent aux éléments des plus lourds aux plus légers. L'analyse par EDS menée en mode 'imaging' a fourni une cartographie des différents éléments présents dans le matériau (Figure A-1).

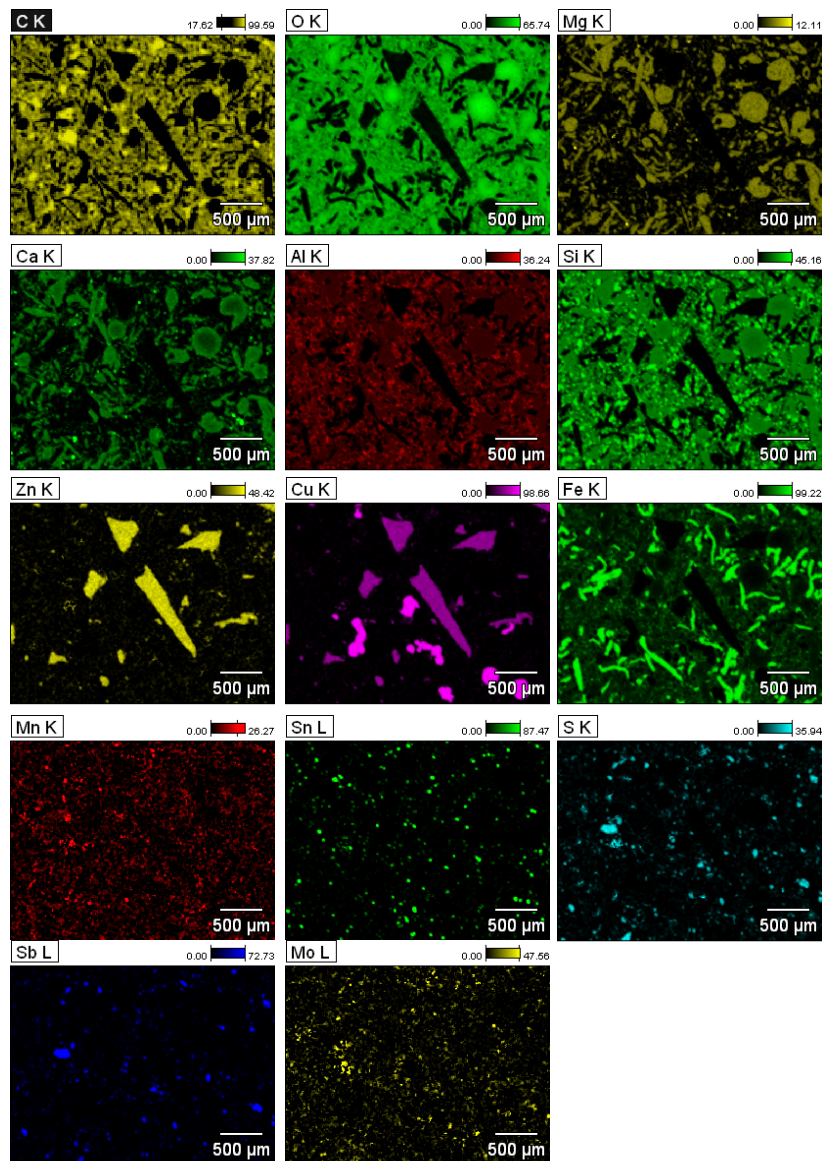


Figure A-1 : Observations MEB en électrons rétrodiffusés et analyses en EDS du matériau composite à matrice organique.

Il est également possible d'obtenir la composition d'un constituant en réalisant un pointé sur celui-ci. Les positions des pointés réalisés sont repérées sur l'observation au MEB de la Figure A-2 et les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau A-1. Les résultats sont présentés en % massique.

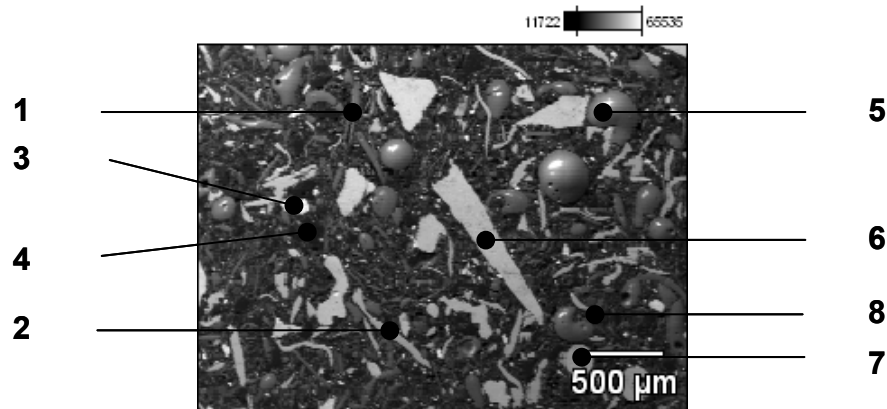


Figure A-2: Observation MEB du matériau composite à matrice organique et position des pointés EDS

