



HAL
open science

Usure et endommagement de matériaux carbonés comme éléments de contact électrique pour pompe à carburant automobile

Romain Charpenay

► **To cite this version:**

Romain Charpenay. Usure et endommagement de matériaux carbonés comme éléments de contact électrique pour pompe à carburant automobile. Autre. Ecole Centrale de Lyon, 2011. Français. NNT : 2011ECDL0039 . tel-00677115

HAL Id: tel-00677115

<https://theses.hal.science/tel-00677115>

Submitted on 7 Mar 2012

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

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

Thèse de l'Université de Lyon

Délivrée par l'École Centrale de Lyon

Spécialité : Science des matériaux

Soutenue publiquement le 23 novembre 2011

Par

M. Romain CHARPENAY

*Préparée au Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes
(LTDS)*

Titre :

*Usure et endommagement de matériaux carbonés
comme éléments de contact électrique pour pompe à
carburant automobile*

École Doctorale des Matériaux de Lyon

<i>Président</i>	<i>Zaidi H.</i>	<i>Professeur des Universités, LMS-SP2MI</i>
<i>Rapporteur</i>		
<i>Rapporteur</i>	<i>Rouchon J.-F.</i>	<i>Professeur des Universités, NPT-ENSEEIH</i>
<i>Invité</i>	<i>Cornuault P.-H.</i>	<i>Maître de conférences, FEMTO-ST</i>
<i>Invité</i>	<i>Fridrici V.</i>	<i>Maître de conférences, LTDS-ECL</i>
<i>Encadrant</i>	<i>Lietrad C.</i>	<i>Directrice R&D AVO Carbon</i>
<i>Encadrant</i>	<i>Kapsa P.</i>	<i>Directeur de recherche, LTDS-ECL</i>

Thèse de l'Université de Lyon

Délivrée par l'École Centrale de Lyon

Spécialité : *Science des matériaux*

Soutenue publiquement le 23 novembre 2011

Par

M. Romain CHARPENAY

Préparée au *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes*
(LTDS)

Titre :

*Usure et endommagement de matériaux carbonés
comme éléments de contact électrique pour pompe à
carburant automobile*

École Doctorale des Matériaux de Lyon

Président	Zaidi H.	Professeur des Universités, LMS-SP2MI
Rapporteur		
Rapporteur	Rouchon J.-F.	Professeur des Universités, NPT-ENSEEIH
Invité	Cornuault P.-H.	Maître de conférences, FEMTO-ST
Invité	Fridrici V.	Maître de conférences, LTDS-ECL
Encadrant	Lietrad C.	Directrice R&D AVO Carbon
Encadrant	Kapsa P.	Directeur de recherche, LTDS-ECL

Même les plus sombres des nuits finissent par une percée du soleil...

A Stéphanie,

mes parents,

mes frères,

et mes amis.

Ce travail de doctorat a été réalisé au sein du Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513. Ce projet BioColCarbone est issu d'un financement ANR et a été réalisé conjointement avec la société AVO Carbon (initialement Carbone Lorriane) et le laboratoire IS2M de Mulhouse.

Je tiens à remercier les personnes qui m'ont encadré lors de ma thèse : Philippe Kapsa, mon directeur de thèse (Directeur de recherche CNRS), et Christine Lietard (Directrice R&D AVO Carbon). Je tiens aussi à remercier Gaëtan pour son aide en conception et ses conseils avisés de tous les jours.

Je tiens à remercier Denis Mazuyer, Directeur du laboratoire LTDS, qui m'a permis d'intégrer cette structure de recherche. J'associe à ces remerciements tous les membres du laboratoire qui m'ont soutenu et que j'ai pu côtoyer durant cette longue période !

Je remercie Jérôme et le laboratoire MATEIS de l'INSA de Lyon pour m'avoir fait découvrir et apprécier la tomographie et pour les Beachvolley-BBQ auxquels j'ai pu parfois participer !

Je n'oublierai jamais les personnes qui m'ont encouragé pour la dernière ligne droite et qui m'ont permis de "faire de la science" ;-) à travers les dernières heures de ma thèse lors de riches discussions : Doudou, le calme et sympathique co-bureau sénégalais avec qui l'on peut échanger sur de nombreux sujets de tous horizons (même s'il supporte l'OL) ; Franck, que je n'ai malheureusement pas eu le temps de bien connaître mais qui a su très vite m'apporter son aide et son approche des sciences par la philosophie ; Florian, le supporter d'un club sans avenir... (l'OM pour les incultes) sans qui la vie du labo et le foot du vendredi seraient tristes ; Juliette, la spécialiste de la tartiflette mais aussi la sensible et dynamique Super-doc qui n'hésite pas à rejoindre ses mentors répartis dans le monde pour discuter Science !...Merci pour tout.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui ont participé à l'aventure 'Einstein et les gambettes' (participation aux semi-marathons : Annecy 2011 et Lyon 2011) qui a su rassembler tous les corps de métiers et les différentes générations du laboratoire. Une expérience riche en émotions !

ECLAT a aussi été un moment important de ma vie à l'Ecole Centrale et je souhaite remercier tous ceux qui ont participé à cette association et à l'évènement CRIEC 2009 qui a été un dur mais riche apprentissage !

Enfin, je souhaite chaleureusement remercier ceux qui ont fait en sorte que la vie de tous les jours - lors de discussions footballistiques, scientifiques ou encore culturelles poussées, des barbecues/pétanques... - ait été très agréable, permettant de s'évader quelques instants de ce dur labeur qu'est la thèse :

Max (le co-bureau un brin philosophe) Doudou (le co-bureau sénégalais), Denis (le directeur du labo qui prend le temps de discuter football avec les doctorants, si l'on considère que l'OL est un club de foot) Suzanne (la cyclotouriste au service de la vie du laboratoire), Flo (le super Risoulaid à qui je dois beaucoup) qui est le poulain de Juliette (la Super-Doc généreuse en

Remerciements

conseils scientifiques et pratiques courantes.... !), Julian (le breton supporter des merlus et dont la famille est hors-norme...), Ludo (le ventre à choux rochelaid ! un batteur sans précédent), Kény (Rider made in Gwada à qui je dois une revanche à Corrençon !), Fipi (le rider amateur de chocolat et de muscu...), Vaness (dédicace à la nouvelle rideuse “What’s the fuck Putain” !), Jean (pour les douches...dédicace : ‘j’ai vu les populations laborieuses du Cap’...des prochaines !) Jessica et Aurélien (petits cachotiers...), Brigitte, Caro, Alex, Delphine, Alice, Sophie (la charmante joggeuse nano-indenteuse !), Manu, Didier, Cyril, Anton et Olga (les russes amateurs de bière et de bretons), Christine, Fabrice (le motard et son voisin Pépé Jean), Gaylord (l’imitateur fou et amateur de tunnels....”Alors cha boche ?” !), Hélène, Imène, Leslie, Maha, Julien, Thibault, Marine, Mathieu, Mickaël, Minori (SushiMaster), Samuel, Stéphane, Zélie et Paulette (les com’pa !), Gaëtan (Maître PES...)...et ceux que j’ai peut-être involontairement oubliés !

Sommaire

Introduction générale

CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE	6
I.1.1. Rôle de la pompe de gavage	6
I.1.2. Principe et fonctionnement d'un moteur à courant continu	8
I.1.2.1. Principe général	8
I.1.2.2. Rôle du contact balai – collecteur	9
I.1.2.3. Le phénomène de commutation	10
I.2. CARBURANTS ET BIOCARBURANTS UTILISÉS POUR L'AUTOMOBILE	12
I.2.1. Carburants fossiles	12
I.2.1.1. Les essences	14
I.2.1.2. Les diesels	14
I.2.2. Biodiesels issus d'esters méthyliques d'huiles végétales	14
I.2.2.1. Origine des biodiesels	14
I.2.2.2. Comparaison de la tribologie des diesels et biodiesels	16
I.3. MATÉRIAUX COMPOSITES CARBONES POUR APPLICATION ÉLECTRIQUES	16
I.3.1. Phase carbonée	17
I.3.1.1. Graphite naturel macro-cristallin	17
I.3.1.2. Noir de carbone	17
I.3.1.3. Cokes	18
I.3.1.4. Graphite synthétique ou électrographite	18
I.3.1.5. Graphite expansé	18
I.3.2. Phase polymère : liants organiques	19
I.3.2.1. Polysulfure de phénylène : PPS	19
I.3.2.2. Résine formophénolique : PF	20
I.4. COMPORTEMENT DU CONTACT BALAIS-COLLECTEUR	20
I.4.1. Interface entre deux solides	21
I.4.1.1. Théorie du contact	21
I.4.1.2. Contact électromécanique	23
I.4.1.3. Régime de lubrification	23
I.4.2. Usure du contact balais-collecteur	24
I.4.2.1. Usure mécanique	25
I.4.2.2. Conséquence d'un passage d'un courant dans le contact	27
I.4.2.3. Modèles d'usure	30

I.5. CONCLUSION : CADRE SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE	32
I.6. BIBLIOGRAPHIE	33

CHAPITRE II. CARACTERISATION DES MATERIAUX ET CARBURANTS

II.1. CARBURANTS ETUDIES	42
II.2. MATERIAUX CARBONES	42
II.2.1. Mise en forme des échantillons	42
II.2.1.1. Types de nuances étudiées	42
II.2.1.2. Mise en œuvre	43
II.2.2. Caractérisation structurale des matériaux d'étude	46
II.2.2.1. Observations MEB associé à la fractographie	46
II.2.2.2. La tomographie à rayons X	48
II.2.3. Caractérisation mécanique des matériaux de l'étude	54
II.2.3.1. Caractérisations mécaniques par nano-indentation	54
II.2.3.2. Comportement au rayage des matériaux	58
II.2.4. Résistivité des matériaux	62
II.3. CONCLUSION	64
II.4. BIBLIOGRAPHIE	66

CHAPITRE III. DISPOSITIF D'ESSAI ET ANALYSE DU CONTACT EXPERIMENTAL

III.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL : LE TRIBOMETRE HVSF	70
III.1.1. Fonctionnement du tribomètre HVSF	70
III.1.1.1. Description générale	70
III.1.1.2. Application de l'effort normal	73
III.1.1.3. Circulation du courant électrique dans les contacts	73
III.1.1.4. Renouvellement du carburant et stabilité thermique	74
III.1.1.5. Stabilité dynamique du contact	76
III.1.2. Mesures et acquisitions des paramètres d'entrée et de sortie	79
III.1.2.1. Méthode d'acquisition des données	79
III.1.2.2. Mesure du coefficient de frottement	80
III.1.2.3. Mesure de la position verticale d'un balai	83
III.1.2.4. Mesure de la résistance électrique du double contact	85
III.1.3. Procédure d'essai	85
III.2. ETUDE DU CONTACT EXPERIMENTAL	86

III.2.1. Géométrie et cinématique du contact	86
III.2.2. Corrélation avec l'application industrielle	87
III.3. CONCLUSION	88
III.4. BIBLIOGRAPHIE	90

CHAPITRE IV. COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE ET USURE DES CONTACTS

IV.1. DESIGNATIONS ET CONVENTIONS	94
IV.2. FROTTEMENT ET USURE DE MATERIAUX CARBONES	95
IV.2.1. Comportement tribologique du double contact	95
IV.2.1.1. Frottement en l'absence de courant électrique	95
IV.2.1.2. Frottement en présence d'un courant électrique	96
IV.2.1.3. Régime de lubrification limite et profils d'usure	98
IV.2.2. Influence des conditions d'essais	99
IV.2.2.1. Influence de l'effort normal	99
IV.2.2.2. Influence de l'intensité du courant électrique	100
IV.2.2.3. Influence de la vitesse de rotation	101
IV.2.2.4. Influence du milieu	103
IV.2.3. Mécanismes d'usure : vers un modèle phénoménologique d'usure	104
IV.2.3.1. Observations microscopique des surfaces frottées	104
IV.2.3.2. Modèle phénoménologique d'usure	107
IV.3. CREATION D'ARCS ELECTRIQUES UNIQUES	109
IV.3.1. Dispositif expérimental	109
IV.3.1.1. Principe du dispositif	109
IV.3.1.2. Protocole d'essai	111
IV.3.2. Phénomènes induits par l'arc d'ouverture unique	112
IV.3.2.1. Signaux électriques et endommagements typiques de l'arc	112
IV.3.2.2. Effets de différents paramètres sur l'arc	113
IV.3.2.3. Evolution de l'énergie d'arc	120
IV.3.3. Discussions – modèle d'endommagement par arc	121
IV.3.3.1. Variations de volumes : cratères ou bosses	121
IV.3.3.2. Modèle d'endommagement par arc électrique	125
IV.4. DISCUSSIONS : VERS UN MECANISME ELEMENTAIRE D'USURE	127
IV.5. BIBLIOGRAPHIE	130

CONCLUSION

Introduction

La pompe de gavage ou pompe à carburant est un organe auxiliaire nécessaire au bon fonctionnement d'un véhicule. Elle permet d'acheminer le carburant du réservoir vers les systèmes d'injections du moteur en assurant un débit constant. Cette pompe est constituée d'un moteur électrique à courant continu entraînant une turbine permettant la mise en mouvement du carburant et se doit d'être immergée dans le réservoir de l'automobile. La conception du moteur électrique entraîne le passage du courant entre le stator et le rotor via le frottement de deux balais fixes contre un collecteur tournant.

Le frottement électrochimique et immergé dans le carburant issu du mouvement des balais et du collecteur entraîne inévitablement une usure variable selon les conditions de fonctionnement. C'est donc l'usure de ce contact balais-collecteur qui va imposer à la pompe de gavage sa durée de vie.

L'utilisation à l'heure actuelle de carburant de type biodiesel oblige le constructeur des balais et collecteur à utiliser des matériaux à base graphitique et non de cuivre, généralement employé. Les nuances carbonées utilisées sont fréquemment composites et variées mais comportent un pourcentage important de graphite en raison de ses propriétés autolubrifiantes, conductrices et de sa résistance chimique au carburant.

Le constructeur de balais et collecteur doit cependant faire face aux contraintes imposées par les constructeurs automobiles obligeant à la miniaturisation de ces pompes et à la fabrication à moindre coût. La pompe doit donc fonctionner dans un environnement de plus en plus sévère.

La collaboration, possible grâce à l'ANR (*Agence Nationale de la Recherche*) via ces travaux de doctorat, entre le fabricant des balais et collecteurs (*Société AVO Carbon*), le laboratoire IS2M (*Institut des Sciences des Matériaux de Mulhouse*) et le LTDS (*Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR 5513 CNRS*) a pour but l'étude du contact glissant électrochimique en milieu carburant issu de la pompe de gavage. Les nuances de matériaux définies par les membres du projet seront alors testées par les différentes entités du projet dans le but d'apporter une avancée dans la compréhension des phénomènes physiques régissant l'usure du contact balais-collecteur présent dans la pompe de gavage.

Une analyse bibliographique du contact balais-collecteur est réalisée dans le *chapitre 1* de ce manuscrit afin d'appréhender les mécanismes agissant sur son comportement tribologique. Il a pour but de montrer la complexité du contact étudié du fait du grand nombre de paramètres influents sur celui-ci. On peut affirmer que le comportement tribologique du contact possède des composantes mécaniques, électriques et physico-chimiques présentes en proportions variables. Même si très peu de travaux ont été réalisés sur le tribocontact étudié, un nombre conséquent d'études touchant à des domaines très proches ont été menées dans la littérature.

Afin de comprendre les phénomènes physiques générés par le frottement balais-collecteur, il est nécessaire de définir les propriétés des nuances de matériaux étudiées. Pour ce faire, des

caractérisations structurales, mécaniques et électriques ont été effectuées à partir de diverses méthodes de caractérisation couramment pratiquées.

Dans un souci de reproduction au plus près du réel les conditions de vie du contact balais-collecteur tout en mesurant différents paramètres utiles à la compréhension des mécanismes, un tribomètre spécifique présent au sein du laboratoire LTDS a été développé et utilisé pour les différents essais réalisés au cours de ce doctorat. De nombreuses modifications rapprochant le contact expérimental de celui issu de la réalité, ont été effectuées sur le tribomètre. La difficulté réside dans la nécessité à assurer une bonne reproductibilité ainsi qu'une précision de mesure maximale compte-tenu de la complexité du contact. Le troisième chapitre met en avant les possibilités et les performances du dispositif expérimental unique, à notre connaissance, dans le cas de l'étude du tribosystème balais-collecteur à base de graphite.

Le quatrième et dernier chapitre aura pour but de mettre en avant la synthèse des résultats issus des différentes expérimentations effectuées au cours de ce doctorat. A partir de ces conclusions expérimentales, un modèle phénoménologique du comportement à l'usure des matériaux carbonés présents dans la pompe de gavage est proposé. Il permet d'apporter une aide à la compréhension des mécanismes complexes et nombreux, présents dans le frottement des balais et du collecteur.

Chapitre I.

Synthèse bibliographique

L'objet de ce chapitre est à la fois de situer le contexte industriel et scientifique de l'étude mais aussi de procéder à une synthèse des travaux effectués dans la littérature concernant le double contact balais-collecteur. Un travail bibliographique permet de mettre en évidence les différents phénomènes mis en jeu lors du frottement de l'interface étudiée conduisant à différents comportements en termes de mécanismes d'usure du contact. Une définition du tribo-système étudié sera énoncée pour permettre de fixer les différentes problématiques en conséquence de l'étude pour ainsi en améliorer sa compréhension.

CHAPITRE I.	5
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I.1. PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE	6
I.1.1. <i>Rôle de la pompe de gavage</i>	6
I.1.2. <i>Principe et fonctionnement d'un moteur à courant continu</i>	8
I.2. CARBURANTS ET BIOCARBURANTS UTILISES POUR L'AUTOMOBILE.....	12
I.2.1. <i>Carburants fossiles</i>	12
I.2.2. <i>Biodiesels issus d'esters méthyliques d'huiles végétales</i>	14
I.3. MATERIAUX COMPOSITES CARBONES POUR APPLICATION ELECTRIQUES.....	16
I.3.1. <i>Phase carbonée</i>	17
I.3.2. <i>Phase polymère : liants organiques</i>	19
I.4. COMPORTEMENT DU CONTACT BALAIS-COLLECTEUR	20
I.4.1. <i>Interface entre deux solides</i>	21
I.4.2. <i>Usure du contact balais-collecteur</i>	24
I.5. CONCLUSION : CADRE SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE	32
I.6. BIBLIOGRAPHIE.....	33

I.1. Problématique industrielle et scientifique

I.1.1. Rôle de la pompe de gavage

Dans un moteur automobile, la pulvérisation de carburant en fines gouttelettes, qui permet d'assurer sa combustion dans l'air, est réalisée par la pompe à injection. Cette dernière doit être continuellement alimentée en carburant. De ce fait, une petite pompe électrique est placée en amont des injecteurs et les sature en carburant sous une pression définie selon le moteur. Cette pompe est appelée pompe de gavage ou pompe à carburant ou encore pompe basse pression. La figure 1.1 schématise le chemin du carburant de la pompe qui est immergée dans le réservoir vers les injecteurs du moteur.

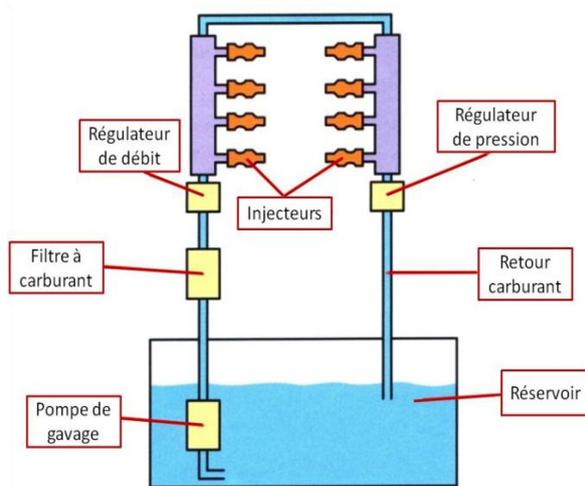


Figure 1.1. Schéma de la circulation du carburant pour alimenter un moteur d'automobile (Edgar 2005)

Cette pompe est composée d'une hélice entraînée par un moteur électrique à courant continu qui est alimenté par la batterie du véhicule. L'ensemble est situé dans une coque cylindrique à travers de laquelle circule axialement le flux de carburant aspiré. Tous les éléments constituant la pompe sont immergés dans le carburant.

La figure 1.2 présente l'allure générale courante d'une pompe de gavage.

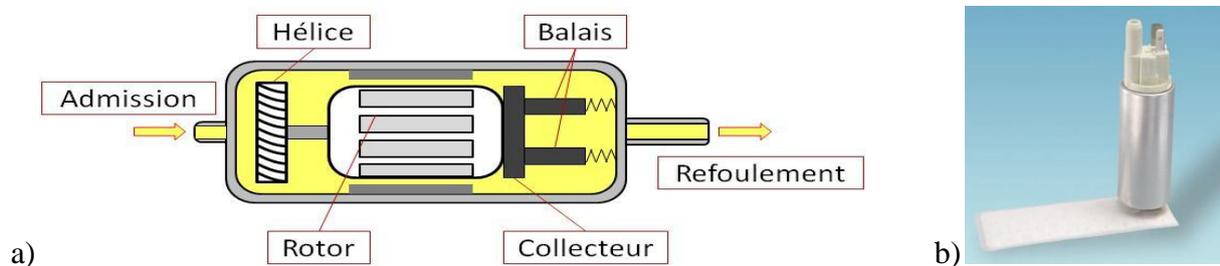


Figure 1.2. Pompe de gavage : a) Schéma de la structure, b) Photographie

Elle est composée d'un pré-filtre fixé en amont de la pompe dont le seuil de filtration est de 300 microns, qui empêche la circulation d'éventuelles particules de tailles importantes puis

d'un moteur entraînant une hélice, ce qui permet la mise en mouvement du fluide. La circulation d'un courant électrique continu a lieu entre un élément fixe appelé stator et un élément mobile appelé rotor. Cette fonction est assurée par les balais (éléments fixes) et le collecteur (solidaire au rotor).

A l'origine du développement des premiers moteurs à courant continu, les balais étaient des pinceaux de fils de cuivre. A l'heure actuelle, ce sont des pions rigides pouvant être constitués de cuivre, de graphite ou d'un mélange de ces deux matières.

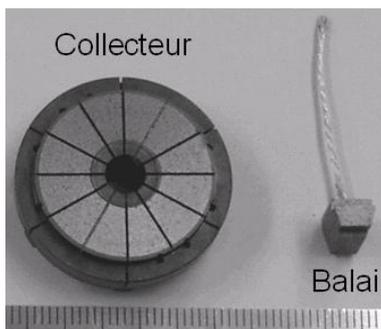


Figure 1.3. Types de balai et collecteur plan graphitiques selon (Shigemori & Sawa 2004)

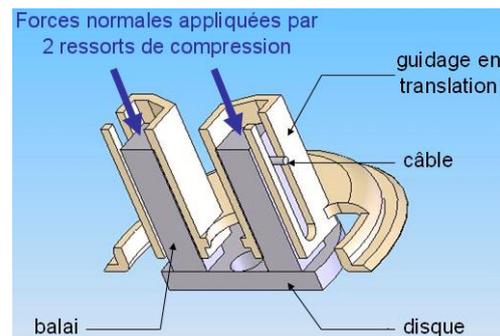


Figure 1.4. Contacts entre balais et collecteurs dans une pompe de gavage selon (Cornuault 2008)

Les collecteurs peuvent être annulaires ou plans (figure 1.3). Pour les balais, la tendance actuelle est de les fabriquer dans des matériaux graphitiques afin d'éviter les phénomènes de corrosion que l'on peut rencontrer avec le cuivre par exemple. Un ressort de compression assure un chargement mécanique obligeant le contact avec le collecteur avec des pressions moyennes de contact allant de 2 à 5 kPa. Les contacts s'usent au cours de la vie de la pompe, une chute de cette pression est observée. On peut ainsi obtenir 100 Pa en fin de vie des balais.

Guibet (Guibet 1997) annonce une volonté de réduction du poids global des voitures dans une logique d'économie de consommation de carburant, entraînant en particulier la miniaturisation des organes auxiliaires automobiles dont la pompe de gavage. Cette diminution de taille oblige à :

- augmenter les vitesses de rotation du moteur, afin de conserver un débit de carburant suffisant, entre 5.000 et 8.000 voire jusqu'à 10.000 trs/mn
- diminuer les dimensions des balais et du collecteur de la pompe.

La durée de vie de ces éléments doit être augmentée en utilisant des matériaux présentant de faibles taux d'usure dans des conditions de fonctionnement sévères :

- Application d'un effort normal
- Contact électrifé
- Vitesse de rotation élevée
- Immersion dans un carburant

I.1.2. Principe et fonctionnement d'un moteur à courant continu

I.1.2.1. Principe général

Une machine à courant continu est un convertisseur d'énergie électromécanique : un moteur DC (Direct Current ou courant continu) transforme une énergie électrique en énergie mécanique tandis qu'une génératrice transforme à l'inverse, l'énergie mécanique en énergie électrique. Nous nous intéresserons seulement au moteur DC dans cette étude.

Un moteur à courant continu est constitué de deux parties essentielles :

- Le stator qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique Φ fixe créé par la présence (dans notre étude) de deux aimants permanents diamétralement opposés (d'où le terme possible de moteur bipolaire). Le stator peut être aussi appelé inducteur.
- Le rotor (ou induit) est constitué d'un bobinage (ensemble de spires) et est mobile autour d'un axe perpendiculaire au champ magnétique Φ . Le bobinage est relié au collecteur permettant la circulation du courant.