Ces analyses permettent d'observer les fibres et les particules constituant le matériau et d'en analyser la composition :

- les fibres minérales (pointé n°1) apparaissent riches en éléments O, Si, Al, Mg et Ca combinés pour former de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3), de la chaux (CaO) et de la magnésie (MgO). Il est à noter que ces fibres contiennent également une quantité non négligeable de fer. Ces fibres ont une longueur maximale de 300 μm .
- les fibres métalliques (pointé n°2) sont constituées d'acier riche en Fe et contenant une faible quantité de Mn, et ont une longueur comprise entre 100 à 300 μm .
- les particules de lubrifiants solides sont de deux types : d'une part, riches en S, Sb et Mo formant de la stibnite (Sb_2S_3) et de la molybdénite (MoS_2) (pointé n°3) et, d'autre part, riches en carbone formant du graphite (pointé n°4).
- les particules abrasives (pointé n°5) sont des particules minérales sphériques (d'un diamètre maximal de 400 μm) de la même composition que les fibres minérales.
- les particules métalliques sont de trois composition différentes : les premières sont constituées de Zn et Cu formant du laiton (pointé n°6) et présentent des formes découpées pour des tailles variables pouvant dépasser 1 mm, les secondes sont en Cu (pointé n°7) sous forme de sphères ou de particules plus allongées d'une taille moyenne de 100 μm enfin les troisième sont des particules de faible taille (une vingtaine de μm) de Sn (pointé n°8).

	1	2	3	4	5	6	7	8
C	NS	NS	NS	100	NS	NS	NS	NS
O	49,3	1,5	1,5	SSD	60,2	5	1,7	22,8
Mg	4,9	1,3	SSD	SSD	5,4	SSD	SSD	1,2
Ca	7,5	SSD	0,5	SSD	3,8	SSD	SSD	SSD
Al	6,3	0,8	SSD	SSD	8,1	SSD	0,6	3,6
Si	21,3	1,7	SSD	SSD	17,9	SSD	0,6	8
Zn	1,2	1,5	SSD	SSD	SSD	41,1	SSD	2,2
Cu	1,2	1,2	0,9	SSD	SSD	51,9	95,8	0,8
Fe	7,4	92	SSD	SSD	1,5	0,7	1,3	4,3
Mn	SSD	SSD	0,8	SSD	SSD	SSD	SSD	0,8
Sn	SSD	SSD	SSD	SSD	SSD	SSD	SSD	54,4
S	SSD	SSD	26,1	SSD	SSD	0,6	SSD	SSD
Sb	SSD	SSD	64	SSD	2,6	0,7	SSD	SSD
Mo	0,9	SSD	5,1	SSD	0,5	SSD	SSD	0,9

Tableau A-1 : Composition en % massique des constituants pointés en analyse EDS
(NS : non significatif, SSD : sous le seuil de détection de 0,5%)

Les fibres organiques n'ont pas été identifiées aux cours de analyses mais leur nature est connue, il s'agit de fibres d'aramide.

La Figure A-3 présente une observation au MEB réalisée en électrons rétrodiffusés : les nuances de gris du plus clair au plus foncé correspondent aux éléments des plus lourds aux plus légers. La figure montre l'hétérogénéité du matériau avec une répartition non-homogène des constituants. Cette observation au MEB est complétée par l'indication de la nature des constituants du matériau.