Lorsqu'un courant I circule dans les spires placées dans le champ magnétique de l'inducteur, une force de Laplace F_L s'applique sur chaque brin conducteur et vaut :

$$F_L = I \cdot \Phi \cdot L \cdot \sin \alpha \quad \text{Equation 1.1}$$

Avec : L = longueur du brin et α = angle entre les directions de Φ et de I .

Les forces créées sur chaque brin de la spire active ont la même norme, la même direction mais des sens opposés ce qui permet la création d'un couple entraînant en rotation la spire comme indiqué sur la figure 1.5 ci-dessous.

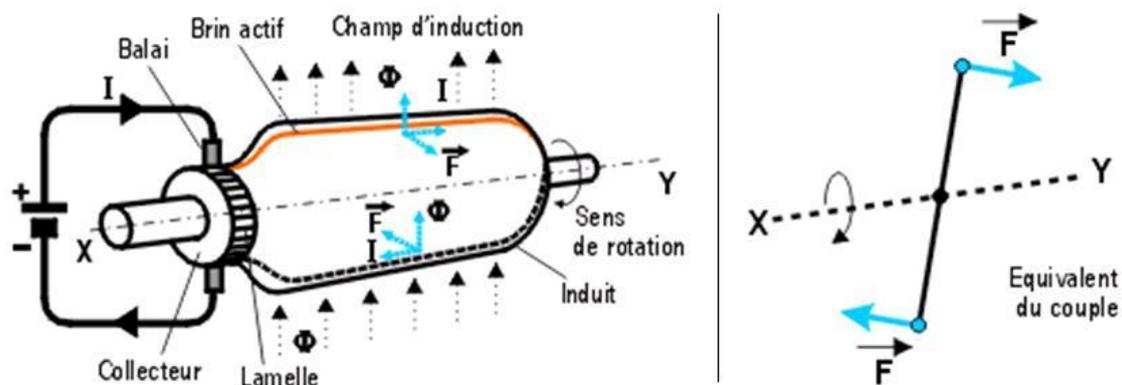


Figure 1.5. Forces de Laplace exerçant un couple sur une spire de l'induit d'un moteur DC selon (Desplanques & Manouvrier 2001)

I.1.2.2. Rôle du contact balai – collecteur

Pour simplifier l'analyse du fonctionnement du moteur, nous allons utiliser un exemple de moteur ne possédant qu'une seule spire.

Cette spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique de direction Nord-Sud comme indiqué sur la figure 1.6. De plus la spire est raccordée électriquement à un demi-collecteur et alimentée en courant continu via deux balais frottants.

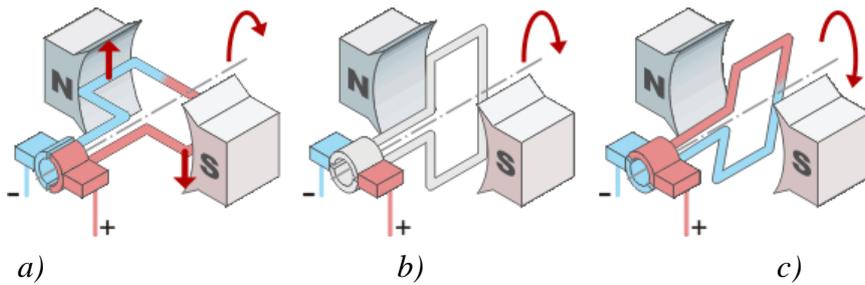


Figure 1.6. a) b) c) Etape du redressement du courant dans une spire grâce au système balais - collecteur

D'après la loi de Laplace selon laquelle tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force, les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe de rotation ou ligne neutre sont soumis à des forces entraînant en rotation le système.

Le système balais – collecteur permet la rotation complète de l'induit. En effet, si ce système n'existait pas, la spire s'arrêterait de tourner en position verticale sur (ligne neutre). Le système balais – collecteur permet de commuter le sens du courant dans les deux conducteurs au passage de la ligne neutre. Le courant étant inversé, les forces motrices sur les conducteurs le sont aussi permettant ainsi de poursuivre la rotation de la spire.

Pour un dispositif réel comprenant $2n$ lames de collecteurs, le rotor sera composé selon (Cornuault 2008) de $4n$ brins et les deux fils sortant de chaque bobine sont successivement liés en série jusqu'aux lames diamétralement opposées du collecteur comme le montre la figure 1.7.

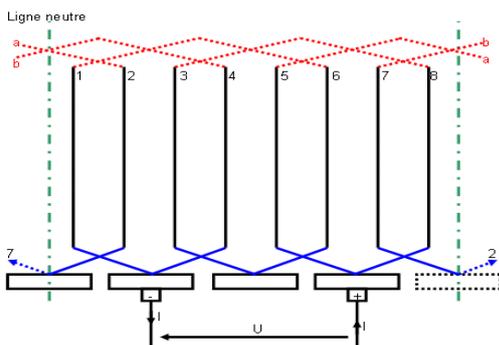


Figure 1.7. Agencement des spires avec un collecteur 4 lames selon (Cornuault 2008)

Le défaut du système balais – collecteur réside dans la présence d’étincelles ou arcs électriques lors de chaque changement de lame du collecteur. Cette opération correspond à l’ouverture d’une inductance chargée selon (Kostenko & Piotrovski 1969). Du fait de sa plus grande largeur par rapport à la distance inter- lames, le balai se trouve momentanément en contact avec deux lames lors du passage de l’une à l’autre. Les perturbations électriques résultant de ce phénomène appelé phénomène de commutation sont étudiées dans le paragraphe suivant.

I.1.2.3. Le phénomène de commutation

La commutation est un phénomène électrique qui consiste à changer le sens du courant dans l’induit lors du changement de segment du collecteur par le balai. Ce phénomène est présenté de façon schématisée en figure 1.8 pour un collecteur comportant 4 segments.

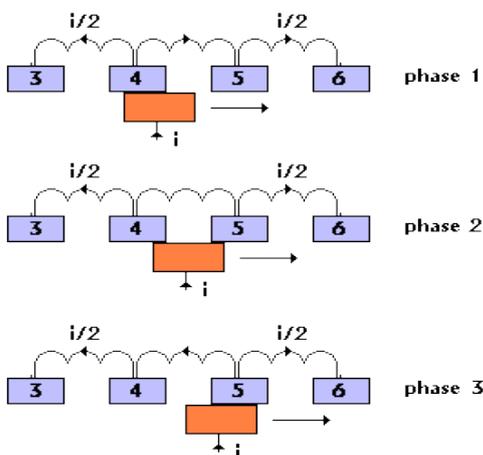


Figure 1.8. Principe de commutation selon (Abati 2002)

Lorsque le balai (représenté en orange) est en contact seulement avec les segments 4 ou 5 (respectivement phase 1 et 3), le courant circulant entre les deux balais est divisé en 2. Chaque spire possède donc un courant d’une valeur $i/2$.

En notant s la spire reliant les segments 4 et 5, lors de la phase 1, la valeur du courant est de $+i/2$ puis deviendra $-i/2$ en phase 3. Lors de la phase 2, le balai court-circuite la spire s . La section d’enroulement s reliée aux lames 4 et 5 du collecteur voit son courant s’inverser rapidement entre les phases 1 et 3. Lorsque la lame 4 quitte le balai, il y a naissance d’un arc (ouverture d’un circuit inductif) qui doit s’éteindre avant que la lame 5 ne quitte elle-même le balai, sous peine de s’étendre progressivement à toutes les lames du collecteur.

La connaissance de la valeur du courant circulant dans la spire s au cours du temps permet de décrire ce phénomène de commutation. Cependant ce calcul est complexe du fait du nombre important de paramètres d’ordre électromagnétique, de leur comportement non-linéaire ainsi que leurs interactions possibles et l’utilisation d’éléments frottants.

De ce fait Kostenko et Piotrovski (Kostenko & Piotrovski 1969) expriment la valeur du courant dans une spire pendant la commutation en donnant quelques hypothèses simplificatrices :

- La commutation est un phénomène d'origine purement électromagnétique : l'état mécanique des balais et du collecteur n'influe pas,
- La résistivité du contact balais – collecteur est constante,
- La largeur du balai est identique à celle d'un segment.

La valeur du courant i circulant dans une spire pendant la commutation est donc :

$$i = I. \left(1 - 2. \frac{t}{T}\right) \quad \text{Equation 1.2}$$

Avec : I = courant dans les spires non commutées.

T = la durée totale de la commutation (commençant à $t=0$ et se terminant à $t=T$).

Dans cette situation la commutation est dite linéaire ou idéale. Elle est représentée par la courbe I de la figure 1.9. La courbe II est observée lors de la prise en compte de la résistance propre de la section court-circuitée.

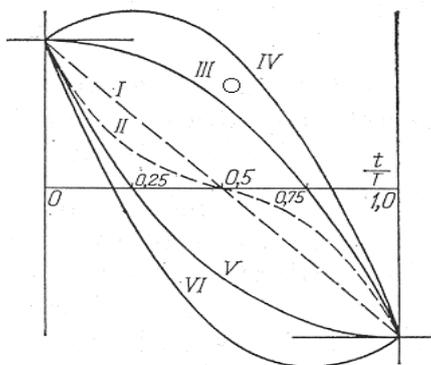


Figure 1.9. Différentes allures du courant de commutation selon (Kostenko & Piotrovski 1969)

La prise en compte de la force électromotrice (fem) d'auto-induction de la section court-circuitée conduit à deux comportements de commutation différents : la commutation peut être dite "retardée" (courbes III et IV) ou "avancée" (courbes V et VI). La courbe VI peut être jugée menaçante (la fermeture d'un circuit inductif sans décharge est réalisée plus facilement que l'ouverture). En effet, un courant nommé courant résiduel et de norme supérieure à I peut être atteint en fin de commutation.

D'après Sawa et al, (Sawa & Shimoda 1992) (Takaoka & Sawa 2001) (Nagakura & Sawa 1997), ce courant résiduel peut être étudié pour la caractérisation de la décharge d'arc. Utilisant un dispositif d'essai basé sur la simulation électrique du phénomène de commutation, ils mesurent le courant résiduel et la durée d'arc s'il a lieu. Ils avancent tout

d'abord l'hypothèse qu'une valeur seuil minimum de ce courant est nécessaire pour former un arc électrique puis mettent en avant la relation linéaire existant entre le courant résiduel et la durée d'arc de commutation donnant lieu à des courants minimums d'arc très faibles (voire nuls).

Plusieurs auteurs décrivent de manière cohérente les phénomènes électromagnétiques mis en jeu lors de la commutation par le biais de la simulation numérique mais sans tenir compte de l'évolution des propriétés électriques des balais et du collecteur due aux arcs créés (Desesquelles 1995) (R. H. Wang & Walter 2000) (Di Gerlando & Perini 2006). Selon Holm et Schobert, la commutation a tendance à se détériorer davantage au cours du temps (Holm 1967) (Shobert 1965).

Les conditions de commutation peuvent être positivement améliorées lors de la conception du moteur :

- en changeant le nombre et le type de bobinage des spires,
- en utilisant des pôles auxiliaires placés entre les aimants permanents,
- En utilisant des systèmes électroniques d'aide à la commutation permettant d'induire une fem supplémentaire (Quichaud et al. 1993) (Ihaddadene & Quichaud 1995) (Goyet & Benalla 1994),
- En utilisant des circuits amortisseurs (Peuro et al. 1993) (Hsu 1998).

Cependant l'augmentation du volume et du poids du moteur n'est pas souhaitée. Ainsi, dans le cas des pompes de gavage dont le moteur doit être de taille réduite et de faible coût de production, l'utilisation de ces précédentes techniques est à proscrire.

I.2. Carburants et biocarburants utilisés pour l'automobile

Comme étudié précédemment, le contact balais – collecteur présent dans la pompe de gavage est totalement immergé dans le carburant du réservoir. Il est donc important d'étudier les propriétés et les caractéristiques des carburants et plus particulièrement les diesels et les produits issus des huiles végétales (= biodiesels ou biocarburants).

I.2.1. Carburants fossiles

Le pétrole ainsi que les sous-produits issus de son raffinage sont des hydrocarbures. Ils sont essentiellement composés de Carbone et d'Hydrogène ainsi que d'une possible faible concentration en Soufre, Azote, Oxygène ou certains métaux. Ces hydrocarbures sont principalement des macromolécules dont les atomes de Carbone sont reliés entre eux par de

simples, doubles ou triples liaisons.

Les hydrocarbures sont répartis en trois types de famille présentés dans le tableau 1.1 :

- Les **hydrocarbures saturés** qui ne comportent que des liaisons Carbone-Carbone simples. Ils se divisent en deux catégories :
 - Les paraffines ou alcanes, à chaînes carbonées ouvertes,
 - Les naphènes ou cyclanes, dans lesquels les chaînes se ferment sur elles-mêmes pour former des cycles.
- Les **hydrocarbures insaturés** qui se répartissent en deux groupes distincts :
 - Les oléfines avec une ou plusieurs doubles liaisons. Elles sont appelées alcènes ou cyclènes selon qu'elles se présentent sous forme de chaînes ou de cycles,
 - Les acétyléniques ou alcynes, caractérisés par l'existence d'au moins une triple liaison.
- Les **hydrocarbures aromatiques** qui contiennent un ou plusieurs cycles insaturés à six atomes de carbone.

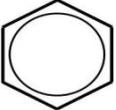
Type de famille	Désignation courante	Désignation officielle	Motif structural
Saturés	Paraffines	Alcanes	$\begin{array}{c} \quad \\ - C - C - \\ \quad \end{array}$
	Naphènes	Cyclanes	Cycle à 3, 4, 5 ou 6 carbones
Insaturés	Oléfines	Alcènes	$\begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ C = C \\ \diagup \quad \diagdown \end{array}$
	Acétyléniques	Alcynes	$- C \equiv C -$
Aromatiques	Aromatiques	-	

Tableau 1.1. Classification générale des hydrocarbures selon (Guibet 1997)

Le pétrole brut est distillé pour séparer les hydrocarbures plus ou moins lourds. Deux bases correspondant au gasoil et à l'essence sont obtenues. Cependant la formulation d'un carburant fait appel à de nombreux produits qui sont obtenus après distillation primaire, par une succession complexe de procédés de séparation et de transformation. En définitive, un carburant est obtenu en suivant différents circuits de l'unité de raffinage, les différents produits étant finalement mélangés.

I.2.1.1. Les essences

Les essences sont des hydrocarbures légers composés de 4 à 10 atomes de carbone. Meusinger trouve pour de l'Eurosuper (essence sans plomb 95) des densités comprises entre 0,732 et 0,764 kg.L⁻¹ (Meusinger 1996) qui tendent à diminuer linéairement avec la température selon (Guibet 1997). Du fait de la petite taille des macromolécules, les essences ont des viscosités cinématiques faibles avec des valeurs proches de 0,6 cSt à 20°C et 0,1 cSt à -20°C (Cornuault 2008).

Différents auteurs donnent les compositions des essences commerciales : 20 à 50% d'aromatiques, 30 à 40% d'hydrocarbures saturés (avec 5 à 10% de Cyclanes) et 2,5 à 15% d'Alcènes (Meusinger 1996) (Singh et al. 2003) (Burri et al. 2004).

I.2.1.2. Les diesels

Les diesels sont composés d'hydrocarbures plus lourds que ceux constituant les essences. Les macromolécules correspondantes sont un enchainement de 11 à 20 atomes de carbone. La densité des diesels est comprise entre 0,83 et 0,86 kg.L⁻¹ selon (Agarwal & M. Das 2001) (Bajpai & Tyagi 2006) (Wain et al. 2005) et la viscosité cinématique est comprise selon les nuances entre 1,8 et 3,1 cSt à 40°C selon (Agarwal & M. Das 2001) (Serdari et al. 2000) (Tat & Van Gerpen 2000). On notera que les diesels se comportent comme des fluides newtoniens, la contrainte de cisaillement est indépendante du taux de déformation selon (C. Tangsathitkulchai et al. 2004)

Les carburants de type diesel sont composés généralement de 25 à 31% d'aromatiques, de 64 à 70% de paraffines et 2,5 à 5% d'oléfines selon (Tat & Van Gerpen 2000).

I.2.2. Biodiesels issus d'esters méthyliques d'huiles végétales

Nous appellerons par la suite huiles végétales (ou HV) les huiles issues de la biomasse pouvant se substituer aux carburants fossiles classiques comme le soja, le tournesol, le colza, la palme, la coco, l'olive, le lin ou encore le castor... etc. selon (Bajpai & Tyagi 2006) ou des huiles de friture usagées selon (Mittelbach & Gangl 2001).

I.2.2.1. Origine des biodiesels

Les huiles végétales que l'on appelle aussi triglycérides sont des macromolécules possédant

trois groupes qui sont de longues chaînes linéaires hydrocarbonées correspondant aux acides gras. Ces macromolécules sont massives et différents auteurs ont pu les caractériser. Elles possèdent une densité se situant autour de $0,9 - 0,95 \text{ Kg.L}^{-1}$ et une viscosité cinématique comprise entre $2 \text{ et } 4 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ à 40°C selon (Agarwal & M. Das 2001) (Giannelos et al. 2005) (C. Tangsathitkulchai et al. 2004).

Cependant ces HV ne possèdent pas d'utilisations directes même si elles ont substitué le diesel lors d'une pénurie selon (Colucci et al. 2005) et (Ma & Hanna 1999). En effet la forte viscosité, la basse volatilité ainsi que le caractère poly-insaturé des HV obligent celle-ci à être transformées. Cette transformation chimique est appelée la réaction de transestérification que l'on peut aussi appeler alcoololyse ou méthanolyse découverte en 1864 par Rochleder selon (Agarwal et al. 2003a). Cette réaction chimique réversible est schématisée dans la figure 1.10.

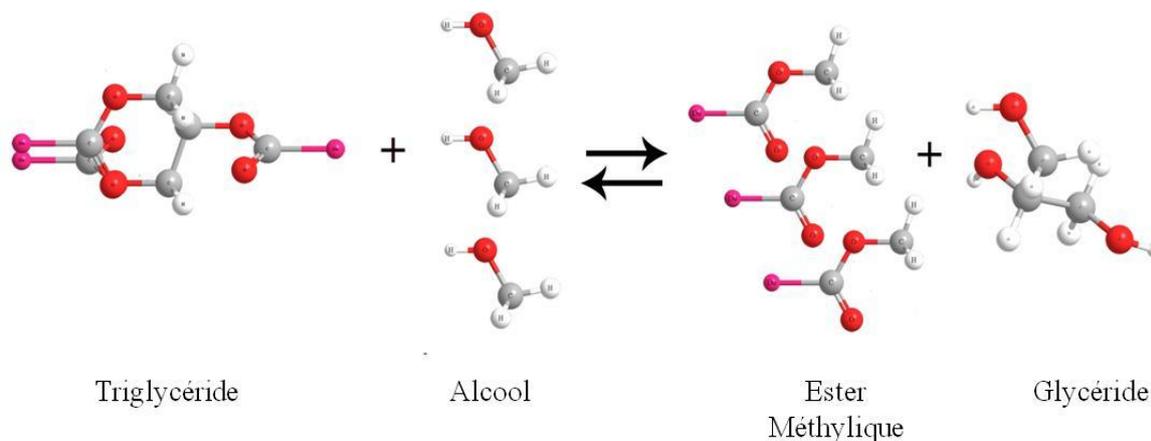


Figure 1.10. Réaction de transestérification d'une huile végétale.

Cette réaction permet la conversion des macromolécules ou triglycérides en molécules plus petites et linéaires que sont les Esters Méthyliques d'Huiles Végétales ou EMHV ou encore la réaction d'un ester sur un alcool pour donner un autre ester. La macromolécule de triglycéride réagit avec un alcool qui est souvent du méthanol, pour des soucis de coût et de masse moléculaire selon (Ma & Hanna 1999), lors d'une catalyse pour donner une molécule de glycéride et l'ester méthylique recherché.

La transformation des huiles ou graisses en esters méthyliques permet de réduire la masse moléculaire à un tiers de celle de l'huile, de réduire la viscosité par huit, de réduire la densité et d'augmenter la volatilité. Les propriétés physiques des EMHV obtenus lors de la réaction de transestérification sont alors proches de celles du diesel.

Selon la littérature, l'ajout de 20% d'EMHV dans du diesel permet la réduction de 25% d'émissions de particules selon (Wain et al. 2005) tandis que les émissions d'oxydes d'azote augmentent selon (Serdari et al. 2000).

A l'heure actuelle les EMHV ne remplacent pas totalement les diesels, expliquant la naissance des biodiesels. Les biodiesels sont un mélange d'EMHV et de diesel traditionnel. Nous appellerons pour la suite de cette étude les biodiesels B_n avec n correspondant au pourcentage massique d'EMHV présents dans le mélange.

Il faut noter la difficulté rencontrée pour le stockage des esters méthyliques d'huiles végétales. En effet Mittelbach met en évidence l'augmentation de la viscosité au cours du temps (Mittelbach & Gangl 2001). L'optimum est de conserver le biodiesel dans un récipient métallique fermé et à l'abri de la lumière afin de diminuer les possibilités de dégradation du mélange du biocarburant.

I.2.2.2. Comparaison de la tribologie des diesels et biodiesels

Différents auteurs ont étudié la tribologie des biodiesels afin de la comparer à celle des diesels connus en regardant plus particulièrement le pouvoir lubrifiant de ces différents fluides.

Agarwal met en évidence une nette différence de comportement à l'usure lors d'essais utilisant un biodiesel B_{20} en comparaison d'un diesel. En effet la quantité de particules d'usure métalliques dans un moteur monocylindre est inférieure de 15 à 30% lors de l'utilisation du biodiesel (Agarwal et al. 2003a) (Agarwal et al. 2003b).

Il constate aussi une diminution du coefficient de frottement et du taux d'usure lorsque le pourcentage d'esters méthyliques d'huiles végétales augmente dans le biocarburant qui est utilisé comme lubrifiant lors d'essais du type pion/plan.

Ces résultats sont corrélés et confirmés par Wain qui teste différents carburants et biocarburants en utilisant le test « quatre billes ». Cette méthode consiste à mesurer le coefficient de frottement lors d'un triple contact ponctuel entre trois billes fixes et une bille supérieure tournante (Wain et al. 2005).

I.3. Matériaux composites carbonés pour application électriques

Différents types de matériaux constituant les balais et les collecteurs sont utilisés pour l'application industrielle des pompes de gavage. Même si des matériaux métalliques ou purement graphitiques ont pu exister, notre étude concerne des matériaux composites à matrice graphitique et liant polymère.

I.3.1. Phase carbonée

I.3.1.1. Graphite naturel macro-cristallin

Le graphite est une espèce minérale qui avec le diamant et les fullerènes possèdent la forme naturelle la plus cristalline (Wissler 2006). Sa structure est composée de feuillets hexagonaux, nommés graphènes ou plans graphitiques, séparés d'environ 0,336 nm agencés selon la disposition dite de "nid d'abeilles" comme le montre la figure 1.11. Dans chaque feuillet, chaque atome de carbone est fortement lié par des liaisons covalentes tandis que des liaisons de Van der Waals lient chaque plan graphitique.

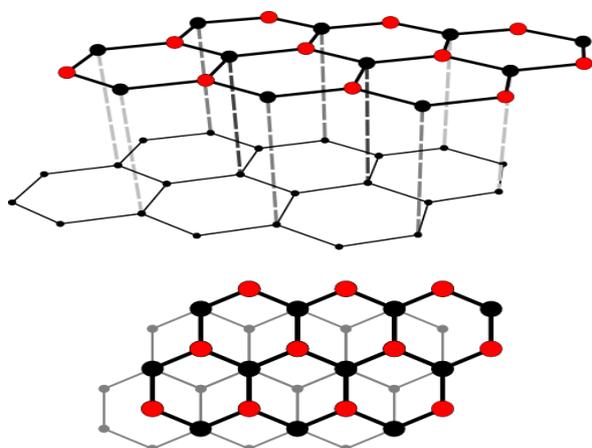


Figure 1.11. Structure du graphite.

Le graphite est un matériau très réfractaire ne connaissant pas le phénomène de fusion et est insoluble dans l'eau. Autour de 2000°C, les graphènes glissent les uns sur les autres en gardant une tenue mécanique jusqu'à sa sublimation qui se situe autour de 3650°C selon (Shobert 1976) (Cornuault 2008).

Le graphite naturel est un élément natif qui se trouve principalement dans les sédiments sous la forme de pétales selon les observations de Ohzeki (Ohzeki et al. 2006). Après extraction, le graphite naturel présente 300 à 5000 µg/g d'impuretés (Zhao, Liang, et al. 2006b) pouvant être des oxydes métalliques, du silicium et du calcium (Cornuault 2008) (Lancaster 1963a) (Primak & Fuchs 1954). Une purification à haute température permet de réduire la teneur de ces impuretés à quelques dizaines de µg/g.

I.3.1.2. Noir de carbone

Le noir de carbone est une forme amorphe et élémentaire du carbone. C'est la forme de carbone élémentaire la plus répandue et utilisée. Il se présente sous forme de minuscules sphères de carbone, et plus souvent sous forme d'agrégats de ces sphères de tailles comprises

entre 5 et 100 nm (Wissler 2006). Il est fabriqué industriellement par combustion incomplète de produits pétroliers lourds tels que le goudron, le goudron de houille...etc. Le noir de carbone est considéré comme l'un des polluants de l'air via les rejets des moteurs. Il est aussi utilisé dans la fabrication des pneus.