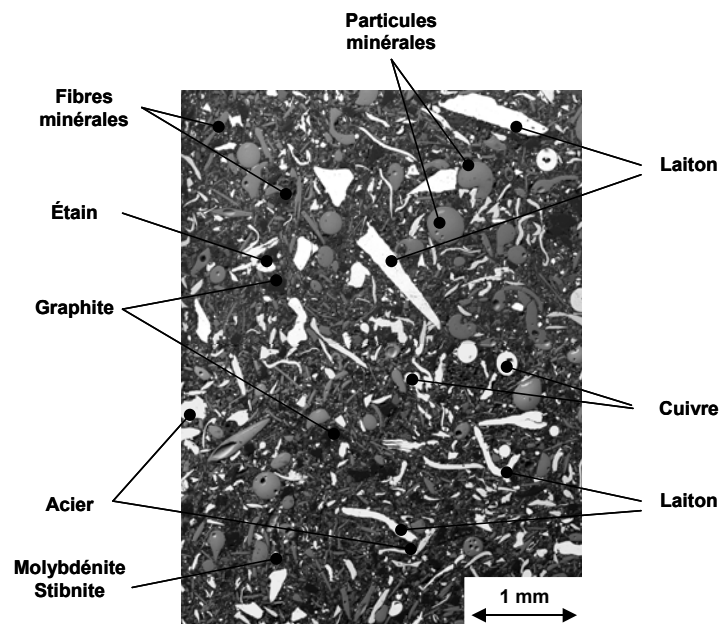


Figure A-3 : Observation de différents constituants du matériau composite à matrice organique au MEB en électrons rétrodiffusés

A.2. Fonte à graphite lamellaire

Deux techniques d'analyse complémentaires ont été utilisées pour déterminer la composition de la fonte à graphite lamellaire étudiée : la spectroscopie à décharge lumineuse et l'analyse par combustion. Les analyses ont été menées dans le laboratoire de la fonderie de la Française de Mécanique.

A.2.1. Spectroscopie à décharge lumineuse

La spectroscopie à décharge lumineuse est une technique d'analyse fondée sur la spectroscopie d'émission optique. Une tension, appliquée sous argon entre une cathode (constituée par l'échantillon) et une anode tubulaire, provoque une décharge. L'échantillon subit alors un bombardement ionique conduisant à la formation d'un plasma lumineux. C'est le spectre d'émission de ce plasma qui est caractéristique de la composition de la cathode, c'est à dire de l'échantillon. La spectroscopie à décharge lumineuse est une technique d'analyse qui nécessite l'absence de carbone. Il est ainsi nécessaire de faire subir au matériau avant analyse une refusion et une coulée rapide dans un moule en cuivre afin d'obtenir une médaille de fonte blanche dans laquelle le carbone est dissout dans la matrice. Deux analyses ont été réalisées. Les compositions en % massique obtenues ainsi que la moyenne des analyses sont présentées dans le Tableau A-2. Seuls sont présentés les éléments pour lesquels la teneur est supérieure à 0,01 % afin de se placer au-dessus du bruit de mesure.

Elément	Composition 1 (%)	Composition 2 (%)	Composition moyenne (%)
Fe	92,46	92,51	92,49
C	3,33	3,30	3,315
Si	2,24	2,23	2,235
Mn	0,68	0,68	0,68
Cu	0,65	0,65	0,65
Cr	0,37	0,37	0,37
S	0,09	0,09	0,09
Ni	0,06	0,06	0,06
P	0,05	0,04	0,045
Ti	0,02	0,02	0,02
Mo	0,02	0,02	0,02

Tableau A-2 : Résultats des analyses SDL en % massique

Il est à noter que les mesures des teneurs en carbone et en soufre obtenues par cette technique sont peu fiables. En effet, lors de l'obtention de la médaille en fonte blanche par refusion puis coulée, il y a oxydation de ces deux éléments, ce qui fausse les mesures de leurs teneurs respectives. De plus, les valeurs en % massique calculées pour les autres éléments, qui en sont dépendantes, en sont faussées. Pour contourner ce problème, une mesure complémentaire par combustion est réalisée afin de déterminer avec précision les teneurs en carbone et en soufre.

A.2.2. Analyse par combustion

Le principe de cette analyse est le suivant : après avoir porté un échantillon de 2 mg du matériau à une température comprise entre 800 et 1000°C dans une chambre de combustion sous courant de dioxygène, on détecte par Infra-Rouge le dioxyde de carbone et le dioxyde de soufre formés, ce qui permet la quantification du carbone et du soufre. Les résultats obtenus pour la fonte étudiée sont présentés dans le Tableau A-3.

Elément	Composition (%)
C	3,41
S	0,13

Tableau A-3 : Résultats de l'analyse par combustion en % massique

On note que les pourcentages de carbone et de soufre obtenus par combustion sont logiquement supérieurs à ceux déterminés par SDL.

A.2.3. Composition élémentaire

A partir des valeurs de composition en carbone et en soufre déterminées par combustion, on normalise les teneurs des différents éléments déterminées par SDL. La composition élémentaire ainsi corrigée de la fonte à graphite lamellaire étudiée est donnée dans le Tableau A-4.

Symbole	Composition (%)
Fe	92,41
C	3,41
Si	2,23
Mn	0,68
Cu	0,62
Cr	0,37
S	0,13
Ni	0,06
P	0,04
Ti	0,02
Mo	0,02

Tableau A-4 : Composition de la fonte à graphite lamellaire en % massique

ANNEXE B. GEOMETRIE DES EPROUVETTES

B.1. Géométrie des éprouvettes sur le tribomètre Lorient

Le plan d'ensemble du montage des éprouvettes sur le tribomètre « Lorient » est présenté en Figure B-1.

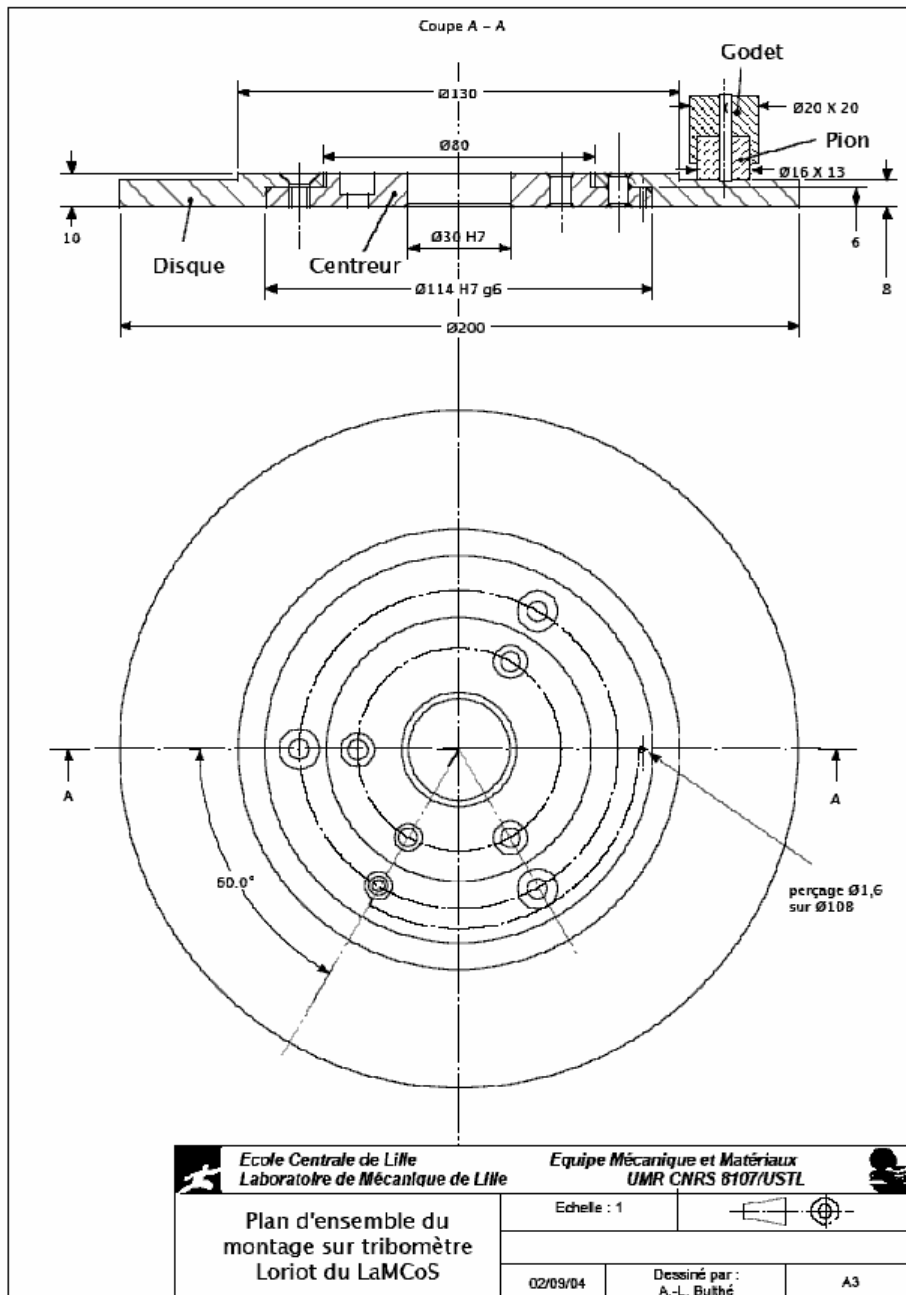


Figure B-1 : Géométrie des éprouvettes sur le tribomètre « Lorient »