Des liaisons fortes existent entre les graphènes, ce qui limite leur expansion thermique et les rend plus durs et rigides que le graphite naturel macro-cristallin (Cornuault 2008) (Clark et al. 1963) (Shobert 1976).

I.3.1.3. Cokes

Les cokes sont obtenues par distillation de la houille (roche carbonée sédimentaire correspondant à une qualité spécifique du charbon) dans un four à l'abri de l'air. Au cours de la cuisson, d'une durée comprise entre 20 et 30 heures en fonction de la qualité recherchée, le mélange de houilles est transformé en coke par élimination des matières volatiles puis par transformation physique (devient une pâte plastique à haute température).

Les particules élémentaires créent des agrégats de différentes tailles et structures. Les structures sphériques, elliptiques, linéaires et ramifiées sont, dans cet ordre, à des degrés d'agrégation et de conductivité électrique croissants mais de densité décroissante.

I.3.1.4. Graphite synthétique ou électrographite

Tous les corps organiques se transforment lors de l'élévation de la température au-delà de 400°C (Cornuault 2008). Il se forme un corps essentiellement composé de carbone qui devient structurellement du graphite si la température dépasse 2000°C (Bernier & Lefrant 1997). On appelle cette transformation une graphitisation. Selon Wissler, les noirs de carbones ne sont pas graphitables du fait de la forte interaction qu'ils possèdent au niveau des plans graphitiques (Wissler 2006). Ces graphites sont composés de cristallites de tailles plus petites et plus fines que celles du graphite naturel. Les propriétés mécaniques, électriques et lubrifiantes sont elles aussi légèrement supérieures même si certains auteurs estiment que l'électrographite présente plus de défauts et peut contenir des particules très dures (Jolovic et al. 2000) (Lancaster 1962c).

I.3.1.5. Graphite expansé

Le graphite expansé est fabriqué en utilisant un traitement thermochimique à partir de graphite (principalement synthétique). Des atomes (souvent du Soufre) sont intercalés entre les graphènes et s'évaporent lors de l'élévation de la température créant ainsi un éclatement de l'empilement des feuillets. La densité du graphite est alors beaucoup plus faible que celle des graphites naturels et synthétiques et donc plus poreux. Le graphite expansé peut ensuite

être compressé. Le matériau ainsi obtenu possède des conductivités thermique et électrique qui suivent une loi puissance positive de la densité.

I.3.2. Phase polymère : liants organiques

Les matériaux constitués majoritairement de graphite naturel n'ont pas une bonne tenue mécanique après compression. En effet ce procédé induit des fissures et du délaminage (Cunningham et al. 2005). Pour limiter cette conséquence, une phase organique est alors ajoutée (7 à 15% de la masse de la pièce). La pièce comprimée peut alors suivre un traitement thermique permettant une graphitisation de la phase organique qui améliore la conductivité du matériau.

L'utilisation de polymères à base phénolique est préférée du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques, thermiques et tribologiques (Jiang et al. 2007) (Schwartz & Bahadur 2001) (Cornuault 2008). Seules les descriptions du polysulfure de phénylène (PPS) et de la résine formophénolique seront décrites compte tenu de leur intérêt pour l'étude.

I.3.2.1. Polysulfure de phénylène : PPS

Le polysulfure de phénylène ou PPS est un thermoplastique cristallin (D'Ilario & Martinelli 2006). Sa structure chimique est symétrique et hautement linéaire. Il présente une résistance exceptionnelle à la chaleur et une excellente tenue aux agents chimiques. Il est insensible à l'humidité, possède une bonne résistance au vieillissement et de bonnes propriétés mécaniques :

- Propriétés mécaniques : le PPS se caractérise par une charge à la rupture élevée, un module de flexion élevé, signe d'une grande rigidité, mais présente une faible résistance aux chocs. Sa dureté en surface se situe autour de 90 HRM (70 à 150°C) et sa résistance en traction est de l'ordre de 65 MPa. Il possède une très bonne résistance au fluage jusqu'à 120°C (Yamamoto & Takashima 2002) (Chen et al. 2004) (Lai & J. Liu 2004).
- Propriétés électriques : le PPS est un excellent isolant électrique et présente de bonnes propriétés de résistance à l'arc électrique. Il peut être rendu conducteur en le dopant avec un oxydant fort (D'Ilario & Martinelli 2006) (Shacklette et al. 1981).
- Propriétés chimiques : la résistance chimique du PPS est excellente et même aux températures élevées mais n'est pas indestructible du fait de sa nature de polymère organique. La durée et la température sont des facteurs déterminants de la résistance chimique (D'Ilario & Martinelli 2006) (Schwartz & Bahadur 2001) (Tanthapanichakoon et al. 2006a).

- Propriétés thermiques : les propriétés thermiques très élevées du PPS lui permettent d'être destiné à des applications fonctionnant à hautes températures. Sa température de transition vitreuse est de l'ordre de 90°C tandis que celle de fusion se situe autour de 280°C. Des tâches grasses peuvent apparaître en surface autour de la température de dégradation qui se situe autour de 360°C (Chen et al. 2004) (Sinmazçelik 2006) (Vovchenko et al. 2003) (Yamamoto & Takashima 2002) (Lai & J. Liu 2004) (Tanthapanichakoon et al. 2006b).

I.3.2.2. Résine formophénolique : PF

La résine formophénolique est une résine thermodurcissable, couramment appelée bakélite (du nom de son créateur "Bakeland" qui l'a synthétisée en premier). Elle est formée lors de la réaction chimique entre le phénol et le formaldéhyde sous pression et température élevées.

- Propriétés mécaniques : elle possède une grande rigidité et un module d'élasticité en flexion compris entre 6 et 10 GPa. Son comportement mécanique est fortement dépendant des interactions avec d'autres constituants et possède une bonne résistance à l'usure (Trotignon et al. 1996) (Jiang et al. 2007) (Schwartz & Bahadur 2001) (Yi & Yan 2007).
- Propriétés électriques : la résine est diélectrique. L'augmentation du pourcentage massique de résine dans un matériau composite entraîne une diminution de la conductivité de ce dernier (Yin et al. 2007).
- Propriétés thermiques et chimiques : la résine formophénolique est propice à la carbonisation. Une température d'environ 350°C entraîne un état semi-carbonisé de la résine et devient totalement carbonisée aux alentours de 1000°C. Cette phase de carbonisation entraîne deux phénomènes chimiques : la réorganisation structurale des atomes de Carbone amorphes et la formation de microcavités pouvant entraîner des fissures dans le matériau. Selon Ko la densité apparente de PF diminue avec l'augmentation de la température jusqu'à 500°C (création de pores), augmente entre 500 et 900°C avant de se stabiliser jusqu'à 2500°C avec l'augmentation de la température (réorganisation structurale).

I.4. Comportement du contact balais-collecteur

Il existe plusieurs types de contact mécaniques tels que le contact sphère-sphère, pion-plan, plan-plan...etc. Chacune de ces configurations utilise un ou plusieurs régimes de lubrification lors du frottement du contact. Ce paragraphe permet de situer notre étude et présente l'état de l'art sur les phénomènes possibles mis en jeu dans un contact mécanique et électromécanique.

I.4.1. Interface entre deux solides

I.4.1.1. Théorie du contact

Lorsqu'une contrainte est appliquée entre deux corps en contact, il en résulte une répartition de ces efforts en fonction de la déformation élastique créée. Hertz décrit ce contact présenté sur la figure 1.12.

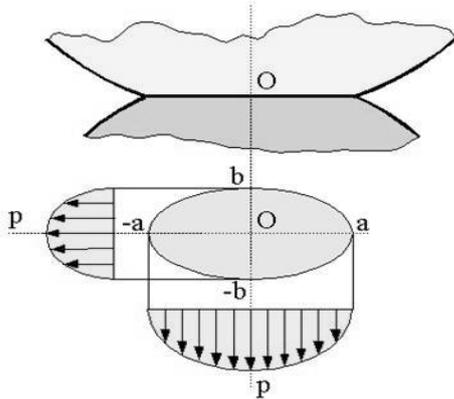


Figure 1.12. Répartition des contraintes de compression dans le plan de contact selon Hertz entre deux sphères

Le contact de Hertz se réfère aux contraintes localisées qui se développent lorsque deux surfaces lisses entrent en contact. La théorie de hertz consiste à reprendre la formulation de Boussinesq et à considérer une répartition elliptique de la pression P sur la surface de contact tel que :

$$P(x, y) = P_{Max} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \quad \text{Equation 1.3}$$

La pression maximum P_{max} est atteinte au centre de l'ellipse de contact de demi axes a et b .

Cependant toute surface réelle, et ce malgré des efforts de polissage conséquents, présente des irrégularités topographiques. Elles peuvent être mesurées à l'aide d'un profilomètre afin d'obtenir un relevé topographique de la surface tel que présenté en figure 1.13.

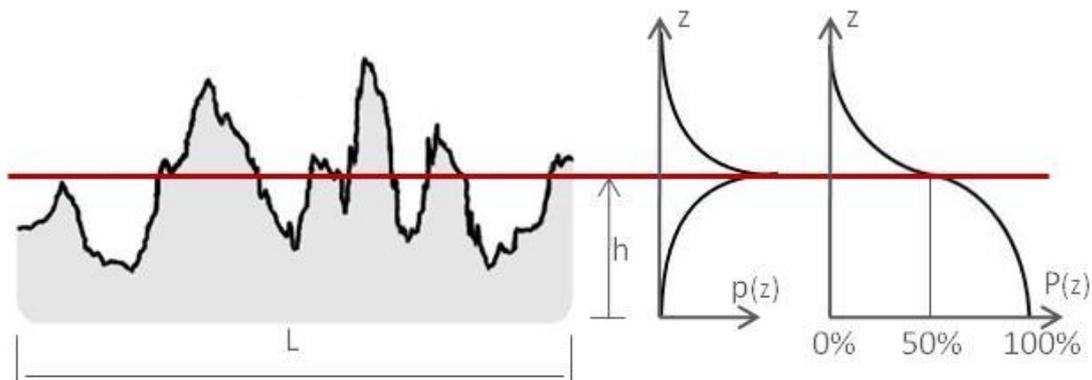


Figure 1.13. Relevé profilométrique unidirectionnel d'une surface selon (Stachowiak & Batchelor 2001) et (Braunović et al. 2007)

- Avec :
- h : ligne moyenne de séparation des hauteurs,
 - z : hauteur perpendiculaire au plan de la surface,
 - $p(z)$: distribution de la densité probable de hauteur,
 - $P(z)$: distribution des hauteurs cumulées.

A partir du relevé profilométrique et de la ligne d'altitudes moyennes du profil, la rugosité moyenne peut alors être définie par le paramètre R_a selon (Stachowiak & Batchelor 2001) :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| \cdot dx \quad \text{Equation 1.4}$$

La rugosité des surfaces limite alors le contact entre deux corps solides à une petite proportion de la surface apparente de contact. En effet le contact réel s'effectue entre les aspérités les plus importantes des surfaces. La nature aléatoire de la rugosité permet d'éviter des assemblages ou maillages des surfaces. L'aire réelle de contact est par conséquent répartie entre de nombreuses micro-aires de contact. Une représentation d'un contact entre deux solides est schématisée dans la figure 1.14.

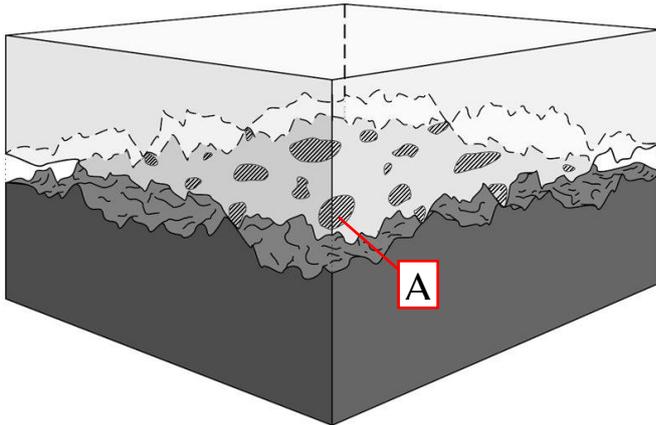


Figure 1.14. Aire de contact réelle entre deux surfaces rugueuses en contact selon (Stachowiak & Batchelor 2001)

A_i représente une partie de l'aire réelle de contact. A_r représente alors l'aire réelle totale dans l'équation suivante avec n le nombre d'aspérités en contact (Czichos 1978) :

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i \quad \text{Equation 1.5}$$

L'aire de contact réelle est le résultat de la déformation de ces points "culminants" des surfaces en contact. Les premières théories étudiant le contact de deux surfaces annonçaient que la surface réelle de contact provenait de la déformation plastique des aspérités (Bowden & Tabor 1954). Cependant il a été découvert plus tard qu'un grand nombre de contacts entre les aspérités sont totalement élastiques (Whitehouse & Archard 1970) (Onions & Archard 1973).

La relation entre l'aire réelle de contact et la charge appliquée est très importante puisqu'elle affecte le comportement de l'interface en termes de frottement et d'usure.

I.4.1.2. Contact électromécanique

Lors d'un contact dans lequel circule un courant électrique, le transfert de ce dernier s'opère inévitablement dans les zones de contact réel mécanique mais pas entièrement à cause de possibles différences de conduction du matériau, de la présence d'un film fluide partiel diélectrique, d'un troisième corps isolant...etc., comme le montre la figure 1.15.

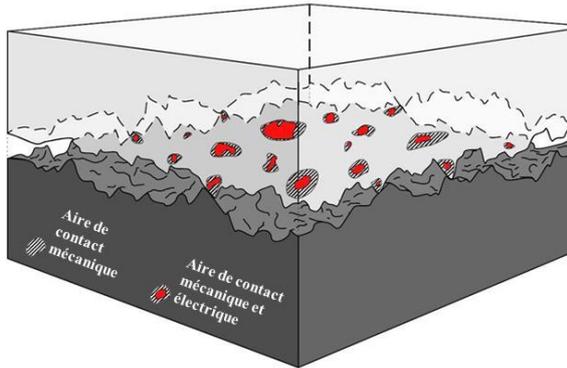


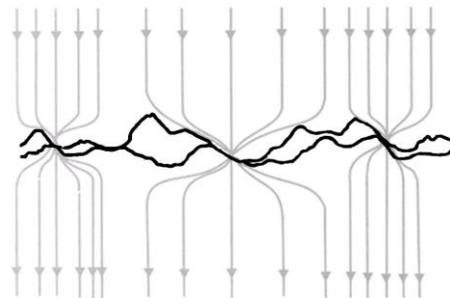
Figure 1.15. Aire de contact réelle mécanique et électrique entre deux surfaces rugueuses en contact selon (Stachowiak & Batchelor 2001)

Dans la zone de contact électrique, la densité de courant est non nulle. Les lignes de courant présentes dans le matériau se resserrent localement pour former une zone dite de constriction avant de rejoindre cet îlot de contact électrique que l'on nomme a-spot (Féchant 1996) (Holm 1967). Cette résistance de constriction est schématisée sur la figure 1.16. Holm la définit dans un cas général pour un unique a-spot comme valant :

$$R_c = \frac{\rho}{2 \cdot a_c} \cdot f(\gamma) \quad \text{Equation 1.6 selon (Holm 1967)}$$

Avec ρ la résistivité du matériau, a_c le rayon équivalent de la surface de l'a-spot, et $f(\gamma)$ une fonction du facteur de forme de cette surface.

Figure 1.16. Schéma du phénomène de constriction multi a-spots.



I.4.1.3. Régime de lubrification

Selon le degré d'interaction entre les aspérités de surface (la rugosité) le contact est plus ou moins sévère. Trois régimes de lubrification peuvent être définis en considérant l'épaisseur du film de fluide ou lubrifiant séparant les surfaces en contact comme schématisé dans la figure 1.17.

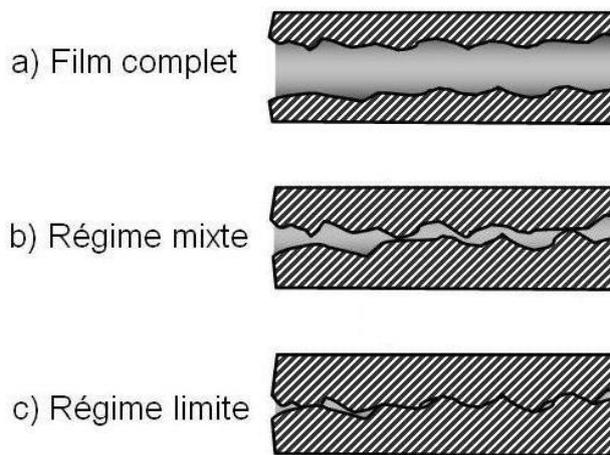


Figure 1.17. Régimes de lubrification selon (Meheux 2009).

Par ordre d'épaisseur de film décroissante, le premier domaine concerne les contacts lubrifiés par un film complet. Le fluide supporte la totalité de la charge à lui tout seul et maintient les surfaces séparées. Ce régime est appelé le régime Hydrodynamique. Les aspérités et défauts d'ondulation et de forme ont des dimensions nettement inférieures à l'épaisseur du film. Lors du cisaillement des deux solides, l'effort est transmis au fluide qui lui se cisaille, ne créant pas d'usure sur les surfaces. Le second régime est appelé régime Mixte. La charge est transmise à la fois par le film lubrifiant et par le contact direct entre les aspérités de surface. Le contact est parsemé dans l'interface et l'usure est moyenne. Le régime est appelé régime Limite lorsque la charge est intégralement transmise par contact direct entre les aspérités. Il s'agit du contact le plus sévère et le plus courant. Il entraîne de façon quasi-systématique l'endommagement des surfaces. Il est de ce fait très étudié par différents auteurs et est cherché à être contrôlé, évité ou diminué. Le fluide potentiellement utilisé ne permet pas d'éviter le contact mais possède un rôle important. Il peut permettre le refroidissement des solides et de l'interface, l'évacuation des débris d'usure. Il peut aussi contenir des additifs qui seront acheminés dans les zones de contact en vue de modifier différents comportements comme le frottement.

I.4.2. Usure du contact balais-collecteur

L'usure du double contact balais-collecteur peut être divisée en deux composantes : l'usure électrique et l'usure mécanique. Cette première correspond à l'usure induite par les modifications structurales et physiques de la surface dues au passage du courant. Les usures mécaniques et électriques ainsi que la combinaison des deux sont dépendantes de différents paramètres comme la pression de contact (cf figure 1.18), la valeur du courant, les nuances des matériaux...etc. Nous observons que l'usure électrique est importante sous une charge appliquée faible et diminue lorsqu'on augmente celle-ci tandis que l'usure mécanique augmente linéairement. L'usure totale prend la forme d'un U mettant en évidence un optimum pour lequel une certaine pression de contact induit une usure totale minimale (Yasar et al. 2007) (Shobert 1976) (Braunović et al. 2007).

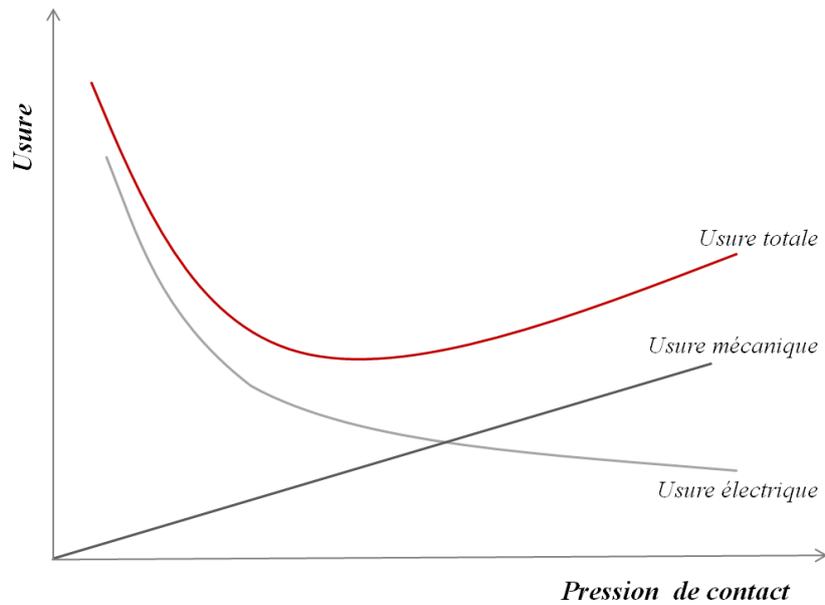


Figure 1.18. Combinaison de l'usure mécanique et électrique en fonction de la pression de contact pour le contact balais-collecteur selon (Braunović et al. 2007)

I.4.2.1. Usure mécanique

Le graphite possède un comportement tribologique comparable à celui d'un lubrifiant solide suscitant l'intérêt de la communauté scientifique depuis près d'un siècle (Jones 2004). L'origine de ce pouvoir lubrifiant est attribuée à son caractère anisotrope. En effet la dépendance de ses propriétés à la direction de sollicitation est observée lors du glissement des graphènes les uns sur les autres. Cependant, des observations ont permis de considérer d'autres mécanismes de frottement et d'usure pour lesquels la nature de l'environnement est importante (Qu et al. 2004).

L'influence de l'environnement est mise en évidence sur la figure 1.19. Elle présente les coefficients de frottement d'un couple graphite-graphite dans différentes conditions telles que le vide, l'air, la vapeur d'eau ou encore des gaz inertes. Le frottement sous vide induit des valeurs élevées de taux d'usure : environ $0,1 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ se traduisant par la présence de débris sous forme de fines particules très actives (Savage & H. Robert 1948), une usure abrasive selon (Zaidi, F. Robert, et al. 1995) et un coefficient de frottement très élevé (compris entre 0,45 et 0,6) (F. Robert, Paulmier, Zaidi, et al. 1995b). Sous atmosphère sèche, les taux d'usure restent importants et l'usure est abrasive même si le coefficient de frottement est inférieur au cas précédent. L'atmosphère constituée de vapeur d'eau a tendance à améliorer le comportement du coefficient de frottement (valeurs comprises entre 0,1 et 0,15) et de l'usure. La présence d'un gaz inerte (Hélium, Argon) modifie totalement le comportement des surfaces en contact, permettant ainsi de diminuer le coefficient de frottement. Les atomes de

gaz vont se glisser entre les plans graphitiques et permettre une mobilité importante entre ces plans dans une direction parallèle à la surface de frottement. Ce phénomène permet la diminution des composantes adhésives du frottement (F. Robert, D. Paulmier, Zaidi, et al. 1995b) même si l'usure reste importante et adhésive (H. Zaidi, F. Robert, et al. 1995). Dans ces conditions, le coefficient de frottement est faible : de l'ordre de 0,35 (Stempflé & von Stebut 2006) et 0,3 selon (H. Zaidi, F. Robert, et al. 1995).

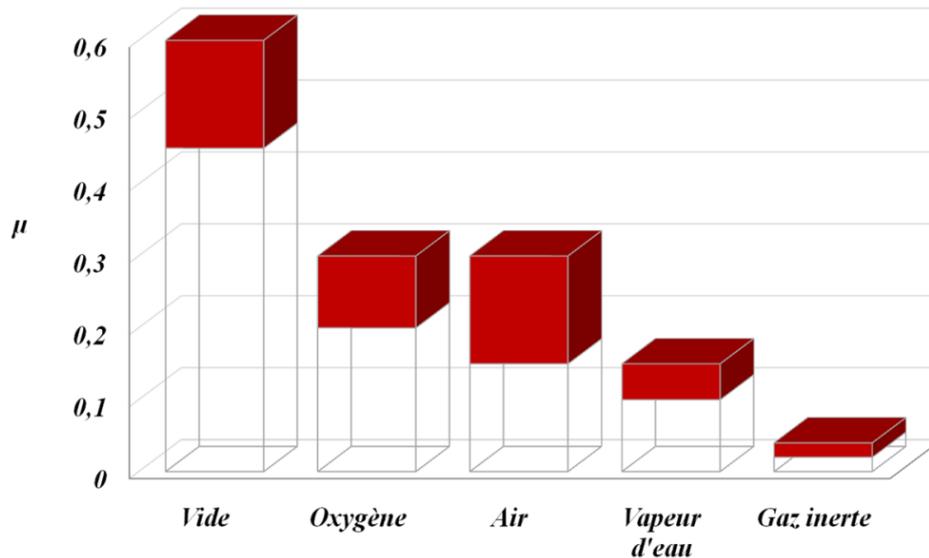


Figure 1.19. Coefficients de frottement obtenus dans différents environnements selon (H. Zaidi, F. Robert, et al. 1995)

Robert annonce l'apparition d'un film en surface du contact à partir d'une pression de contact au-dessus de laquelle l'usure est abrasive. L'augmentation de la pression entraîne celle de la taille des débris d'usure. En-dessous de cette charge critique, des fissures apparaissent en surface et l'usure suit un mécanisme de fatigue entraînant l'arrachement de "pétales" de graphite (F. Robert, D. Paulmier, Zaidi, et al. 1995b).

Cornuault met en évidence un coefficient de frottement de l'ordre de 0,02 pour des essais réalisés avec un contact de type balai-collecteur. Les matériaux étant constitués de Carbone et de polymère PPS (Cornuault 2008).

Zhao met en évidence différents comportements pour un frottement de type pion/disque (figure 1.20). Le pion est composé 97% de Carbone et le disque est en acier. Il met aisément en avant l'influence de la vitesse de glissement ainsi que celle du chargement. Le taux d'usure augmente proportionnellement avec la charge et la vitesse de glissement.