Le pion en matériau composite à matrice organique est de forme cylindrique avec un diamètre de 16 mm pour une hauteur de 13 mm. Les pions ont été découpés par la technique du jet d'eau dans des plaques de matériau composite fournies par le fabricant. Les pions ont été collés dans

un godet en acier de forme cylindrique $\text{Ø}20 \times 20$ mm. L'ensemble est percé d'un trou de 3 mm de diamètre pour le passage du capillaire de prélèvement du spectromètre de masse et vient se monter dans une pince de serrage qui assure le maintien du pion sur le tribomètre. Un perçage de 1,6 mm de diamètre à 2 mm sous la surface de frottement est réalisé dans le pion pour le montage du thermocouple servant à la mesure de température de masse dans le pion.

Le diamètre intérieur des bruts de fonderie des disques ne permet pas de réaliser un montage direct des disques d'essais sur le tribomètre « Loriot » dont le centrage des disque est prévu sur un diamètre de 30 mm. Un centreur entre le tribomètre et le disque d'essais a été conçu et réalisé en acier. La piste de frottement du disque est comprise entre les diamètres 130 et 200 mm. L'épaisseur du disque sous cette piste est de 8 mm. Un perçage de 1,6 mm de diamètre est réalisé dans l'adaptateur sur un rayon de 54 mm pour le passage du thermocouple de mesure de température de masse du disque.

Le bras articulé du tribomètre est réglé afin d'assurer le contact entre le pion et le disque sur un rayon moyen de frottement de 78 mm.

B.2. Géométrie des éprouvettes sur le tribomètre de freinages du L.M.L.

Les géométries des éprouvettes sont telles que le rayon de frottement moyen est de 100 mm. La géométrie de l'éprouvette en matériau composite adoptée sur le tribomètre de freinage est celle d'un patin allongé dans le sens du glissement (Figure B-2).

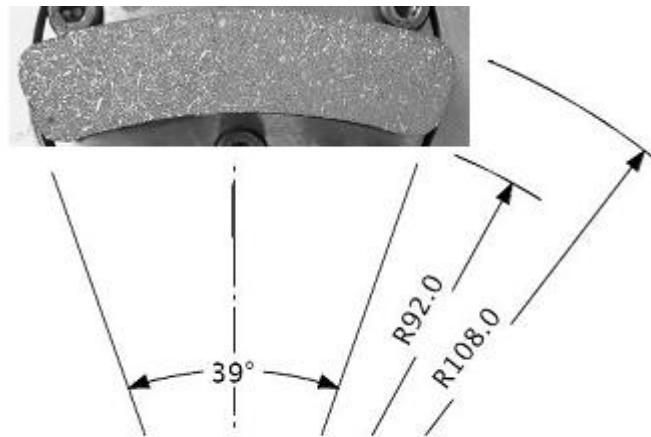


Figure B-2: Plan du patin utilisé sur le tribomètre de freinage du L.M.L.

La largeur radiale du patin est de 16 mm pour une longueur angulaire moyenne de 68 mm correspondant à un angle de 39° . Cette géométrie conduit à une surface frottante du patin de 1100 mm^2 . Les patins ont été découpés au jet d'eau dans les plaques de matériau composite de 14 mm^2 d'épaisseur fournies par le fabricant, puis fixés au support métallique à l'aide d'une colle Araldite résistante aux hautes températures. La surface du patin est rectifiée afin de garantir la planéité entre la surface frottante et la surface d'appui du support métallique. Un perçage non débouchant de diamètre 1,5 mm est effectué dans le patin jusqu'à 2 mm de la surface de frottement pour le montage du thermocouple permettant la mesure de la température de masse du patin.

La géométrie du disque en fonte à graphite lamellaire est présentée en Figure B-3. La largeur utile pour la piste de frottement du disque est de 17 mm, supérieure de 1 mm à celle du patin. L'épaisseur sous la piste de frottement est de 22 mm. La surface frottée du disque est de $10\,100$

mm². Le disque est usiné par tournage et la piste de frottement est polie manuellement. Les écarts de forme du disque sont mesurés après polissage et présentent un maximum de 60 µm. Des perçages non débouchants de diamètre 1,5 mm sont réalisés dans le disque pour permettre le montage des thermocouples assurant les mesures de température de masse dans le disque. La profondeur de ces perçages est adaptée aux besoins des essais afin de permettre des mesures de température de masse à différentes profondeurs sous la surface de frottement du disque. Quatre thermocouples peuvent ainsi être utilisés simultanément lors des essais. Après montage du disque sur le tribomètre, le battement du disque est mesuré à l'aide d'un capteur LVDT : le battement moyen est de 40 µm et le battement maximal est de 65 µm.

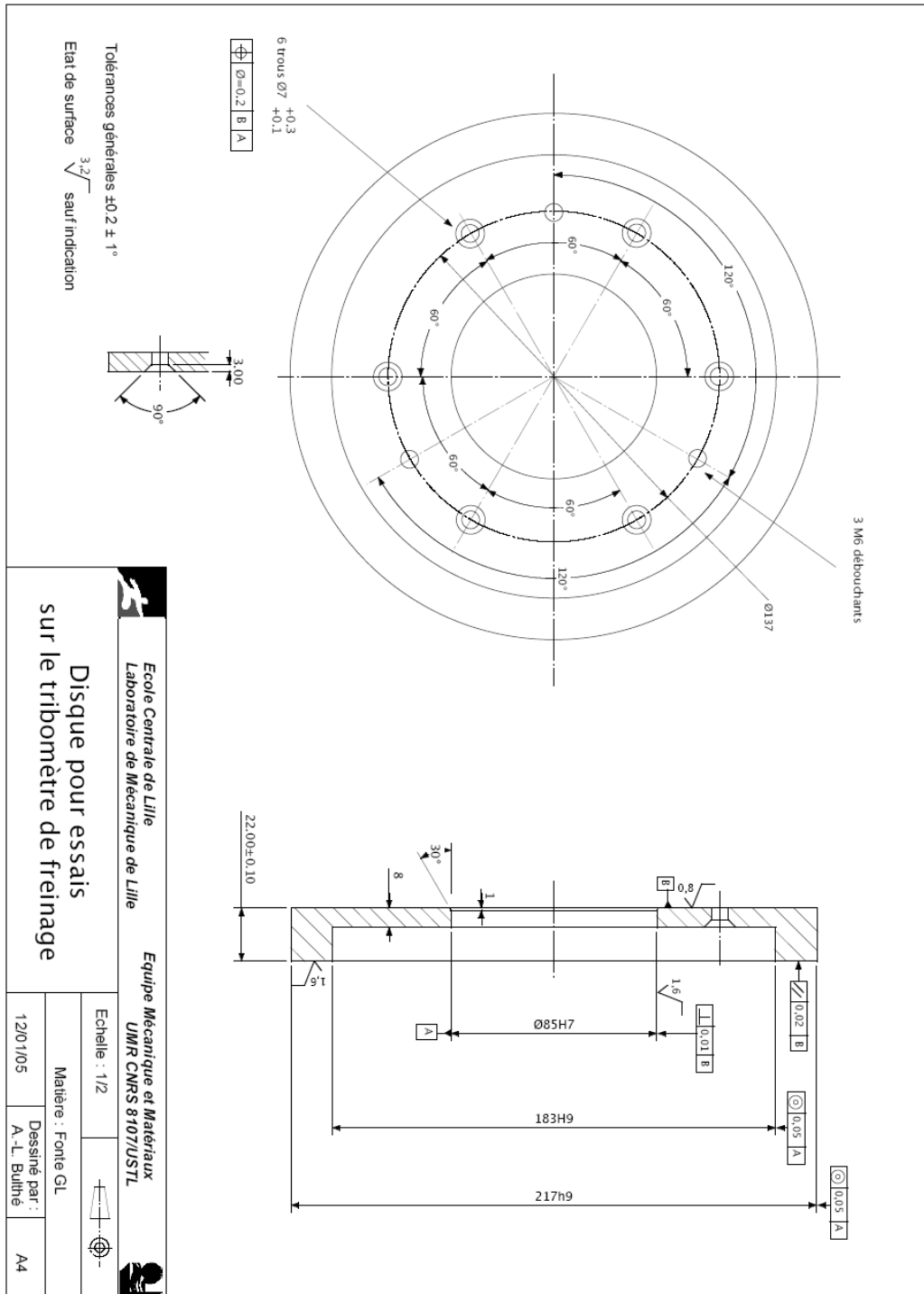


Figure B-3 : Plan du disque utilisé sur le tribomètre de freinage du L.M.L.