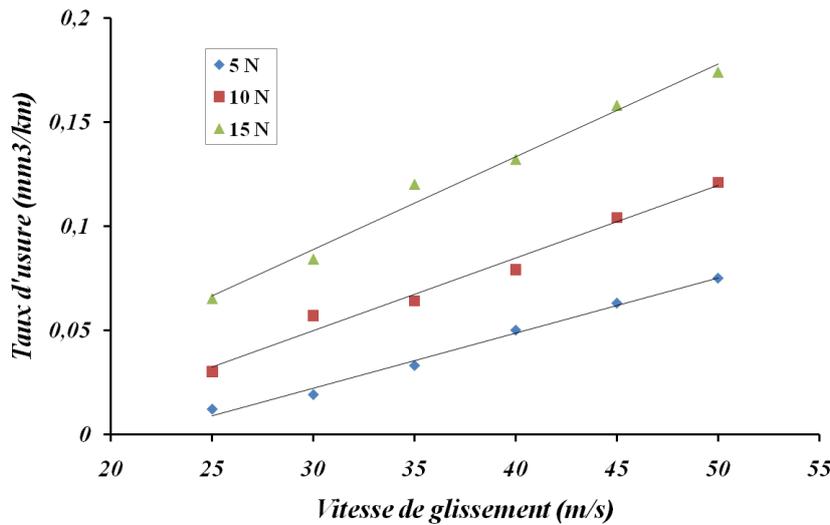


Figure 1.20. Taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement pour différents chargements selon (Zhao et al. 2001)

Cependant les contacts glissants graphite/graphite de type balais - collecteur possèdent un courant traversant l'interface et le comportement tribologique de ces interfaces en est très largement affecté. Globalement le frottement sans passage de courant de matériaux graphitiques conduit à des usures de type abrasives et par fatigue. Selon Holm, le passage d'un courant et son augmentation se traduisent par une augmentation de la rugosité des surfaces en contact entraînant un accroissement de l'abrasion (Holm 1967).

I.4.2.2. Conséquence d'un passage d'un courant dans le contact

I.4.2.2.1. Phénomène d'électro-lubrification

Différents auteurs ont mis en évidence expérimentalement la diminution du coefficient de frottement lors de la présence d'un courant traversant le contact lors du frottement en comparaison du contact non électrifié. Cette particularité sera nommée électro-lubrification par divers auteurs (Lancaster & Stanley 1964) (Paulmier, El Mansori & Zaidi 1997) (Braunović et al. 2007).

Lancaster étudie le frottement d'un pion en graphite synthétique contre des disques de même nature ou métalliques et montre qu'une diminution du coefficient de frottement est d'autant plus importante que l'intensité du courant traversant le contact est grande (Lancaster & Stanley 1964). Si le courant est brusquement coupé lors du frottement, il existe une phase initiale d'inertie pendant laquelle l'évolution du coefficient n'est pas instantanée (figure 1.21). Ce comportement est identique lors de l'apparition du passage du courant (F. Robert, Csapo, Zaidi, et al. 1995a).

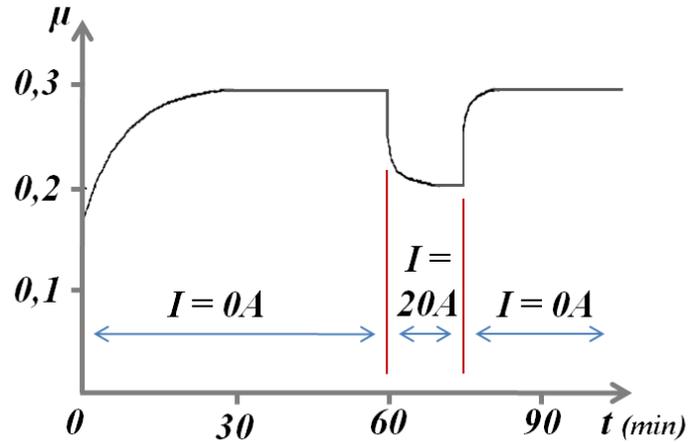


Figure 1.21. Evolution du coefficient de frottement avec et sans courant électrique (Csapo, Zaidi, Paulmier, et al. 1995a)

Divers auteurs montrent cependant que ce régime d'électro-lubrification n'est plus assuré lorsque l'intensité du courant dépasse une valeur critique de courant, diminuant avec l'augmentation de la vitesse de glissement même si une forte dépendance de la nature des matériaux ainsi que de l'environnement du contact est observée (E. Csapo, H. Zaidi, Paulmier, et al. 1995a) (Csapo, Zaidi & Paulmier 1996) (F. Robert, E. Csapo, Zaidi, et al. 1995a) (F. Robert, D. Paulmier, Zaidi, et al. 1995b). (Zhao et al. 2001).

I.4.2.2.2. *Modification structurale de la surface*

La circulation du courant dans le contact frottant modifie négativement ou positivement les phénomènes induits à l'interface. La circulation d'électrons entraîne des modifications des caractéristiques des surfaces de contact. La littérature décrit l'interface comme un ensemble de a-spots dont la taille est indépendante de la charge appliquée (Lancaster & Stanley 1964). Lancaster montre aussi que l'application d'un courant électrique tend simultanément à augmenter le nombre de a-spots et à diminuer leur taille, rendant les surfaces plus rugueuses (E. Csapo, H. Zaidi & Paulmier 1996) (Lancaster & Stanley 1964d) (Holm 1967).

La contrainte électrostatique induite par le passage du courant provoque une hausse de rugosité de la surface, inclinant les plans graphitiques comme le montre la figure 1.22. A l'instant $t=0$, la disposition des graphènes est aléatoire. Ils sont ensuite alignés parallèlement à la surface lors d'un frottement sans courant ou en-dessous du courant critique. Ce phénomène est dû aux efforts de frottement. En-dessus de ce courant, ils s'orientent selon un équilibre entre les efforts de frottement et la contrainte électrostatique favorisant une inclinaison verticale.

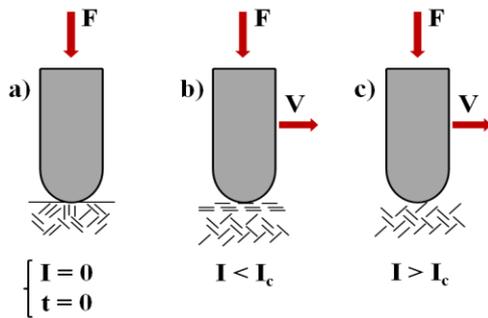


Figure 1.22. Orientation des graphènes dans un contact glissant électrifié : a) sans courant et à l'instant $t=0$, b) passage d'un courant inférieur au courant critique, c) passage d'un courant supérieur au courant critique ; selon (Senouci et al. 1999).

Compte tenu des propriétés anisotropiques du graphite, la pression de Hertz est presque trois fois supérieure si elle est appliquée perpendiculairement aux graphènes plutôt que parallèlement selon (Senouci et al. 1999). Les efforts de frottement augmentent et conduisent à un effritement des graphènes selon (Zhao et al. 2001).

I.4.2.2.3. *Effet de la polarité*

Les différents avis contradictoires des auteurs présents dans la littérature mettent en avant la difficulté de déterminer un effet de polarité sur les deux balais. Des différences notables ont été observées lors du frottement graphite/métal (Braunović et al. 2007) mais toutes aussi contradictoires (Betz 1974). Pour les contacts carbonés, aucun effet de polarité n'est observé en deçà du courant critique (Lancaster & Stanley 1964d). Au dessus de celui-ci, la littérature indique une usure supérieure du balai positif même si Shobert ne distingue aucune différence concernant la circulation du courant pour le frottement des électrographites.

I.4.2.2.4. *Différences des perturbations électriques au contact.*

De nombreux auteurs ont mis en évidence des perturbations électriques dans le contact frottant électrifié balais-collecteur se manifestant généralement par des décharges lumineuses visibles à l'œil nu (M. D. Bryant et al. 1995) (Holm 1967) (Lancaster 1963b) (Lawson & Dow 1985) (Shobert 1965). Il existe le phénomène de commutation qui reste très localisé sur la piste de frottement des balais avec le collecteur. Nous nous intéresserons par la suite seulement aux perturbations électriques pouvant avoir lieu lors du frottement sur l'ensemble des surfaces de contact, et à tout instant.

Ces perturbations, à cause de leurs natures diverses et variées possèdent différents noms dans la littérature : arc, sparks, flash, streamer, surtension, spike... nous considérerons par la suite que la décharge est un arc si elle a pour origine un déplacement relatif du balai par rapport au disque et nous nommerons spark une décharge dont le décollement des surfaces est issu de l'endommagement des aspérités. Les arcs se caractérisent généralement par des tensions supérieures et des durées plus courtes que les sparks qui sont eux, plus fréquents selon (Holm 1967).

La littérature est cependant unanime quant à l'augmentation de l'usure des surfaces lors de

l'apparition de ces phénomènes électriques même si l'usure due aux sparks peut être jusqu'à cinq fois supérieure à celle due aux arcs (Hamilton 2000) (Holm 1967) (Shobert 1965).

I.4.2.3. Modèles d'usure

Les modèles présentés ultérieurement sont basés sur le frottement de disques en cuivre compte tenu de l'emploi historique de ce matériau pour les collecteurs.

I.4.2.3.1. *Modèle d'usure en présence de sparks : modèle de Lawson*

Les travaux expérimentaux de Lawson permettent l'élaboration d'un modèle d'usure d'un balai électrographite en présence de sparks. Il évalue la perte de volume du balai anodique en utilisant une version modifiée de la loi d'Archard suite au constat de l'apparition de sparks à partir d'une vitesse V critique à pression et intensité I constantes :

$$W = K_w \cdot F_n \cdot d \quad \text{Equation 1.7. (Lawson \& Dow 1985)}$$

Avec : - K_w = coefficient d'Archard s'exprimant en $\text{mm}^2 \cdot \text{N}^{-1}$
- d = la distance de glissement
- F_n = effort normal.

Lawson définit K_w par la relation suivante, s'accordant avec ses mesures :

$$K_w = K_0 \cdot \exp \left(C \cdot V \cdot \Delta U \cdot I \cdot \left(\frac{\rho}{\lambda} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot F_n^{-1} \right) \quad \text{Equation 1.8}$$

Avec : - K_0 = coefficient d'usure sans passage de courant
- C = constante
- V = vitesse de glissement
- ΔU = tension aux bornes du contact
- ρ = résistivité du matériau
- λ = conductivité thermique du matériau

Il existe dans ce modèle une forte implication des termes qui tendent à accroître l'effet Joule et à délimiter les échauffements au niveau du contact. Lawson propose un mécanisme d'usure thermique se divisant en plusieurs étapes successives : le contact a tout d'abord lieu sur quelques spots isolés qui sont échauffés par effet Joule dans la constriction, augmentant alors leur température locale et leur dilatation thermique. Ensuite la dilatation locale tend à diminuer largement le nombre de spots jusqu'à l'obtention d'un spot unique supportant alors à lui seul les charges électriques et mécaniques, ce qui augmente d'avantage la température locale. Lorsque la température dépasse une valeur critique (estimée à 2000°C selon Lawson),

le spot est incandescent et donne lieu, lorsqu'il est arraché de la surface par le disque, à une traînée lumineuse s'accompagnant d'une variation brusque de la tension.

I.4.2.3.2. *Modèle de l'éjection de particules : modèle de Bryant*

Se basant sur les hypothèses et observations expérimentales proposées par Lawson, Bryant énonce un mécanisme d'usure expliquant l'apparition et la disparition des a-spots.

En frottant un balai carboné sur un disque transparent recouvert d'une fine couche de 250 µm de cuivre, Bryant utilise le principe de photoélasticité lui permettant d'observer l'évolution et la répartition des aspérités en contact.

Les observations expérimentales lui permettent de conclure que l'endommagement des spots provient de la forte contrainte thermomécanique et qu'un nouveau spot apparaît à proximité du précédent (M. D. Bryant 1991). Cette observation est vérifiée expérimentalement par Liu (H. P. Liu et al. 1992). En créant un modèle numérique cohérent, Bryant montre que l'endommagement est dû à une fracture verticale démarrante sur le bord d'attaque des aspérités puis se propage ensuite en sous-couches parallèlement à la surface du spot. En arrivant à la profondeur où règne un gradient de température maximal, le spot est éjecté sous la forme d'une particule (M. D. Bryant 1991). Un nouveau spot est alors créé à proximité du précédent (M. D. Bryant et al. 1995).

I.4.2.3.3. *Usure en présence d'arcs électriques*

Dans le cas d'un arc électrique d'un balai carboné frottant contre un disque en cuivre, les endommagements observés dépendent de l'altitude relative prise par le balai lorsqu'il quitte la surface du disque (Holm 1967), ce qui induit soit l'usure de l'anode lors de faibles distances, soit de la cathode lors de distances plus grandes.

La prédiction des endommagements générés par des arcs électriques reste très complexe. Elle dépend d'un grand nombre de paramètres tels que les matériaux, l'environnement, le courant et la tension aux bornes du contact...etc. On constate que la présence des arcs augmente considérablement le taux d'usure des balais mais cette augmentation décroît avec la charge appliquée.

I.5. Conclusion : cadre scientifique de l'étude

Ce chapitre a permis de situer la problématique de cette thèse en mettant en avant le tribosystème particulier observé au niveau du contact balai – collecteur de la pompe de gavage pour automobile. Ce système est très complexe du fait du grand nombre de paramètres le caractérisant tels que les matériaux en contact, les efforts mis en jeu, les caractéristiques électriques, l'environnement, la dynamique de l'interface... etc.

Les phénomènes d'usure mis en jeu dans le contact balais-collecteur peuvent être divisés en deux parties : le phénomène de commutation (lors du changement de segment du collecteur) et l'usure du contact hors de la zone de commutation (un contact glissant électrifié sur un segment). La première cause d'usure a été étudiée par Sawa et al. Nous étudierons plus particulièrement la deuxième cause d'usure pour laquelle il existe peu de modèles descriptifs.

Notre étude concerne l'étude du comportement tribologique du contact entre balais et collecteurs (disques non segmentés) lors d'un contact glissant électrifié à très haute vitesse et pression de contact et dans un environnement extrême (carburant). Ces paramètres sont synthétisés dans la figure 1.23.

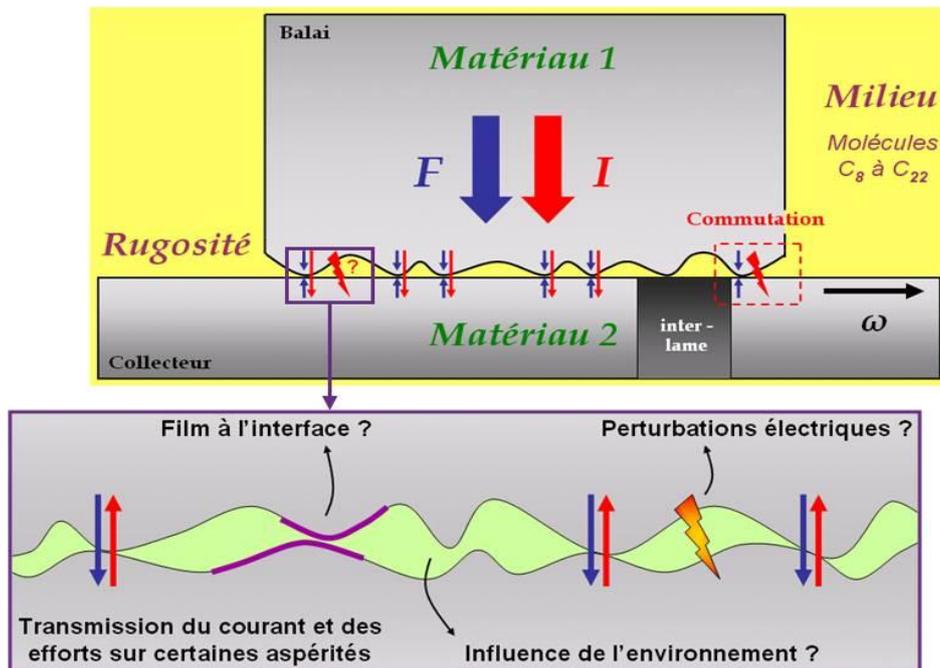


Figure 1.23. Définition du tribocontact étudié et des phénomènes mis en jeu lors du frottement balais-collecteur.

I.6. Bibliographie

Abati, P., 2002. Cours d'électrotechnique - académie Aix-Marseille. Available at: <http://stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/cirmag.htm>.

Agarwal, A.K., Bijwe, J. & M. Das, L., 2003b. Effect of Biodiesel Utilization of Wear of Vital Parts in Compression Ignition Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 125(2), p.604-611.

Agarwal, A.K., Bijwe, J. & M. Das, L., 2003a. Wear Assessment in a Biodiesel Fueled Compression Ignition Engine. Dans *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*. International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. New Orleans, LA (USA): ASME, p. 820-826. Available at: <http://link.aip.org/link/?GTP/125/820/1>.

Agarwal, A.K. & M. Das, L., 2001. Biodiesel Development and Characterization for Use as a Fuel in Compression Ignition Engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123(2), p.440-447.

Bajpai, D. & Tyagi, V.K., 2006. Biodiesel source, production, composition, properties and its benefits. *Journal of Oleo Science*, 55(10), p.487-502.

Bernier, P. & Lefrant, S., 1997. *Le carbone dans tous ses états* Gordon and Breach Ed., Amsterdam.

Betz, D., 1974. Relationship Between Contact Resistance and Wear in Sliding Contacts. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, 10(1), p.32 - 37.

Bowden, F.P. & Tabor, D., 1954. *The friction and lubrication of solids* Clarendon press., Oxford.

Braunović, M., Konchits, V.V. & Myshkin, N.K., 2007. *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology*, CRC Press ed.

Bryant, M. D., 1991. A particle ejection mechanism for brushwear. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, 14(1), p.71-78.

Bryant, M. D., Wang, J.-P. & Lin, J.-W., 1995. Thermal mounding in high speed dry sliders: experiment, theory and comparison. *Wear*, 181-183(Part 2), p.668-677.

Burri, J. et al., 2004. Gasoline composition determined by ¹H NMR spectroscopy. *Fuel*, 83(2), p.187-193.

Chen, Z. et al., 2004. Mechanical and tribological properties of PA/PPS blends. *Wear*, 257(7-8), p.696-707.

Clark, W.T., Connolly, A. & Hirst, W., 1963. The friction and wear of electrographite. *British Journal of Applied Physics*, p.pp. 20-27.

Colucci, J., Borrero, E. & Alape, F., 2005. Biodiesel from an alkaline transesterification reaction of soybean oil using ultrasonic mixing. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 82(7), p.525-530.

Cornuault, P.-H., 2008. *Contribution à l'étude du comportement tribologique de matériaux carbonés pour applications électriques*. thèse. Ecully: Ecole Centrale de Lyon. N° ordre 2008/17.

Csapo, E., Zaidi, H. & Paulmier, D., 1996. Friction behaviour of a graphite-graphite dynamic electric contact in the presence of argon. *Wear*, 192(1-2), p.151-156.

Csapo, E., Zaidi, H., Paulmier, D., et al., 1995a. Influence of the electrical current on the graphite surface in an electrical sliding contact. *Surface and Coatings Technology*, 76-77(Part 2), p.421-424.

Cunningham, N. et al., 2005. Structural and mechanical characterization of as-compacted powder mixtures of graphite and phenolic resin. *Carbon*, 43(15), p.3054-3066.

Czichos, H., 1978. *A system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear* Elsevier., Amsteram.

D'Ilario, L. & Martinelli, A., 2006. Glass transition and the origin of poly(p-phenylene sulfide) secondary crystallization. *The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics*, 19(1), p.37-45.

Desesquelles, P.F., 1995. About the commutation in DC motors. , p.825 - 834.

Desplanques, G. & Manouvrier, J.-P., 2001. <http://actgv.fr/technique/mot-syn/p-syn.htm>,

Di Gerlando, A. & Perini, R., 2006. Model of the commutation phenomena in a universal motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(1), p.27 - 33.

Edgar, J., 2005. AutoSpeed - Modifying Returnless Fuel Systems, Part 1. Available at: http://www.autospeed.com/cms/A_2636/article.html [Consulté avril 18, 2011].

Féchant, L., 1996. *Le Contact électrique: Phénomènes physiques et matériaux* Hermès., Paris.

Giannelos, P.N. et al., 2005. Physical, chemical and fuel related properties of tomato seed oil for evaluating its direct use in diesel engines. *Industrial Crops and Products*, 22(3), p.193-199.

Goyet, R. & Benalla, H., 1994. Commutation assistée, des machines à courant continu. *Journal de Physique III*, 4, p.2583 - 2592.

Guibet, J.C., 1997. *Carburants et moteurs* Technip., Paris.

Hamilton, R.J., 2000. DC motor brush life. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(6), p.1682 - 1687.

Holm, R., 1967. *Electric contacts - Theory and application* Springer-Verlag., Berlin.

Hsu, J.S., 1998. Soft commutated direct current motor. *IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation*.

Ihaddadene, A. & Quichaud, G., 1995. Improvement of the Terminal Characteristics of a Slightly Modified dc Machine with an Electronically Assisted Commutaion. *Journal de*

Physique III, 5, p.59 - 76.

Jiang, H. et al., 2007. Study on the microstructure evolution of phenol-formaldehyde resin modified by ceramic additive. *Frontiers of Materials Science in China*, 1(1), p.35-39.

Jolovic, L., Petronijevic, D. & Ivkovic, N., 2000. Optimization of the manufacturing process of graphite-based composite. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 39(5), p.317-321.

Jones, G.A., 2004. On the tribological behaviour of mechanical seal face materials in dry line contact: Part II. Bulk ceramics, diamond and diamond-like carbon films. *Wear*, 256(3-4), p.433-455.

Kostenko, M. & Piotrovski, L., 1969. *Machines Electriques* MIR., Moscou.

Lai, M. & Liu, J., 2004. Thermal and dynamic mechanical properties of PES/PPS blends. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 77(3), p.935 - 945.

Lancaster, J.K., 1963a. the relationship between the wear of carbon brush materials and their elastic moduli. *British Journal of Applied Physics*, 14, p.pp. 497-505.

Lancaster, J.K., 1963b. The influence of arcing on the wear of carbon brushes on copper. *Wear*, 6(5), p.341-352.

Lancaster, J.K., 1962c. The influence of the conditions of sliding on the wear of electrographitic brushes. *British Journal of Applied Physics*, 13(9), p.468 - 477.

Lancaster, J.K. & Stanley, I.W., 1964d. The effect of current on the friction of carbon brush materials. *British Journal of Applied Physics*, 15(1), p.29 - 43.

Lawson, D.K. & Dow, T.A., 1985. The sparking and wear of high current density electrical brushes. *Wear*, 102(1-2), p.105-125.

Liu, H.P., Carnes, R.W. & Gully, J.H., 1992. Measurement and prediction of brush interface temperature at sliding electrical contact. *Proceeding of the Thirty-Eight IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*.

Ma, F. & Hanna, M.A., 1999. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70(1), p.1-15.

Meheux, M., 2009. *Influence des additifs de lubrification sur la formation de tribofilms, le coefficient de frottement et la durée de vie en fatigue des roulements*. thèse. Ecully: Ecole Centrale de Lyon. N° ordre 2009/01.

Meusinger, R., 1996. Gasoline analysis by ¹H nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Fuel*, 75(10), p.1235-1243.

Mittelbach, M. & Gangl, S., 2001. Long storage stability of biodiesel made from rapeseed and used frying oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 78(6), p.573-577.

Nagakura, K. & Sawa, K., 1997. Wear of carbon brushes under commutation arcs in gasoline. Dans *Proceeding of the Forty-Third IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Philadelphia, p. 264 - 271.

- Ohzeki, K. et al., 2006. Characterization of packing structure of tape cast with non-spherical natural graphite particles. *Carbon*, 44(3), p.578-586.
- Onions, R.A. & Archard, J.F., 1973. The contact of surfaces having a random structure. *Journal of Physics - part D : Applied Physics*, 6(3), p.289 - 304.
- Paulmier, D., El Mansori, M. & Zaïdi, H., 1997. Study of magnetized or electrical sliding contact of a steel XC48/graphite couple. *Wear*, 203-204, p.148-154.
- Peuro, E. et al., 1993. Optimisation d'un amortisseur d'une machine à courant continu: amélioration de la commutation. *Journal de Physique III*, 3, p.961 - 972.
- Primak, W. & Fuchs, L.H., 1954. Electrical Conductivities of Natural Graphite Crystals. *Physical review*, 95(1), p.22 - 31.
- Qu, J. et al., 2004. Sliding Friction and Wear Characteristics of Novel Graphitic Foam Materials. *Tribology Letters*, 17(4), p.879-886.
- Quichaud, G. et al., 1993. A new dc machine arrangement for an electronically assisted commutation. *Journal de Physique III*, 3, p.2065 - 2070.
- Robert, F., Csapo, E., Zaidi, H., et al., 1995a. Influence of the current and environment on the superficial structure of a graphite electrical collector. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(2), p.259-262.
- Robert, F., Paulmier, D., Zaidi, H., et al., 1995b. Combined influence of an inert gas environment and a mechanical action on a graphite surface. *Wear*, 181-183(Part 2), p.687-690.
- Savage, R.H. & Robert, H., 1948. Graphite Lubrication. *Journal of Applied Physics*, 19(1), p.1 - 10.
- Sawa, K. & Shimoda, N., 1992. A study of commutation arcs of DC motors for automotive fuel pumps. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 15(2), p.193 - 197.
- Schwartz, C.J. & Bahadur, S., 2001. The role of filler deformability, filler-polymer bonding, and counterface material on the tribological behavior of polyphenylene sulfide (PPS). *Wear*, 251(1-12), p.1532-1540.
- Senouci, A., Frene, J. & Zaidi, H., 1999. Wear mechanism in graphite-copper electrical sliding contact. *Wear*, 225-229(Part 2), p.949-953.
- Serdari, A. et al., 2000. Impact of Using Biodiesels of Different Origin and Additives on the Performance of a Stationary Diesel Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 122(4), p.624-631.
- Shacklette, L.W. et al., 1981. Conducting complexes of polyphenylene sulfides. *Journal of Chemical Physics*, 75(4), p.1919 - 1927.
- Shigemori, T. & Sawa, K., 2004. Characteristics of carbon and copper flat commutator on DC motor for automotive fuel pump. Dans *Proceedings of the Fiftieth IEEE Holm Conference on*

Electrical Contacts. p. 523 - 527.

Shobert, E.I., 1965. *Carbon brushes - The physics and chemistry of sliding contacts*, New-York: Chemical publishing company.

Shobert, E.I., 1976. Carbon, graphite, and contacts. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, 12(1), p.62 - 74.

Singh, A.P. et al., 2003. Determination of benzene and total aromatics in commercial gasolines using packed column GC and NMR techniques. *Fuel*, 82(1), p.23-33.

Sinmazçelik, T., 2006. Natural weathering effects on the mechanical and surface properties of polyphenylene sulphide (PPS) composites. *Materials & Design*, 27(4), p.270-277.

Stachowiak, G.W. & Batchelor, A.W., 2001. *Engineering Tribology* second edition., Butterworth - Heinemann.

Stempflé, P. & von Stebut, J., 2006. Nano-mechanical behaviour of the 3rd body generated in dry friction--Feedback effect of the 3rd body and influence of the surrounding environment on the tribology of graphite. *Wear*, 260(6), p.601-614.

Takaoka, M. & Sawa, K., 2001. An influence of commutation arc in gasoline on brush wear and commutator. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, 24(3), p.349 - 352.

Tangsathitkulchai, C., Sittichaitaweekul, Y. & Tangsathitkulchai, M., 2004. Temperature effect on the viscosities of palm oil and coconut oil blended with diesel oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 81(4), p.401-405.

Tanthapanichakoon, W. et al., 2006a. Degradation of semi-crystalline PPS bag-filter materials by NO and O₂ at high temperature. *Polymer Degradation and Stability*, 91(8), p.1637-1644.

Tanthapanichakoon, W. et al., 2006b. Mechanical degradation of filter polymer materials: Polyphenylene sulfide. *Polymer Degradation and Stability*, 91(11), p.2614-2621.

Tat, M. & Van Gerpen, J., 2000. The specific gravity of biodiesel and its blends with diesel fuel. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(2), p.115-119.

Trotignon, J.P. et al., 1996. *Précis de matières plastiques* Nathan Ed., Paris.

Vovchenko, L. et al., 2003. Influence of graphite type on electrical and thermal properties of composite materials graphite-organic compound. *Composites Science and Technology*, 63(6), p.807-812.

Wain, K.S. et al., 2005. Alternative and low sulfur fuel options: boundary lubrication performance and potential problems. *Tribology International*, 38(3), p.313-319.

Wang, R.H. & Walter, R.T., 2000. Modeling of universal motor performance and brush commutation using finite element computed inductance and resistance matrices. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 15(3), p.257 - 262.

Whitehouse, D.J. & Archard, J.F., 1970. The Properties of Random Surfaces of Significance

in their Contact. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 316(1524), p.97 -121.

Wissler, M., 2006. Graphite and carbon powders for electrochemical applications. *Journal of Power Sources*, 156(2), p.142-150.

Yamamoto, Y. & Takashima, T., 2002. Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts. *Wear*, 253(7-8), p.820-826.

Yasar, I., Canakci, A. & Arslan, F., 2007. The effect of brush spring pressure on the wear behaviour of copper-graphite brushes with electrical current. *Tribology International*, 40(9), p.1381-1386.

Yi, G. & Yan, F., 2007. Mechanical and tribological properties of phenolic resin-based friction composites filled with several inorganic fillers. *Wear*, 262(1-2), p.121-129.

Yin, Q. et al., 2007. Study on the electrical and mechanical properties of phenol formaldehyde resin/graphite composite for bipolar plate. *Journal of Power Sources*, 165(2), p.717-721.

Zaidi, H., Robert, F. & Paulmier, D., 1995. Influence of adsorbed gases on the surface energy of graphite: consequences on the friction behaviour. *Thin Solid Films*, 264(1), p.46-51.

Zhao, H., Barber, G.C. & Liu, J., 2001. Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current. *Wear*, 249(5-6), p.409-414.

Zhao, H. et al., 2006. Research on graphite powders used for HTM-PM fuel elements. *Rare Metals*, 25, p.347 - 350.

Chapitre II.

Caractérisation des matériaux et carburants

Ce chapitre a pour but de présenter les différents matériaux et biocarburants utilisés au sein de cette étude. Après une présentation des carburants, nous nous attarderons d'avantage sur les matériaux : les différents modes de fabrication, leurs propriétés structurales, mécaniques et électriques.

Sommaire

CHAPITRE II.	41
CARACTERISATION DES MATERIAUX ET CARBURANTS.....	41
II.1. CARBURANTS ETUDIES	42
II.2. MATERIAUX CARBONES.....	42
II.2.1. <i>Mise en forme des échantillons</i>	42
II.2.2. <i>Caractérisation structurale des matériaux d'étude</i>	46
II.2.3. <i>Caractérisation mécanique des matériaux de l'étude</i>	54
II.2.4. <i>Résistivité des matériaux</i>	62
II.3. CONCLUSION	64
II.4. BIBLIOGRAPHIE	66

II.1. Carburants étudiés

Trois carburants différents ont été utilisés pendant les différentes expérimentations : un diesel non-additivé appelé B0, et deux biodiesels non commercialisés composés de B0 mélangé avec 10% et 30% (en masse) d'EMHV de colza et de tournesol appelés respectivement B10 et B30.

(Cornuault 2008) a mesuré les densités, les viscosités dynamiques et les viscosités cinématiques à 20°C à l'aide d'un rhéomètre et trouve des valeurs similaires pour chaque fluide, respectivement autour de 0,83 g.cm⁻³, autour de 3,7 Pa.s et proche de 4,2 CSt. Ces valeurs sont en accord avec les valeurs données par (Agarwal & M. Das 2001), (Yuan et al. 2005) et (Wain et al. 2005). Les viscosités sont 3 à 4 fois supérieures à celles de l'eau (Mazuyer 2007).

En plus de posséder un côté écologique par la diminution de l'émission de particules et de CO₂, l'utilisation des carburants de type biodiesel EMHV permet d'augmenter le pouvoir lubrifiant au sein du moteur (Appert et al. 2004).

II.2. Matériaux carbonés

Le comportement tribologique général et l'usure du contact balai/collecteur sont très influencés par la nature des matériaux de ce dernier. Notre étude a concerné différentes nuances de matériaux. Cette partie va présenter ces différences d'un point de vue structural, mécanique et électrique après les processus de fabrication.

II.2.1. Mise en forme des échantillons

II.2.1.1. Types de nuances étudiées

Trois nuances de matériaux carbonés (tableau 2.1 ci-dessous) sont utilisées par le fabricant de pompe à carburant pour subvenir aux différents besoins qu'implique le fonctionnement de la pompe, plus particulièrement en fonction du carburant utilisé. Les matériaux carbonés sont préconisés pour les pompes de moteurs diesels.

<i>P</i>	<i>Graphite naturel, électrographite, polysulfure de phénylène (PPS)</i>
<i>B</i>	<i>Graphite naturel, phénol formaldéhyde (PF) avec traitement thermique en fin de process à 900°C (cf 'mise en œuvre')</i>
<i>E</i>	<i>Electrographite</i>

Tableau 2.1. Nomenclature et composition des matériaux carbonés étudiés (% massiques)

II.2.1.2. Mise en œuvre

En plus du fait de connaître la composition des matériaux donnée ci-dessus, il est nécessaire de connaître le processus de mise en œuvre des nuances car ce dernier va influencer sur les propriétés structurales et mécaniques de nos matériaux d'étude. Il convient de distinguer deux processus d'élaboration comme suit :

- Le matériau E (filière chaude)
- Les matériaux polymères B et P (filière froide).

NB : les pourcentages donnés ci-après sont massiques.

II.2.1.2.1. *Filière chaude : l'électrographite*

Le semi-produit de l'électrographite est un mélange particulière composé de 40% de brai de houille et de 60% d'une préparation carbonée (elle-même composée de 38,6% de coke, 19,4% de graphite naturel et 2% de soufre).

Le brai de houille se présente sous la forme de globules solides qui vont être malaxés pendant 165 mn en présence d'acide oléique à une température de 190°C. Il est ensuite refroidi pendant 15 mn jusqu'à température ambiante.

La préparation carbonée est composée de fines particules de coke (dont 50% ont un diamètre compris entre 4,5 μm et 7 μm), de pétales de graphite naturel (dont 90% ont une longueur inférieure à 20 μm) et du soufre sous forme de fleurs. Elle est malaxée pendant 1 h puis est maturée pendant 4h à la température de 160°C.

Le brai de houille et la préparation carbonée sont ensuite mélangés puis malaxés. Un mélange sec est obtenu. Ce mélange contient des particules de tailles hétérogènes qui sont la conséquence d'agglutinement des divers constituants. Il est ensuite tamisé pour qu'environ 90% des particules possèdent une taille inférieure à 70 μm .

Le semi-produit ainsi obtenu est disposé entre deux tapis de coke dans un four à sole mobile de type Riedhammer pour suivre un lent processus de carbonisation pendant trois semaines au cours duquel la température est augmentée de 2 K.h⁻¹ pour atteindre 1000°C. Après un refroidissement rapide jusqu'à température ambiante, les plaques ainsi obtenues sont chauffées dans un four à induction puis maintenues à 2600°C pendant 3 semaines, ce qui correspond à la phase de graphitisation.

Le matériau obtenu se présente sous forme de plaques directement usinables.

II.2.1.2.2. *Filière froide : composite graphite/liant polymère*

Ce paragraphe correspond aux matériaux P et B. Leur mise en œuvre est rapide et ne nécessite pas le procédé de graphitisation. La phase polymère sert à lier mécaniquement les particules de graphite.

La phase polymère du matériau P est le polysulfure de phénylène (PPS) qui est un thermoplastique se trouvant sous forme de poudre dans ce cas.

La poudre de PPS et les particules du matériau E issues du processus décrit précédemment sont broyées pendant 15 mn. Des particules de graphite naturel sont alors ajoutées au mélange précédent puis l'ensemble est mélangé sans broyage pendant 30 mn. Le semi-produit est obtenu par compaction sous forme de pastilles de diamètre égal à 5 cm et d'une hauteur de 3 cm. Ce procédé se déroule à température ambiante et sous une charge de 320 MPa.

Ce semi-produit est alors broyé en particules de grandes tailles puis tamisé pour ne garder que les particules dont la taille est comprise entre 100 et 400 μm .

Des disques et balais sont alors formés par compaction de ces particules à 380 MPa puis ils vont suivre un traitement thermique à 325°C pendant 45 mn sous une atmosphère contrôlée contenant du N_2 dans un four à défilement.

La phase polymère du matériau B est une résine formophénolique (appelée PF pour phénol formaldéhyde). Le PF est un thermodurcissable présent dans notre cas sous forme d'un liquide visqueux (28% de résine phénolique dissoute dans 72% de méthylacétate).

Ce mélange résine-solvant est malaxé avec des pétales de graphite naturel pendant 2h à 80°C.

Le produit d'aspect pâteux devient alors un produit semi-fini biphasique sec et pulvérulent. Il est ensuite comprimé à température ambiante, sous une charge de 250 MPa pour ensuite suivre un traitement thermique pendant 22 h dans une atmosphère contrôlée (95% de N_2 et 5% de H_2) et une température de 900°C. Ce processus correspond à la phase de carbonisation de la résine.

II.2.1.2.3. *Caractéristiques géométriques des pièces obtenues*

Lors de la fabrication des pompes à carburant, les pièces obtenues sont des disques qui deviendront ensuite des collecteurs. La figure 2.1 présente les caractéristiques géométriques de ces pièces qui ne sont pas rigoureusement planes comme le montre la figure 2.2. La surface des disques présente un rayon de courbure d'environ 0,75m.

La direction de pressage est normale au plan du disque ce qui favoriserait l'orientation des plans graphitiques de manière parallèle à celui-ci.

Après la mise en œuvre des disques, ces derniers sont segmentés puis liés mécaniquement et électriquement au rotor du moteur DC pour former un collecteur.

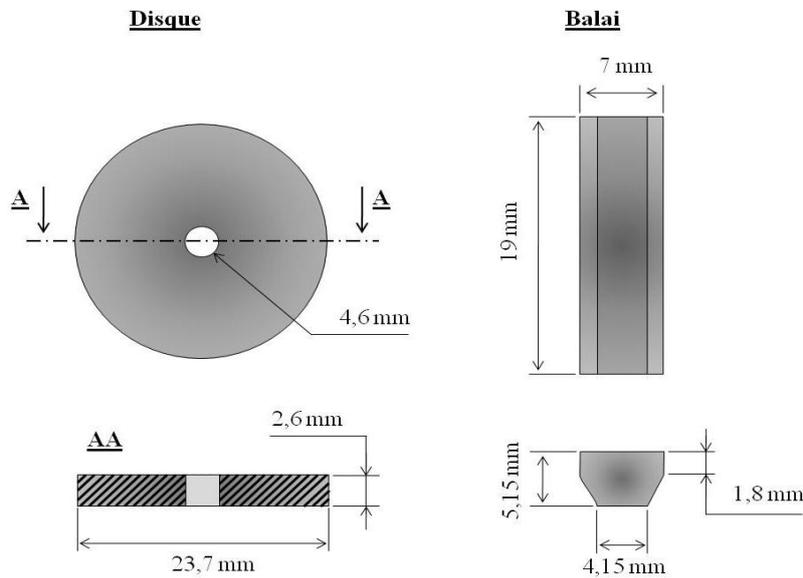


Figure 2.1. Géométrie des balais et collecteurs étudiés.

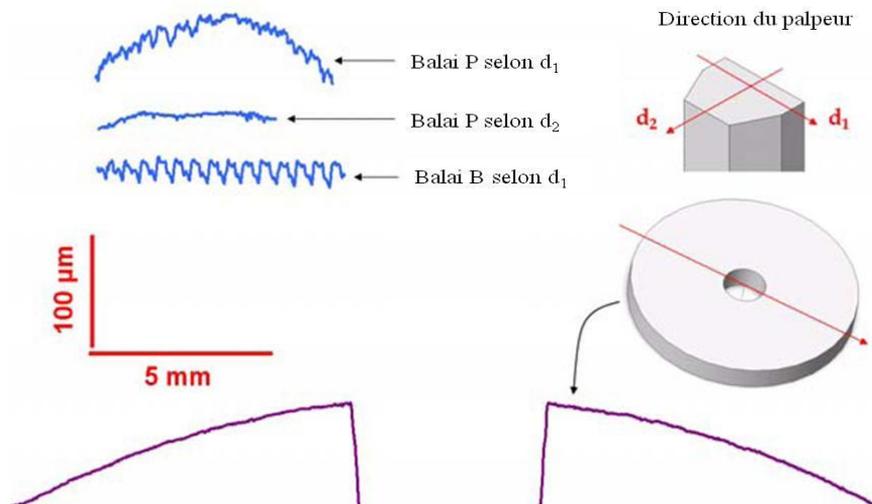


Figure 2.2. Défauts de forme des surfaces frottantes des échantillons analysés par profilométrie tactile selon (Cornuault 2008).

La mise en œuvre d'un balai permet l'obtention d'un parallélépipède qui sera ensuite usiné pour obtenir la forme finale souhaitée présentée sur la figure 2.1. La surface frottante est ensuite meulée et devient bombée ou très rugueuse comme le montre la figure 2.2. La direction de pressage favorise l'orientation des plans graphitiques selon l'axe principal du balai. La dernière opération est la mise en place de la liaison électrique du balai avec la source

de courant. Cette liaison peut être le scellement d'un câble lors de la compaction ou par la mise en place d'une charge cuivre-graphite-argent en poudre après le traitement thermique.

Dans le cas de notre étude, les collecteurs seront sous forme de disques plats non segmentés et les balais sans câble de liaison électrique. Les matériaux P et E sont disponibles sous forme de collecteurs tandis que les matériaux B et P sous forme de balais.

II.2.2. Caractérisation structurale des matériaux d'étude

II.2.2.1. Observations MEB associé à la fractographie

La technique de la fractographie suivie d'observations de type MEB permet de visualiser la structure et la répartition des phases au cœur du matériau étudié. Une entaille permettant l'amorce de rupture est réalisée sur la surface du matériau à l'aide d'une lame de scalpel. Nous obtiendrons alors une rupture fragile et précisément localisée. L'échantillon est ensuite disposé dans un bain d'azote liquide pendant 30 secondes. Un effort permettant la rupture selon l'entaille, est appliqué de chaque côté de cette dernière. Les surfaces obtenues ne sont pas planes. Elles sont donc observées au MEB qui possède une grande profondeur de champ.

II.2.2.1.1. *Matériau P*

Le matériau P présente une structure très hétérogène. Les phases organique et graphitique ne sont pas réparties de façon homogène. La phase polymère PPS se présente sous forme de billes creuses représentées en blanc sur la figure 2.3. Ces billes sont de tailles variables allant de 50 à 100 μm et sont dispersées de façon aléatoire dans la phase graphitique. Cette dernière se présente sous la forme de blocs pouvant atteindre une taille de 200 μm et de feuillets de graphite de grandes tailles et minces (respectivement 100-200 μm et quelques microns) empilés. Nous pouvons aussi noter la présence de grains de petites tailles qui selon (Cornuault 2008) sont du graphite synthétique et principalement disposés autour du polymère.

Le matériau P présente toutefois une porosité conséquente et représentée par la couleur noire sous forme de creux ou de fissures.

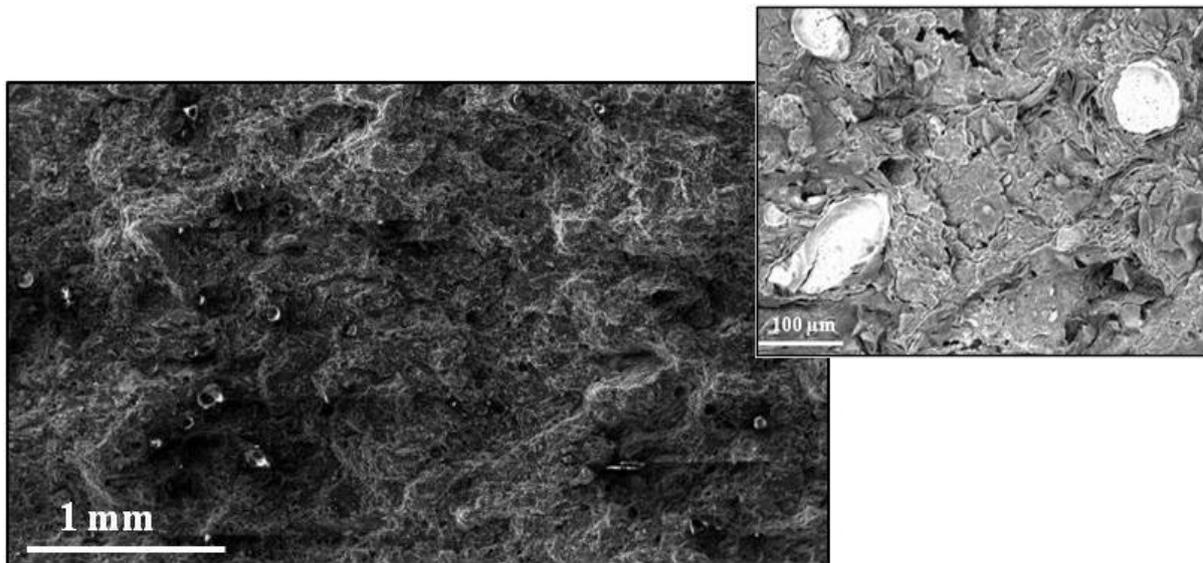


Figure 2.3. Observations MEB de la surface fracturée du matériau P.

II.2.2.1.2. *Matériau B*

Le matériau B est constitué de gros blocs pouvant atteindre une taille de 500 μm et constitués de feuillets de graphite empilés. Ces blocs sont enrobés par la résine PF comme le montre la figure 2.4. En effet la phase polymère se charge en électrons du fait de sa propriété isolante et ressort en blanc lors de l'observation MEB. Cette différence de couleur permet de situer cette résine entre les feuillets et de noter par conséquent sa répartition homogène au sein du matériau.

D'un point de vue macroscopique, le matériau B possède une structure plus homogène en comparaison au matériau P.

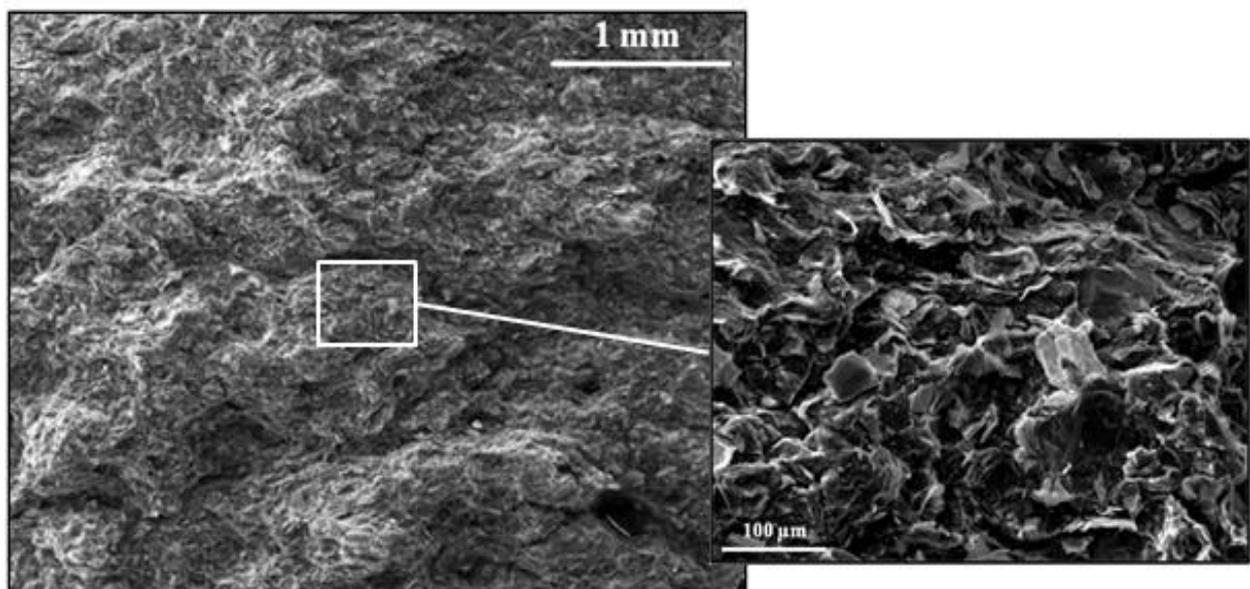


Figure 2.4. Observations MEB de la surface fracturée du matériau B.

II.2.2.1.3. *Matériau E*

La structure du matériau E se rapproche d'une structure de type céramique comme le montre la figure 2.5. Le matériau E est composé de grains de graphite ovoïde en majorité de petites tailles (environ 10 μm) et pouvant atteindre une centaine de microns. La structure possède un aspect poudreux et nous notons l'importante présence de micropores se situant entre les différents grains composant le matériau.

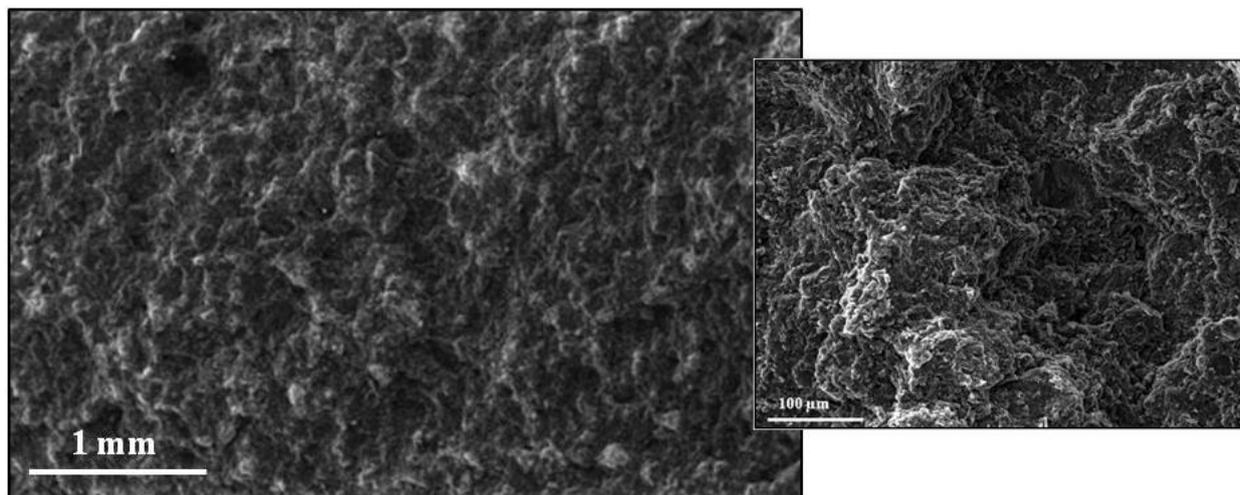


Figure 2.5. Observations MEB de la surface fracturée du matériau E.

II.2.2.2. La tomographie à rayons X

L'utilisation de cette technique s'est avérée très intéressante pour la caractérisation structurale des matériaux étudiés et la quantification des différentes phases présentes ainsi que leurs localisations. Cette étude a été menée au sein de l'équipe GEMPPM du laboratoire MATEIS de l'INSA de Lyon (Maire et al. 2004).

II.2.2.2.1. *La technique de tomographie à rayons X utilisée*

Dès les années 70 cette technique a été développée et utilisée dans le domaine médical. Elle est actuellement utilisée dans différents secteurs comme l'aéronautique, l'automobile, l'agro-alimentaire et la science des matériaux. La résolution des images était de 300 μm (Caty 2008). Grâce au développement des sources de rayonnements et des moyens informatiques, cette résolution est actuellement de l'ordre du micromètre sur un tomographe classique.

La tomographie à rayons X est une technique non destructive permettant d'obtenir une visualisation en trois dimensions au sein du matériau. Elle est le résultat de l'assemblage d'un ensemble de radiographies X appelées projections. Chaque projection est une cartographie en

deux dimensions de l'absorption des rayons X.

La loi de Beer-Lambert donne pour un faisceau d'énergie E , le nombre N_i de photons transmis en fonction du nombre de photons incidents N_0 et du coefficient d'atténuation μ du matériau lors d'un trajet s au sein de la matière :

$$N_i(E) = N_0(E) \cdot \exp\left[-\int_s \mu(s) ds\right] \quad \text{Eq. 2.1 d'après (Caty 2008)}$$

Le coefficient μ varie le long du trajet s . Cette différence de coefficient d'absorption des différentes phases présentes dans le matériau va permettre de reconstruire une image de la microstructure. Elle est fonction de la densité et du numéro atomique du matériau ainsi que de l'énergie du faisceau.

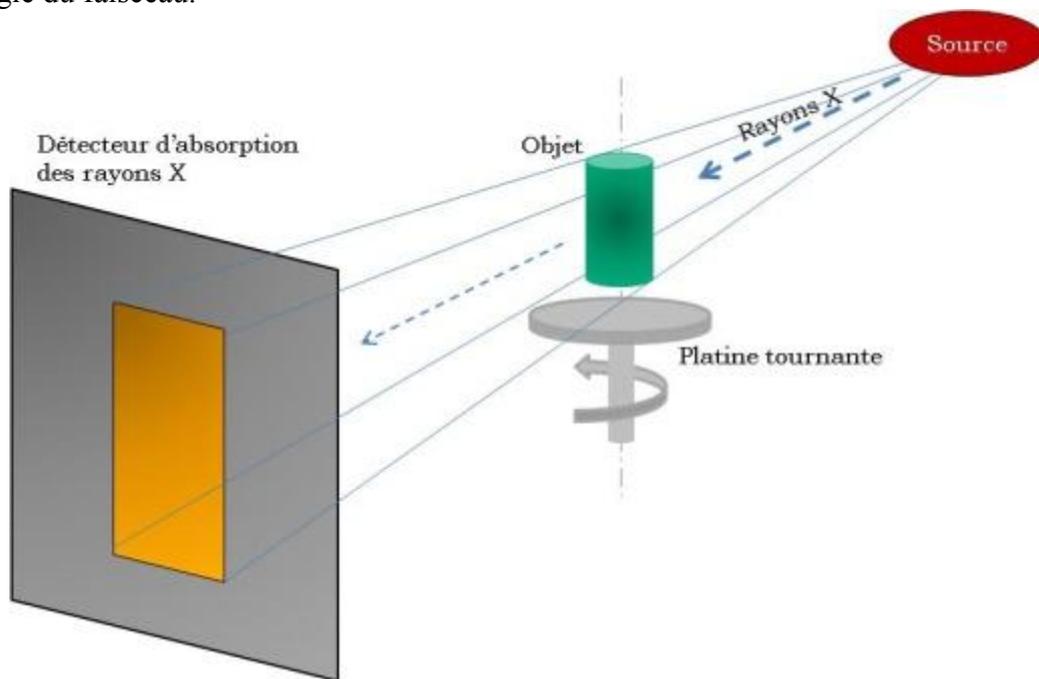


Figure 2.6. Principe de fonctionnement de la tomographie à rayons X d'après (Loretz 2008).

La figure 2.6 montre le principe de fonctionnement d'un tomographe à rayons X. Ce dernier est composé d'une source à rayons X, de l'échantillon à observer et d'un détecteur d'absorption à rayons X. Le support de l'échantillon doit être tournant par rapport aux deux autres parties.

La technique de tomographie à rayons X se décompose comme suit :

- Acquisition de radiographies lors de la rotation de l'échantillon (de 0 à 360°) permettant l'obtention des projections 2D.
- Reconstruction informatique de ces projections grâce à l'utilisation d'un algorithme de reconstruction par rétroprojection filtrée (Herman 1980) jusqu'à l'obtention de l'image en 3D du matériau observé.

- A partir de cette reconstruction en 3D, le seuillage des différents niveaux de gris permet de sélectionner les différentes phases et ainsi calculer et visualiser en 3D les différents composants du matériau.

II.2.2.2.2. *Application à nos matériaux*

Le tomographe utilisé est présent au sein du laboratoire MATEIS à l'INSA de Lyon. C'est un tomographe de laboratoire fabriqué par Phoenix. La résolution obtenue a été de $2\mu\text{m}$ pendant les 900 prises de vue lors de la rotation de 360° . Les matériaux testés ont été découpés sous forme d'allumettes de section d'environ 2mm^2 pour une hauteur d'environ 4mm. Le volume de la zone maximum observée a été environ 2 à 4 mm^3 .

Les matériaux P, B et E ont été observés avec cette technique. L'objectif est de pouvoir définir les différents teneurs de la phase polymère des matériaux testés mais aussi le volume de porosité et d'inclusions (en pourcentage). Le tableau 2.2 ci-après récapitule ces valeurs.

	P	B	E
Phase polymère PPS	3,5%	-	-
Phase polymère bakélite	-	6%	-
Porosité	7,5%	1,5%	10,5%
Inclusions	0,1%	4,5%	0,8%
Phase graphitique	88,9%	88%	88,7%

Tableau 2.2. Différentes compositions des matériaux de l'étude estimées par tomographie X.

Les phases polymères présentes dans les matériaux P et B présentées dans le tableau 2.2 ci-dessus sont nettement inférieures aux proportions données lors de la fabrication. Cette différence s'explique par la carbonisation opérée lors des différentes cuissons à hautes températures présentes dans le processus de fabrication. La phase polymère va se transformer en phase carbonée. Les pourcentages obtenus par tomographie sont proches de ceux indiqués par le partenaire industriel fabriquant les matériaux.

La porosité mise en évidence lors des observations MEB présentées précédemment est confirmée par les résultats de tomographie. Le matériau E est le plus poreux avec 10% de vide suivi du matériau P (7,5%). Le matériau B possède un taux de porosité de seulement 1,5% ce qui peut s'expliquer par son homogénéité due à la bonne répartition de la phase polymère.

Nous pouvons cependant noter la présence plus au moins importante de matériaux non souhaités lors de la fabrication, sous forme d'inclusions. Ces matériaux sont de types ferreux ou céramiques car ils absorbent énormément les rayons X (taches très blanches sur les

projections 2D).

Les projections obtenues par tomographie permettent de reconstruire en 3 dimensions la structure des différentes phases du matériau étudié. Ces observations sont présentées ci-après pour chaque matériau.

- Le matériau P :

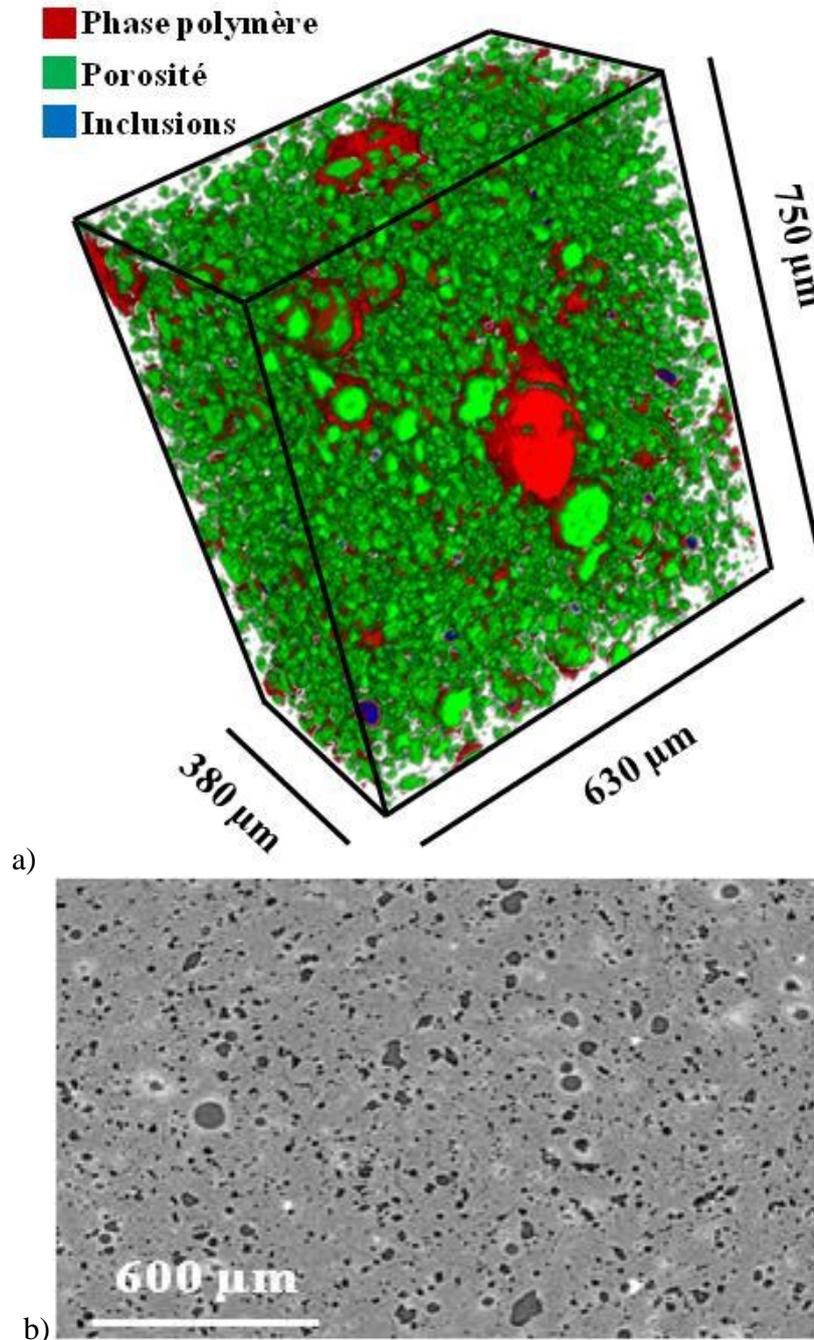


Figure 2.7. Observation par tomographie à rayons X du matériau P : a) en trois dimensions ; b) d'une projection en 2D.

Les différentes observations de la figure 2.7 permettent de confirmer les observations MEB

du paragraphe précédent qui mettaient en évidence la présence de billes creuses de PPS (dont 90% ont une sphéricité proche de 0,8) ainsi que l'importante porosité.

- Le matériau B :
-

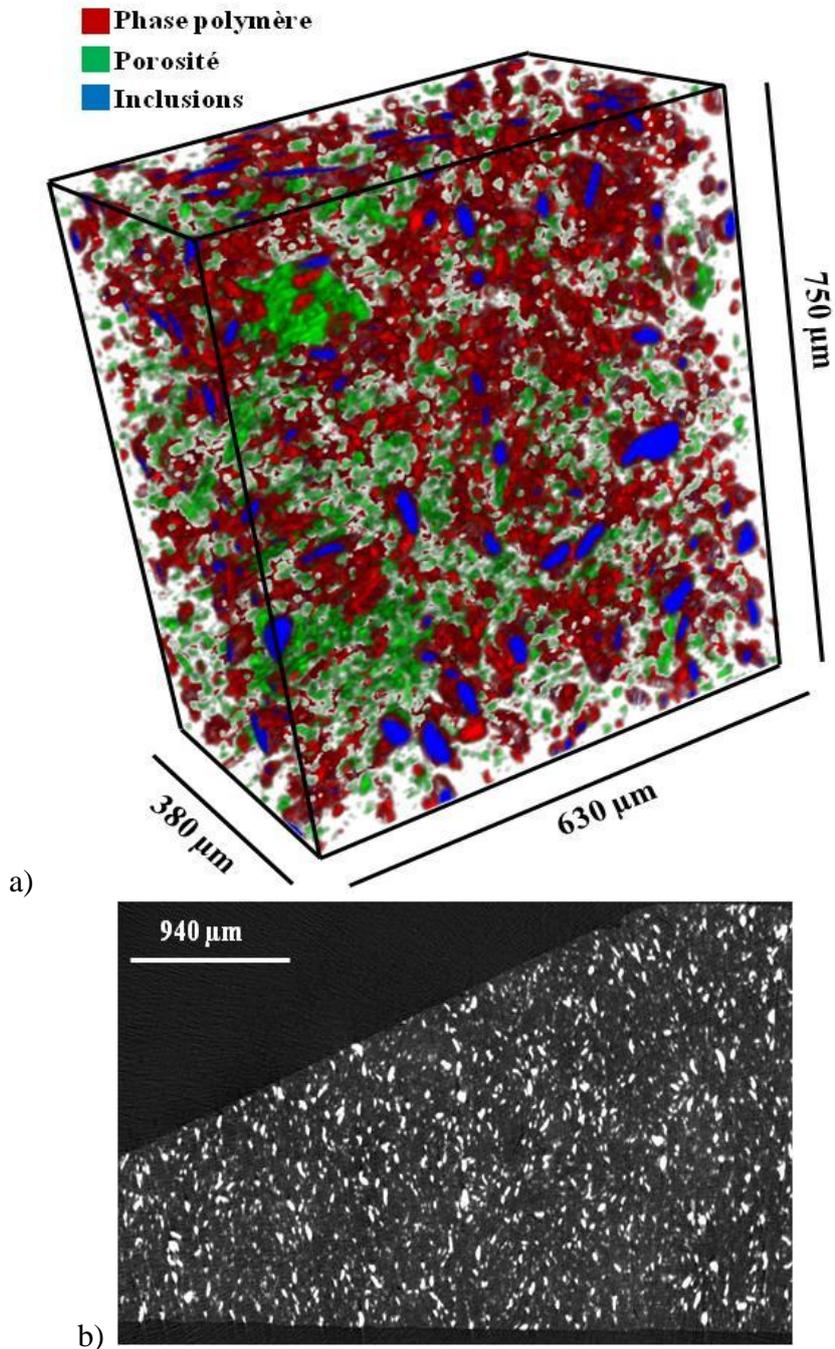
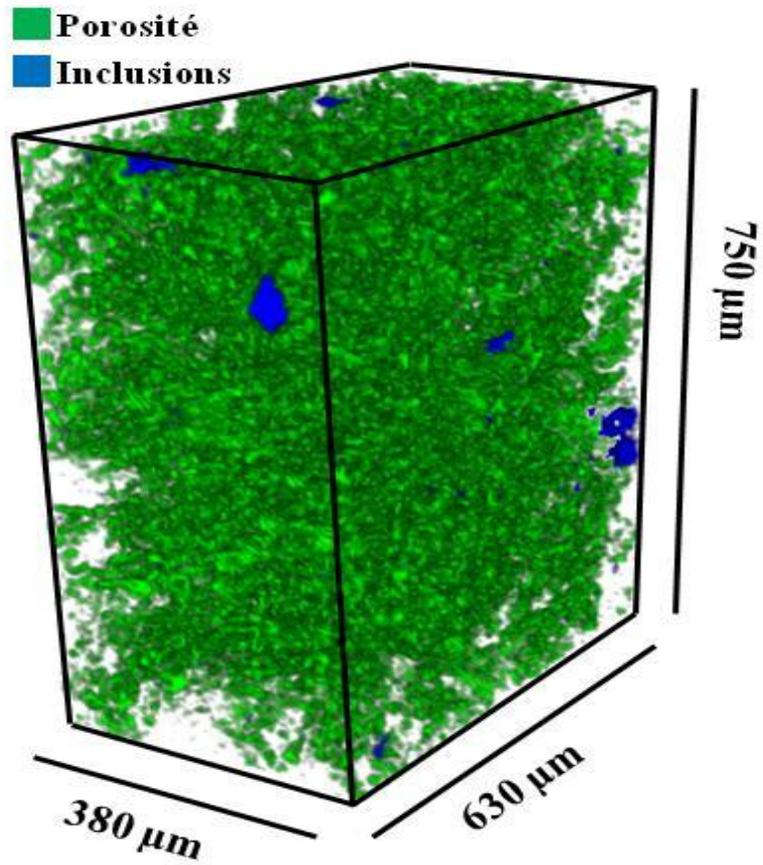


Figure 2.8. Observation par tomographie à rayons X du matériau B : a) en trois dimensions ; b) d'une projection en 2D.

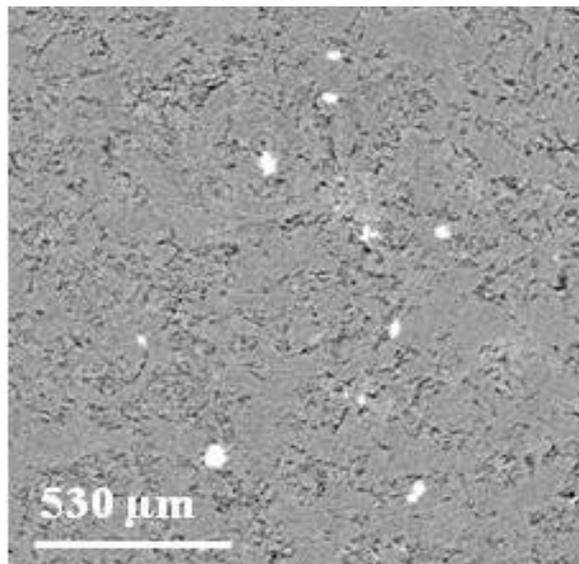
Après observation de la figure 2.8, nous pouvons noter la répartition homogène de la phase polymère ainsi que la répartition aléatoire des inclusions. La projection en 2D paraît très

sombre mais s'explique par le fort contraste d'absorption entre les phases (phase graphite-polymère et inclusions). Le contraste obtenu en niveau de gris est alors très important.

- Le matériau E :



a)



b)

Figure 2.9. Observation par tomographie à rayons X du matériau E : a) en trois dimensions ; b) d'une projection en 2D.

Nous observons sur la figure 2.9 la faible teneur en inclusions mais l'importante porosité. Le matériau semble plus compact et les microporosités sont réparties sur la totalité du matériau de façon homogène comme le montraient les images obtenues en MEB.

II.2.3. Caractérisation mécanique des matériaux de l'étude

II.2.3.1. Caractérisations mécaniques par nano-indentation

Des essais de nano-indentation ont été effectués pour caractériser mécaniquement les échantillons.

II.2.3.1.1. *Technique de nano-indentation*

Dans le but de déterminer les propriétés mécaniques des matériaux de type P, B (ou B900) et E, des tests de nano-indentation ont été réalisés grâce à un nano-indenteur XP (Agilent) (figure 2.10). La technique de mesure continue de la raideur de contact (continuous stiffness measurement method) est utilisée.

Cette méthode consiste à superposer au mouvement continu un petit déplacement sinusoïdal de faible amplitude (1 nm) à une fréquence donnée (32 Hz) lors du test d'indentation comme indiqué dans la figure 2.11. L'appareil est dans une chambre climatique qui permet de contrôler la température (T) et le taux d'humidité relative (HR) : $-40\text{ }^{\circ}\text{C} < T < +100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $15\% < \text{HR} < 100\%$.

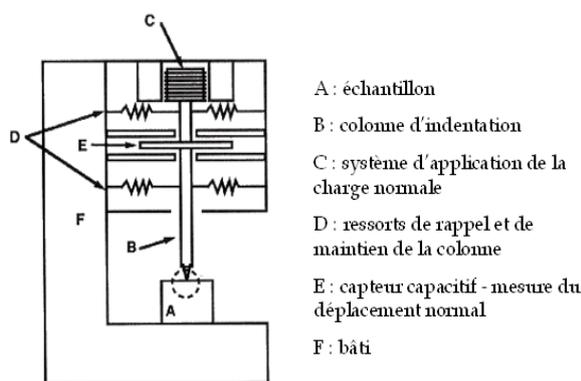


Figure 2.10. Schéma de principe du nanoindenteur.

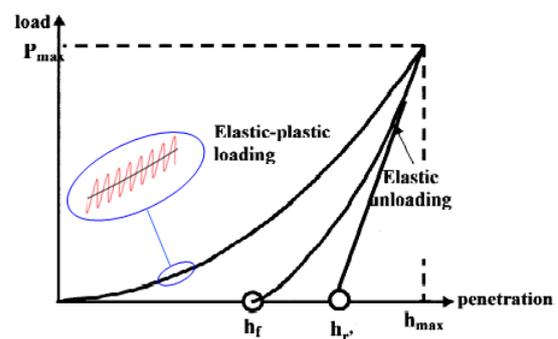


Figure 2.11. Courbe d'indentation d'un matériau élastoplastique en mode dynamique selon (Diss et al. 2002)

L'intérêt de cette méthode réside dans la succession de cycles charge/décharge qui permet de connaître en continu différentes valeurs.

Lors de la charge, le matériau a un comportement élastoplastique tandis que lors de la décharge, le comportement est élastique. On note h_{max} la profondeur maximale atteinte par l'indenteur dans le matériau. Cette profondeur est obtenue à la charge maximale P_{max} (si le matériau ne flue pas). On note h_r la profondeur résiduelle de l'indent après que l'indenteur a été enlevé. L'intersection entre l'axe des abscisses et la tangente à la courbe de décharge au point de charge maximum est noté h_r' qui représente l'enfoncement plastique sous charge. La pente S de la tangente à la courbe de décharge au point maximum représente la raideur de contact en ce point. Nous obtenons l'équation 2.2 suivante (Bertrand-Lambotte 2001) :

$$h_r' = h_{max} - \frac{P_{max}}{S} \quad \text{Equation 2.2}$$

A partir de cette raideur S , et en utilisant l'équation 2.3 (Sneddon 1965)

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{A_N} \cdot E^* \quad \text{Equation 2.3}$$

Nous pouvons calculer le module d'élasticité réduit E^* donné par l'équation 2.4 ci-dessous :

$$E^* = \frac{E^*}{1 - \nu^2} = \frac{S \times \sqrt{\pi}}{2 \times \sqrt{A_N}} \quad \text{Equation 2.4}$$

Où ν représente le coefficient de poisson, A_N l'aire de l'indent.

Cette aire de l'indent peut être calculée en se basant sur la géométrie de l'indenteur et en appliquant la méthode (Loubet et al. 1984) qui consiste à prendre en compte le défaut de pointe h_0 de l'indenteur mesuré préalablement, ainsi que l'épaisseur du bourrelet d'écoulement plastique formé autour de l'indent.

L'aire de contact projetée A_N est calculé selon la relation formulée par (Odoni 1999) :

$$A_N = 24,56 \cdot [1,2 \cdot (h_r' + h_0)]^2 = 35,37 \cdot (h_r' + h_0)^2 \quad \text{Equation 2.5}$$

La dureté H est définie comme une pression de contact et est formulé ci-dessous par l'équation. 2.6 :

$$H = \frac{P}{A_N} \quad \text{Equation 2.6}$$

Dans cette étude, l'indenteur utilisé est une pyramide en diamant de type Berkovitch, tétraèdre

(115°12 entre arrêtes). Les tests d'indentation ont été effectués à charge maximum imposée (450 mN) à 25°C. Lorsque la valeur donnée précédemment est atteinte, un second cycle charge/décharge est initié, ce qui permet de corriger une éventuelle dérive thermique (reconnaisable lorsque les deux décharges sont décalées de quelques nanomètres).

II.2.3.1.2. *Résultats de nano-indentation sur les matériaux étudiés*

Trois séries de dix indents ont été réalisées à la surface de chaque matériau de l'étude qui sont pour les collecteurs les matériaux de type P et E, tous deux polis et non polis ainsi que pour les balais les matériaux de type P et B, tous deux polis et non polis. Le type de résultat obtenu est montré en figure 2.12 ci-dessous.

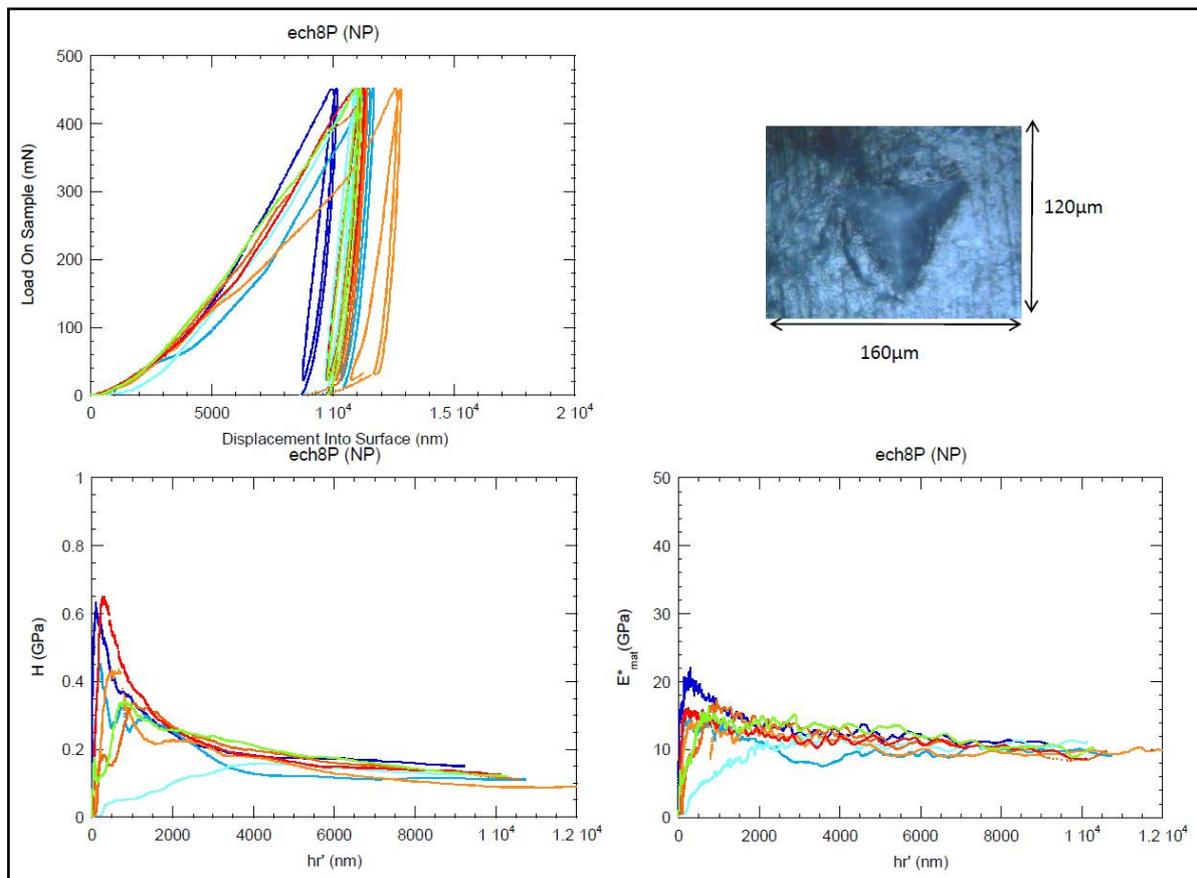


Figure 2.12. Type de résultats de nano-indentation obtenu avant traitement.

Le tableau 2.3 présente les résultats obtenus. Nous pouvons les comparer à ceux obtenus par (Cornuault 2008) présentés dans le tableau 2.4.

échantillon	H(MPa)	E*(GPa)
	pour hr'=8µm	
1 (PcollNP)	125	10,25
2 (PcollP)	155	12,5
3 (EcollNP)	?	?
4 (EcollP)	240	8,7
5 (PbNP)	135	12,2
6 (PbP)	165	15,05
7 (BNP)	?	?
8 (BP)	115	8,85

Tableau 2.3. Caractéristiques mécaniques obtenues par nano-indentation

échantillon	H(MPa)	H _v (MPa)	E*(GPa)
1 (P.NP)	91	112	8,5
3 (EcollNP)	?	?	?
7 (BNP)	143	131	9,6

Tableau 2.4. Caractéristiques mécaniques obtenues par nano-indentation par (Cornuault 2008)

Les figures 1.4 et 1.5 reprennent les résultats pour mieux visualiser les différences entre les matériaux.

Avec, lors de la définition de l'échantillon : la première lettre correspond au type de matériau ; coll=collecteur ; b=balai ; NP=non poli et P=poli dans l'ordre d'apparition pour les échantillons 1 à 8. H_v correspond à la dureté Vickers.

Les figures 2.13 et 2.14 reprennent les résultats présents dans le tableau 2.3 pour mieux visualiser les différences entre les matériaux.

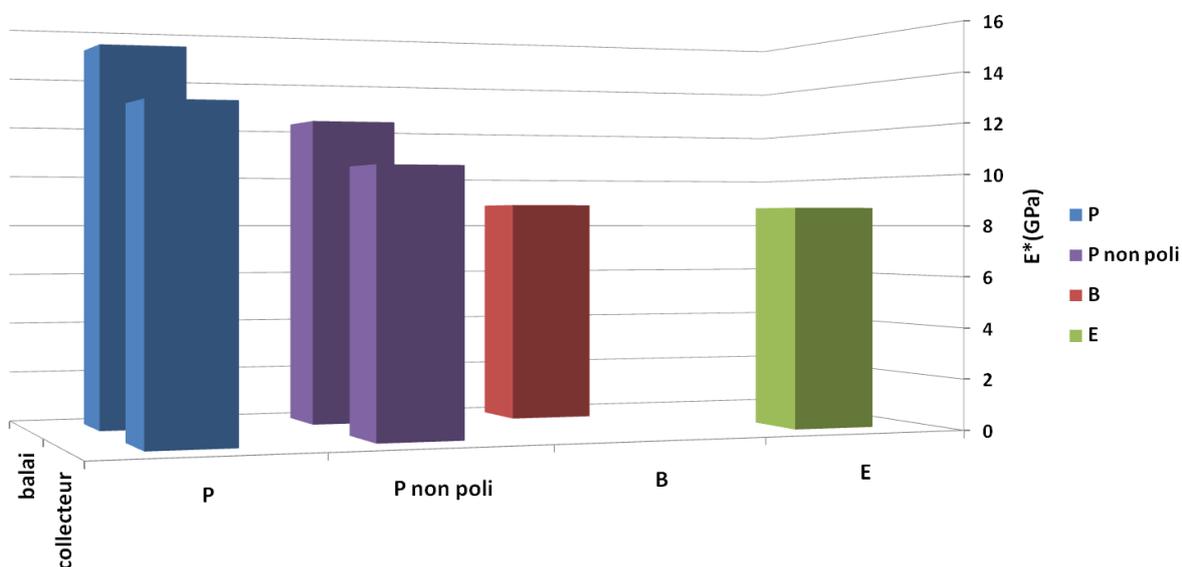


Figure 2.13. Module d'élasticité réduit pour les matériaux de type P, B et E.

Nous constatons des différences significatives concernant le comportement élastique de nos matériaux. En effet, le matériau de type P possède environ 35% d'élasticité supplémentaire par rapport aux matériaux de type B et E qui semblent avoir un comportement élastique équivalent. Les valeurs d'élasticité obtenues sont comparables à celles rapportées par (Cornuault 2008).

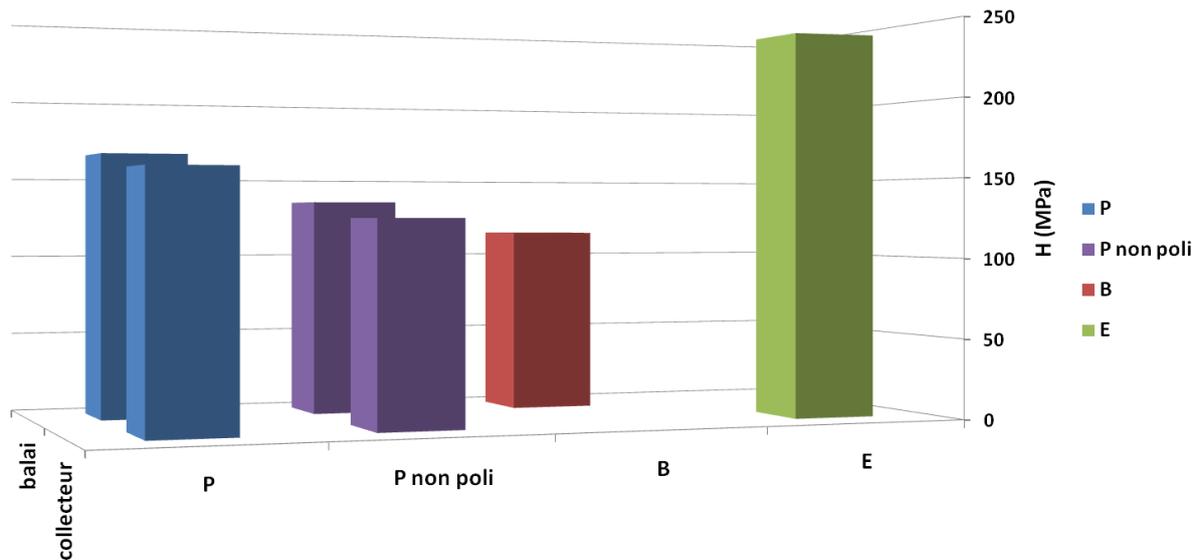


Figure 2.14. Dureté pour les matériaux de type P, B et E.

L'observation de la figure 2.14 permet de mettre en évidence les différences de dureté importantes entre le matériau de type E et les matériaux de type P et B. L'homogénéité du matériau de type électrographite doit être la cause de cette différence notable comparé aux deux autres matériaux bi-phasiques graphite/PPS ou Bakélite qui restent tous deux très hétérogènes.

II.2.3.2. Comportement au rayage des matériaux

II.2.3.2.1. La sclérométrie : Technique et méthode

Des essais de rayage ont été réalisés à l'aide d'un scléromètre du LTDS. La figure 2.15 schématise les essais réalisés.

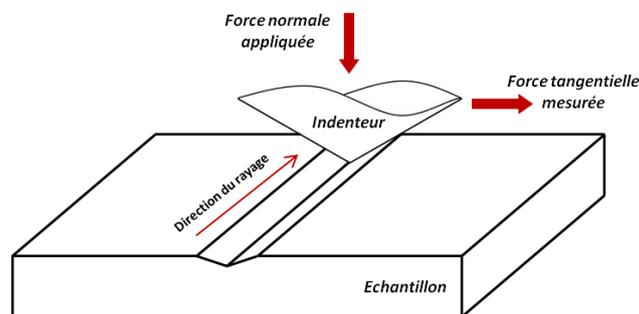


Figure 2.15. Schéma du scléromètre utilisé lors d'essais de rayage (Ben Tkaya 2007).

Le scléromètre est un outil d'analyse du comportement à l'usure abrasive de tous les types de

matériaux. Le dispositif utilisé permet de rayer des surfaces planes avec une gamme de sollicitations variables et différentes géométries d'indenteurs pour différentes vitesses. Un essai de rayage, à effort normal imposé est composé de deux étapes : une étape d'indentation dans laquelle on impose un effort normal et une deuxième étape de rayure pendant laquelle l'effort normal reste constant et l'échantillon se déplace selon un plan parallèle à la surface frottée. Au cours de l'essai, les efforts normaux et tangentiels dus au frottement sont enregistrés.

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un indenteur conique en diamant ayant un angle au sommet de 120° ainsi qu'un rayon de courbure de pointe de $5\mu\text{m}$. La surface de chaque échantillon a été rayée sur une longueur de 10 mm pour des charges variant de 1 à 5 N à la vitesse de $0.1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Chaque configuration a été répétée trois fois. Avant les essais, les disques ont été polis à l'identique des essais de nano-indentation ainsi que les essais d'arc et de frottement (chapitres suivants).

Après rayage, les surfaces ont été analysées par profilométrie tactile en suivant une direction perpendiculaire au sens de rayage puis observées au MEB.

II.2.3.2.2. Résultats de rayage des matériaux carbonés

Le but des essais de rayage est de déterminer le comportement fragile ou ductile de nos matériaux lors du frottement. La figure 2.16 permet de situer le coefficient de frottement pour les essais réalisés entre 1.5 et 2 et ceci indépendamment de la charge appliquée. Cornuault a observé le même comportement mais avec des valeurs de coefficient inférieures (Cornuault 2008). Cette baisse peut s'expliquer par la géométrie imparfaite de l'indenteur dont l'angle au sommet est plus faible en réalité par rapport à la théorie.

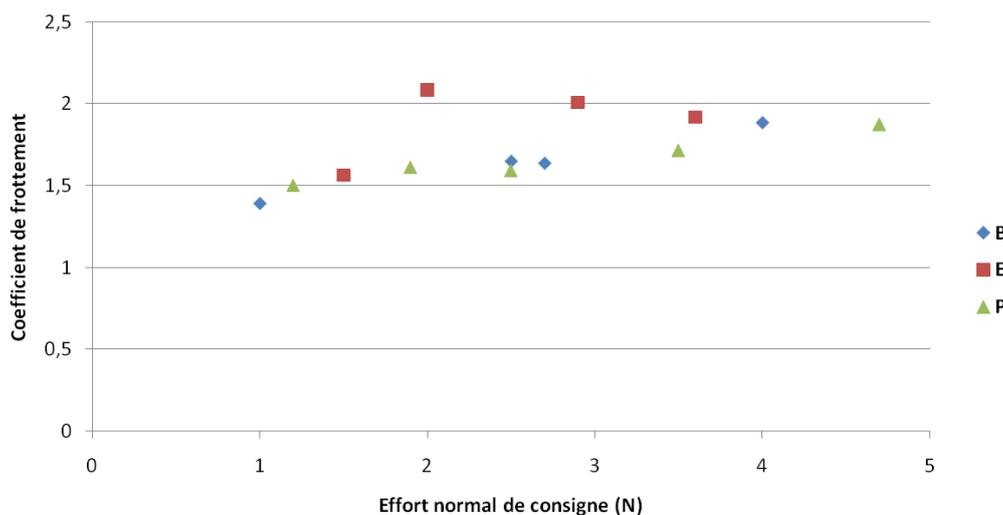


Figure 2.16. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale lors du rayage.

Lors de l'essai de rayage, l'effort normal F_n , l'effort tangentiel F_t ainsi que le coefficient de frottement μ varient beaucoup. Ce comportement traduit une rupture du matériau par un phénomène discontinu.

L'observation des surfaces rayées (figure 2.17) sous une même charge montre des endommagements différents pour chaque matériau. Concernant le matériau P, le fond de rayure semble lisse et nous observons des bourrelets latéraux de matière composés d'empilements de graphènes cisailés. Le matériau P présente un comportement ductile. Le matériau B présente lui aussi un comportement ductile qui est vérifié par la présence de blocs de matières rejetés en bordure mais aussi éjectés en fond de rayure. La rayure du matériau E est inhomogène et le faciès d'endommagement paraît très fragile faisant apparaître la microstructure granulaire de ce matériau. De plus, la profondeur de rayure est moins importante.

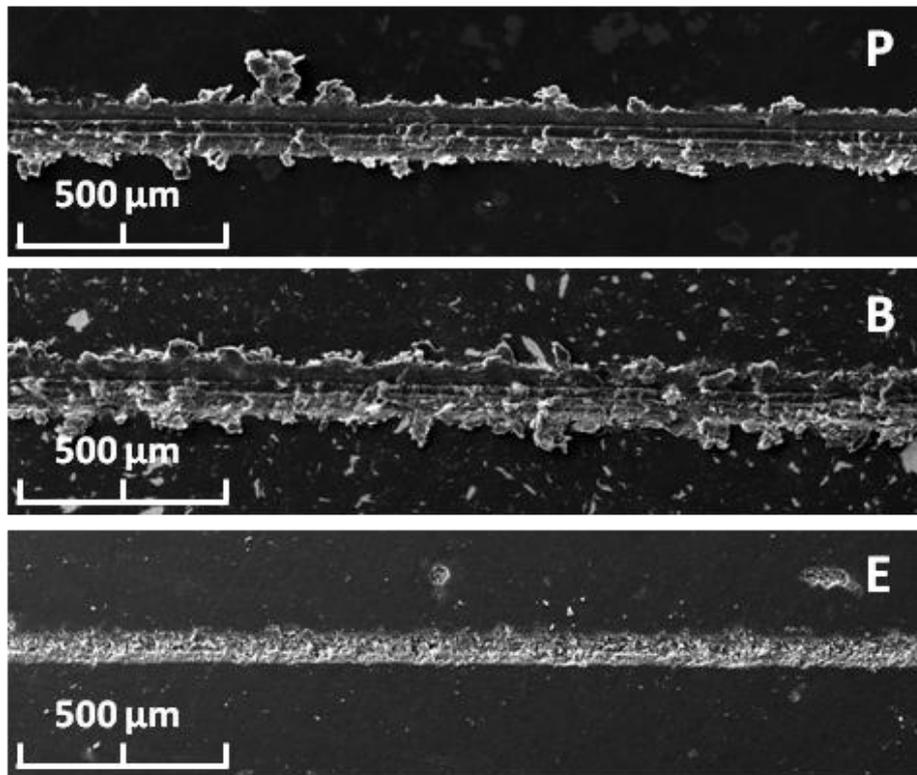


Figure 2.17. Observations MEB des rayures obtenues sur les matériaux P, B et E sous un effort normal de 4N.

Les faciès d'endommagement et la topographie des rayures ne varient pas en fonction de la charge normale appliquée pour chaque matériau.

La figure 2.18 présente un profil type réalisé à l'aide d'un profilomètre tactile. Nous notons la présence de bourrelets latéraux qui confirment les conclusions énoncées à partir des images MEB.

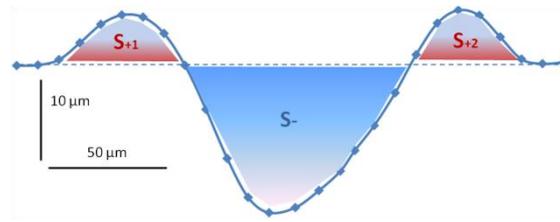


Figure 2.18. Observation d'un profil type réalisé à l'aide d'un profilomètre tactile.

Les profils réalisés sur l'ensemble des rayures permettent de mesurer le volume endommagé par unité de longueur V_L en utilisant la méthode de (Kato 1997) tel que :

$$V_L = S_- - (S_{+1} + S_{+2}) \quad \text{Equation 2.7}$$

La figure 2.19 montre la hausse proportionnelle du volume utilisé par unité de longueur et de la charge normale appliquée.

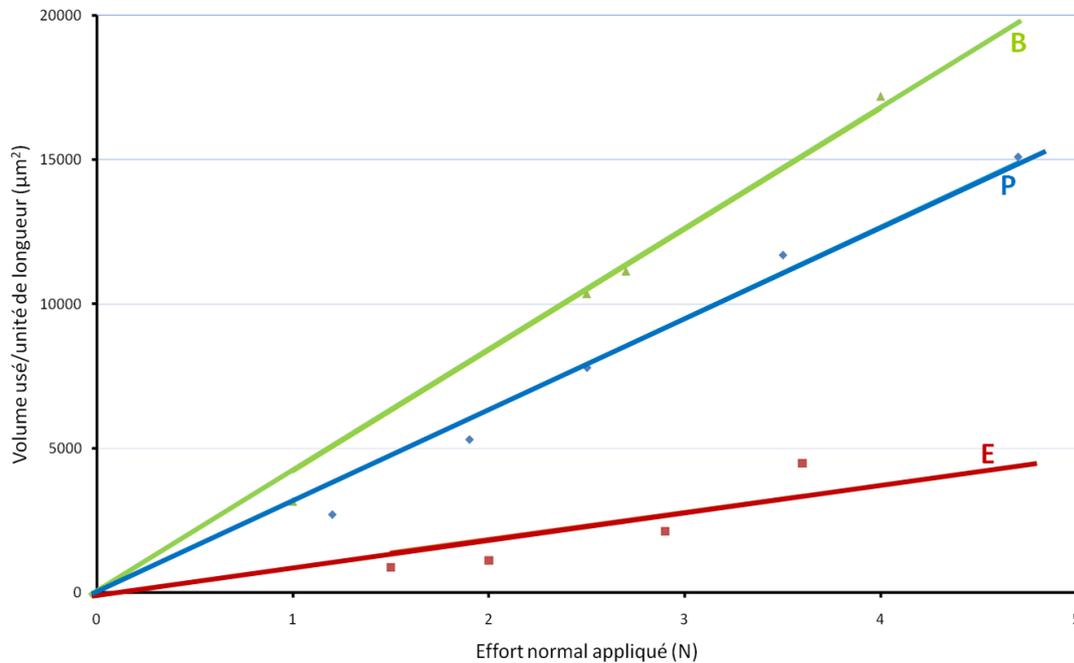


Figure 2.19. Volume utilisé par unité de longueur en fonction de la charge appliquée pour les matériaux P, B et E.

Le tableau 2.5 présente les hausses de V_L pour les matériaux rayés pour les trois matériaux testés.

	P	B	E
Volume endommagé par unité de longueur et de force ($\mu\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$)	3170	4190	930

Tableau 2.5. Valeurs du volume endommagé par unité de longueur et de force pour les matériaux P, B et E.

Les résultats obtenus mettent en évidence que la hausse est forte et similaire pour les matériaux B et P (respectivement environ 4190 et 3170 $\mu\text{m}^2.\text{N}^{-1}$) et faible pour le matériau P (environ 930 $\mu\text{m}^2.\text{N}^{-1}$).

II.2.3.2.3. Conclusions des essais de rayage

D'après les essais réalisés, deux comportements peuvent être distingués lors du rayage des matériaux P, B et L. La figure 2.20 schématise ces deux comportements.

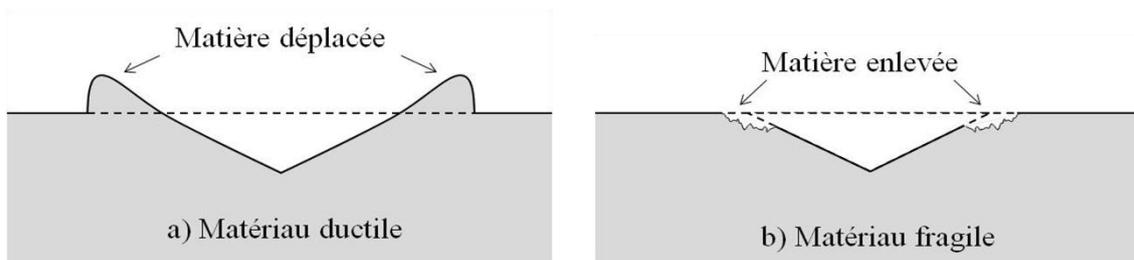


Figure 2.20. Modèle schématique présentant la matière déplacée et enlevée pour a) les matériaux ductiles et b) les matériaux fragiles d'après (Stachowiak & Batchelor 2001) et (Cayer-Barrioz 2003)

Le matériau E possède un comportement très fragile. Les observations montrent la présence de bourrelets latéraux très endommagés avec un faciès de type arrachement et fissuration. Lors de l'essai nous avons noté la présence de débris provenant de la zone de contact. C'est le matériau qui possède le plus faible volume usé par unité de longueur et de force.

Le matériau P présente un comportement ductile avec un fond de rayure régulier et lisse. Le faciès s'apparente plus à du labourage, de grosses parties du matériau sont repoussées sous forme de bourrelets latéraux entourant la rayure.

Le matériau B présente un comportement ductile avec cependant quelques caractéristiques des matériaux fragiles. Ce matériau se rapproche de la coupe avec écaillage de grosses parties. Le fond de trace est régulier et de type ductile mais est fissuré et est entouré de bourrelets latéraux.

II.2.4. Résistivité des matériaux

La résistivité représente la capacité du matériau à s'opposer à la circulation du courant. Elle a été évaluée par la méthode 4 pointes avec une sonde de type Jandel dont le principe est présenté figure 2.21. Il consiste à appliquer quatre pointes en carbure de tungstène sur la surface de l'échantillon sous une charge de quelques newtons.

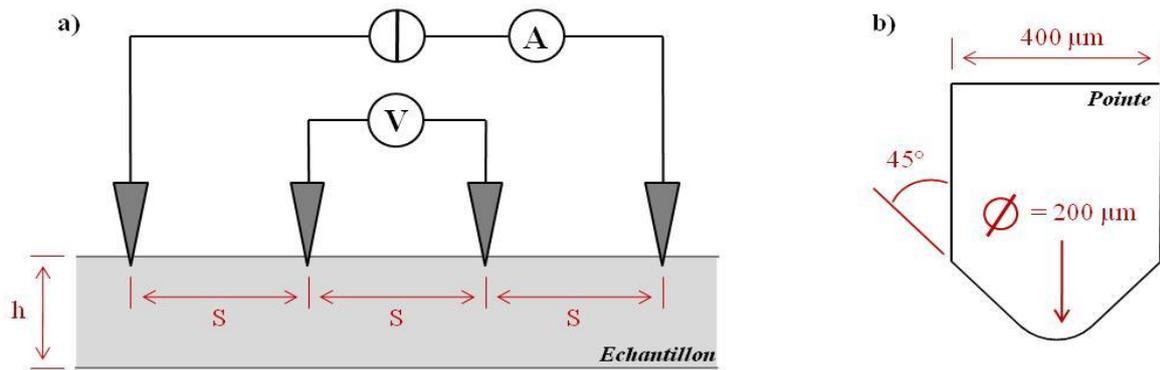


Figure 2.21. a) Schéma de principe de la méthode 4 pointes ; b) géométrie d'une pointe.

Les pointes sont disposées en ligne et séparées d' $1 \text{ mm} \pm 0,007$. Les deux pointes extérieures appliquent un courant I variable grâce à un générateur commandé en courant et la tension est lue aux bornes des deux pointes intérieures grâce à un voltmètre de grande impédance.

Le découplage de l'application du courant et de la mesure de la tension, l'enfoncement des pointes et la grande impédance de l'appareil de mesure de la tension permettent de ne considérer que la résistance de la fraction de matière comprise entre les deux pointes intérieures en s'affranchissant des résistances de contact (Cornuault 2008) (Clark 2011).

Le dispositif permet de plus l'obtention de courbes (I, U) pour les trois matériaux étudiés. Ils présentent tous un comportement ohmique parfait quelque soit les sens du courant.

De ces courbes est extrait le coefficient directeur à partir duquel nous allons calculer la résistivité ρ du matériau en appliquant un facteur correctif ξ prenant en compte l'épaisseur locale h et la distance entre pointes s selon l'équation X (Valdes 1954) :

$$\rho = 2\pi \cdot s \cdot \frac{U}{I} \cdot \xi = 2\pi \cdot s \cdot \frac{U}{I} \cdot \left(1 + \frac{0,52632}{\left(\frac{h}{s}\right)^{1,9}}\right)^{-1} \quad \text{Equation 2.8}$$

Les résistivités obtenues pour les trois matériaux sont résumées dans le tableau 2.6 ci-dessous.

Matériau	P	B	E
Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$1,36 \pm 0,05$	$0,33 \pm 0,05$	$2 \pm 0,05$

Tableau 2.6. Résistivités calculées pour les matériaux P, B et E à température ambiante.

Les résistivités sont proches de l'ohm centimètre et du même ordre de grandeur même si celle du matériau B est inférieure. Ces valeurs sont proches de celles annoncées par le fabricant (Uecker 2003) selon (Cornuault 2008) même si (Shobert 1965) et (Stanley 1966) annoncent des valeurs 10 fois plus faibles.

La valeur de résistivité du matériau E est la plus élevée. Ce constat peut s'expliquer par son importante microporosité et du fait que les graphènes ne sont pas complètement graphités. Les matériaux comportant une phase polymère ont un comportement très différent ($\rho_{(P)}$ est environ 4 fois supérieur à $\rho_{(B)}$). La structure du matériau P est plus hétérogène que B et P est beaucoup plus poreux que B. De plus le matériau B subit une carbonisation plus importante (cuisson à 900°C pour B) ce qui permet au matériau d'améliorer sa conductivité. (Cornuault 2008) annonce des valeurs de résistivité de l'ordre de 2,2 et de 1,1 pour des matériaux de type B mais qui sont "cuits" à des températures respectives de 320°C et 600°C, ce qui renforce nos conclusions.

Les valeurs de résistivité obtenues mettent en évidence la cohérence des résistivités mesurées avec la microstructure des différents matériaux.

II.3. Conclusion

Les carburants utilisés possèdent des comportements similaires et peuvent être considérés comme des lubrifiants liquides de faible viscosité lors des futurs essais de frottement.

Les trois matériaux étudiés possèdent des caractéristiques structurales, mécaniques et électriques différentes qui induiront une tenue lors du frottement propre à chacun. Les matériaux provenant de la filière froide (P et B) contenant une phase polymère possèdent une structure hétérogène et une répartition des différentes phases qui induisent une tenue mécanique plus faible que la matériau E qui lui est plus homogène de par son processus de fabrication. Cependant le matériau B subit une forte carbonisation qui permet une plus faible résistivité que P et E. Ceci peut aussi s'expliquer par son faible taux de porosité.

Le tableau 2.7 permet de récapituler les caractéristiques structurales, mécaniques et électriques des trois matériaux étudiés.

	<i>P</i>		<i>B</i>	<i>E</i>
<i>Taux de polymère</i>	3,5 %		6 %	-
<i>Taux de porosité</i>	7,5 %		1,5 %	10,5 %
<i>Taux d'inclusions</i>	0,1 %		4,5 %	0,8 %
<i>Taux de graphite</i>	88,9 %		88 %	88,7 %
<i>Dureté H (MPa)</i>	<i>Balai</i>	165	115	240
	<i>collecteur</i>	155		
<i>Module E* (GPa)</i>	<i>Balai</i>	15	8,85	8,7
	<i>collecteur</i>	12,5		
<i>Usure lors des tests de rayage</i> $V_L/F_N (\mu\text{m}^2.N^{-1})$	3170		4190	930
<i>Résistivité ($\Omega.cm$)</i>	1,36		0,33	2

Tableau 2.7. Caractéristiques pour les matériaux *P*, *B* et *E* à température ambiante.

II.4. Bibliographie

- Agarwal, A.K. & M. Das, L., 2001. Biodiesel Development and Characterization for Use as a Fuel in Compression Ignition Engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123(2), 440-447.
- Appert, O., Ballerini, D. & Montagne, X., 2004. Biocarburants : la stratégie de recherche de l'IFP.
- Ben Tkaya, M., 2007. *Etude numérique et expérimentale de l'essai de rayure*. thèse Ecole Centrale de Lyon. N° ordre 2007/37.
- Bertrand-Lambotte, 2001. *Les mécanismes de rayure des vernis de finition automobile*. thèse Ecole Centrale de Lyon. N° ordre ECL 2001-28.
- Caty, O., 2008. *Fatigue des empilements de sphères creuses métalliques*. thèse Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. N° ordre 2008-ISAL-0084.
- Cayer-Barrioz, J., 2003. *Mécanismes d'usure de polymères orientés : application à l'abrasion des fibres de polyamide*. thèse Ecole Centrale de Lyon. N° ordre 2003/32.
- Clark, J., 2011. Four-Point-Probes experiments. Available at: <http://www.four-point-probes.com/index.html>.
- Cornuault, P., 2008. *Contribution à l'étude du comportement tribologique de matériaux carbonés pour applications électriques*. thèse Ecole Centrale de Lyon. N° ordre 2008/17.
- Diss, P. et al., 2002. Sharp indentation behavior of carbon/carbon composites and varieties of carbon. *Carbon*, 40(14), 2567-2579.
- Herman, G.T., 1980. Reconstruction from projections. The fundamentals of computerized tomography.
- Kato, K., 1997. Wear mechanisms, New directions in tribology. Dans *Mechanical Engineering Publications*. World Tribology Congress. Bury St Edmunds: I.M. Hutchings.
- Loretz, M., 2008. *Caractérisation des propriétés thermiques de mousses céramiques et métalliques à partir d'analyses tomographiques aux rayons X*. thèse Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. N° ordre 2008-ISAL-0052.
- Loubet, J. et al., 1984. Vickers indentation curves of magnesium oxide (MgO). *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*, 106(1), 43-48.
- Maire, E. et al., 2004. Tomographie à rayons X appliquée à l'étude des matériaux. Dans *Techniques de l'ingénieur*. IN 20. p. 1-9.

- Mazuyer, D., 2007. Cours de tribologie de 3ème année de l'Ecole Centrale de Lyon.
- Odoni, 1999. *Propriétés mécaniques et effets d'échelle*. thèse Ecole Centrale de Lyon. N° ordre 99/17.
- Shobert, 1965. *Carbon brushes - The physics and chemistry of sliding contacts*, New-York: Chemical publishing company.
- Sneddon, I.N., 1965. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile. *International Journal of Engineering Science*, 3(1), 47-57.
- Stachowiak, G.W. & Batchelor, A.W., 2001. Dans *Engineering Tribology*. Butterworth - Heinemann.
- Stanley, I., 1966. The effect of surface temperature on the friction of electrographite on copper. *British Journal of Applied Physics*, 17(6).
- Uecker, A., 2003. Lead-free carbon brushes for automotive starters. *Wear*, (255), pp.1286-1290.
- Valdes, L., 1954. Resistivity Measurements on Germanium for Transistors. *Proceeding of the IRE*, 42(2), pp. 420-427.
- Wain, K.S. et al., 2005. Alternative and low sulfur fuel options: boundary lubrication performance and potential problems. *Tribology International*, 38(3), 313-319.
- Yuan, W. et al., 2005. Temperature-dependent kinematic viscosity of selected biodiesel fuels and blends with diesel fuel. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 82(3), 195-199.

Chapitre III.

Dispositif d'essai et analyse du contact expérimental

L'objet de ce chapitre est de présenter le dispositif expérimental développé dans le cadre de la problématique de la pompe de gavage automobile. Les essais de frottement de type pions-disque ont été réalisés sur un tribomètre qui recrée au plus près la réalité les conditions de vie des balais et du collecteur. Suite à la présentation des différents éléments et systèmes composant le tribomètre, une analyse du contact expérimental sera effectuée ainsi qu'une corrélation avec le contact réel issu de la pompe de gavage automobile.

Sommaire

CHAPITRE III.	69
DISPOSITIF D'ESSAI ET ANALYSE DU CONTACT EXPERIMENTAL	69
III.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL : LE TRIBOMETRE HVSF	70
III.1.1. <i>Fonctionnement du tribomètre HVSF</i>	70
III.1.2. <i>Mesures et acquisitions des paramètres d'entrée et de sortie</i>	79
III.1.3. <i>Procédure d'essai</i>	85
III.2. ETUDE DU CONTACT EXPERIMENTAL	86
III.2.1. <i>Géométrie et cinématique du contact</i>	86
III.2.2. <i>Corrélation avec l'application industrielle</i>	87
III.3. CONCLUSION	88
III.4. BIBLIOGRAPHIE	90

III.1. Dispositif expérimental : le tribomètre HVSF

L'étude de l'usure en frottement des matériaux définis précédemment a été réalisée sur un dispositif informatisé de mesure du laboratoire LTDS (Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes), conçu spécifiquement pour l'application visée. Ce dispositif expérimental est le tribomètre appelé HVSF : High Velocity Small Forces (Cornuault et al. 2008). Il permet de recréer les conditions au plus près du réel de l'application industrielle souhaitée en plus de contrôler et mesurer plusieurs paramètres de fonctionnement.

Ce chapitre permet d'expliquer son principe de fonctionnement, ses caractéristiques ainsi que les différentes possibilités de mesure.

III.1.1. Fonctionnement du tribomètre HVSF

Le tribomètre assure le frottement d'un contact de type double pion / plan (respectivement les balais et le collecteur) dans un milieu de type carburant et sous un effort normal de contact constant et avec un courant électrique à travers les contacts constants au cours d'un essai. Il permet de mesurer simultanément les coefficients de frottement des deux contacts, la résistance électrique du double contact ainsi que la position verticale d'un des deux pions (un balai).

III.1.1.1. Description générale

Le tribomètre HVSF qui est présenté dans la figure 3.1 comporte trois parties essentielles que sont : la cellule de frottement (dans laquelle les éléments sont en contact), le système d'entraînement en rotation (moteur et broche) et le système de maintien des échantillons (les balais et les bras horizontaux).

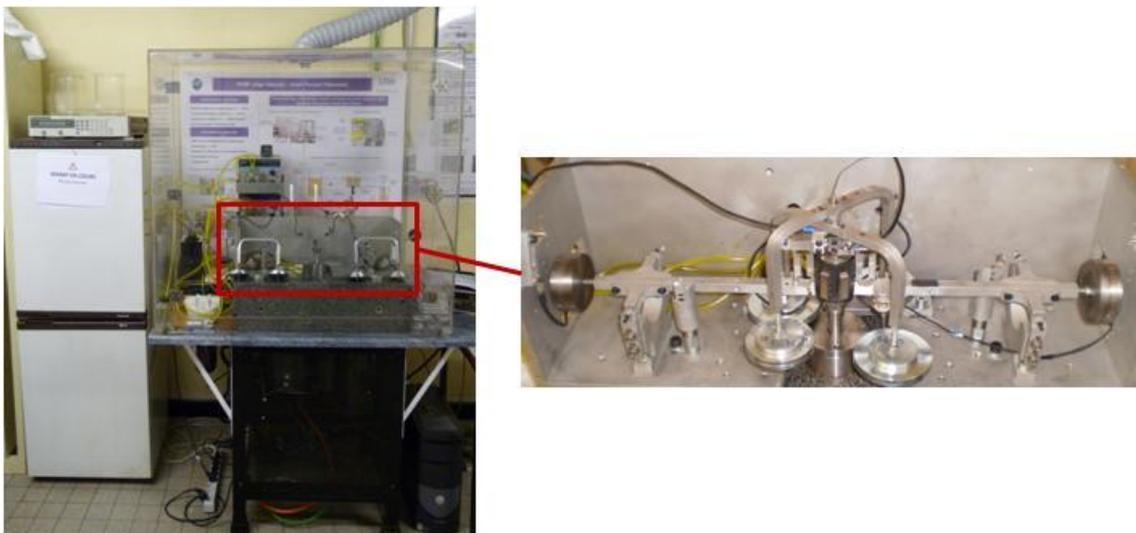


Figure 3.1. Vue globale du tribomètre HVSF.

La cellule de frottement est en polychlorure de vinyle (ou PVC) transparent, ce qui permet de visualiser le contact pendant les différents essais effectués. Elle est installée sur un socle en acier inoxydable et l'étanchéité est assurée par deux joints toriques comme le montre la figure 3.2. La position de l'ensemble de la cellule est assurée par la potence réglable. Un couvercle en deux parties et amovible permet d'éviter l'éjection de fluide au cours de l'essai.

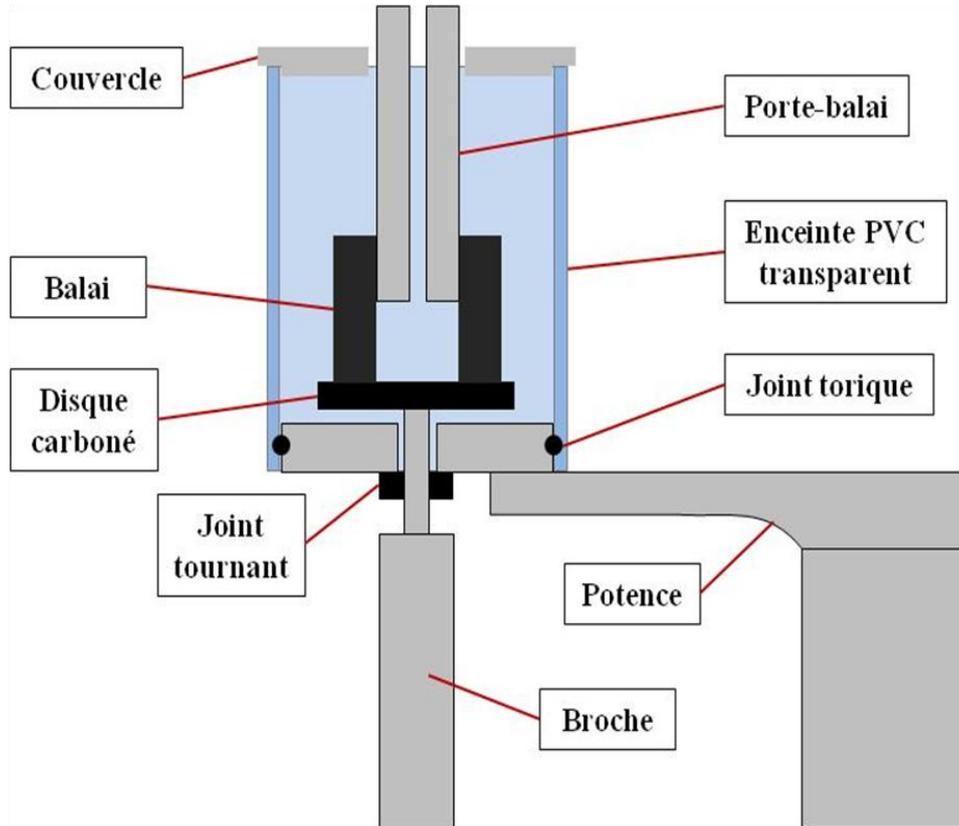


Figure 3.2. Schéma en coupe de la cellule de frottement et de son environnement

Les balais sont maintenus par un système de bras oscillant en liaison pivot avec le bâti du tribomètre. Deux bras sont disposés comme le montre la figure 3.3 et permettent ainsi un bon positionnement des balais. L'effort normal est appliqué de façon verticale sur une pièce de section rectangulaire appelée porte-balai sur laquelle le balai testé est fixé. Les masses mortes sont disposées sur le portique. Le bras est équilibré par la présence d'un contrepoids. Chacun des bras est lié au bâti par une liaison pivot (pointe/cylindre creux graissé) qui induit un faible frottement. Un système comprenant un mât cranté pivotant offre la possibilité de relever le balai du disque avec une distance réglable.

Chaque bras possède un capteur d'effort permettant de mesurer la force de frottement appliquée à chaque balai. L'un des bras maintient un système optique de type diode/récepteur, permettant de connaître à tout instant la perte d'altitude du bras et donc l'usure du contact.

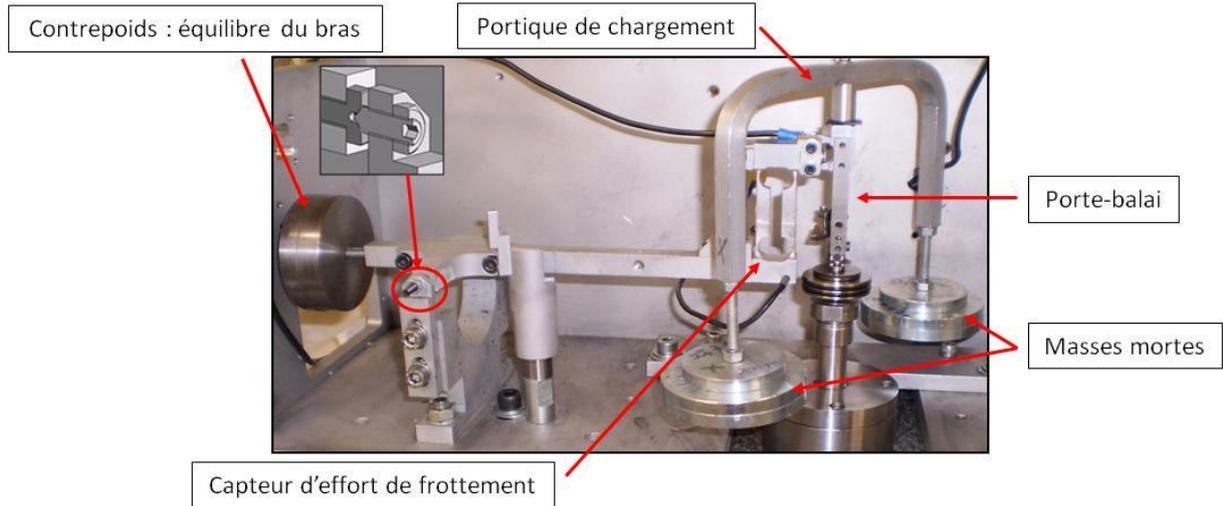


Figure 3.3. Vue d'ensemble d'un bras oscillant constituant le tribomètre HVSF.

Un moteur brushless AC asynchrone est associé à un système multiplicateur de type poulie courroie avec un rapport de 2 sur la vitesse de rotation comme le montre la figure 3.4. Ce système permet d'entraîner en rotation la broche guidée par des roulements. Le disque frotté est fixé sur le haut de la broche (dans la cellule de frottement fixe). Un variateur numérique contrôlé par une interface informatique permet d'atteindre des vitesses de rotation allant jusqu'à 12.000 trs/mn.

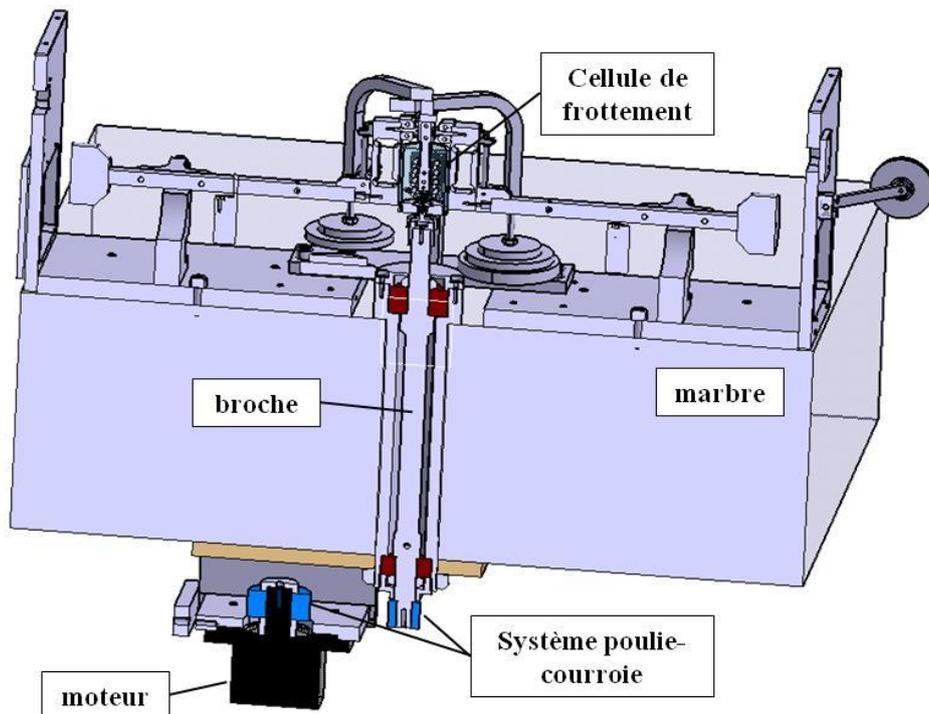


Figure 3.4. Vue en coupe de la broche et de son système d'entraînement sur le tribomètre HVSF

III.1.1.2. Application de l'effort normal

Une charge normale F_n est appliquée verticalement sur chaque balai via le porte-balai par l'intermédiaire d'un portique en forme de U comprenant des masses mortes comme le montre la figure 3.3. Chaque balai possède le même système de chargement. Chaque branche soutient la moitié de la charge souhaitée. Les masses mortes sont fixées à l'aide d'écrous de façon très rigide et possèdent un positionnement défini. La force maximale imposable au système est de 10N.

L'équilibrage de chaque bras est nécessaire afin que la charge appliquée au contact soit strictement la même que celle des masses mortes et ainsi la contrôler totalement. Il s'effectue par le déplacement du contrepoids se situant en bout de bras, le bras étant horizontal et comportant le portique, le porte-balai et les différents écrous.

D'un essai à un autre, les changements de poids des échantillons et la densité du carburant peuvent affecter la valeur de la force normale appliquée au contact. De plus, les différences de hauteur des balais, du disque et l'usure au cours de l'essai conduisent à une imprécision sur la valeur de F_n . Selon (Cornuault 2008) ces variations peuvent être négligées du fait des efforts engendrés et de la distance importante entre le contact et la liaison pivot. Une variation d'altitude du contact de 10mm (erreur peu probable car trop importante) induirait une déviation angulaire du bras inférieure à 3° ce qui conduirait à une variation de $1,2 \cdot 10^{-3}$ N par newtons effectivement chargés (Cornuault 2008).

III.1.1.3. Circulation du courant électrique dans les contacts

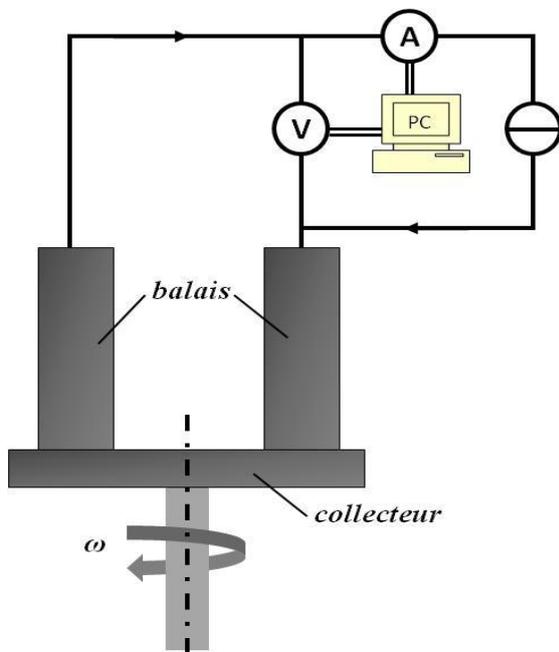


Figure 3.5. Circuit d'alimentation et de mesure électrique du tribomètre HVSF

Une alimentation électrique entraîne la circulation d'un courant continu et unidirectionnel du balai cathodique au disque carboné puis du disque carboné au balai anodique (comme indiqué en figure 3.5).

Ce générateur de courant permet de délivrer une intensité constante dans le circuit électrique pouvant atteindre au maximum 10A.

Des pièces en céramique sont interposées entre le porte-balai et le capteur d'effort pour chaque bras ainsi qu'entre le disque et la broche pour permettre une isolation électrique du contact avec le système environnant.

Un ampèremètre et un voltmètre permettent de mesurer à chaque instant les valeurs de courant et d'intensité pendant l'essai de frottement permettant un calcul post-essai de la résistance électrique (cf. III.1.2.4).

III.1.1.4. Renouvellement du carburant et stabilité thermique

Différents fluides sont utilisés lors du fonctionnement du tribomètre. Nous allons en premier lieu nous intéresser à la circulation du carburant puis à celle du liquide de refroidissement tout en expliquant les différentes étapes de chaque circuit.

Les temps des différentes expérimentations étant très longs (plusieurs heures), le volume de carburant consommé doit être très important. En effet le renouvellement doit être continu dans le contact pour favoriser l'élimination des particules d'usure (se rapprocher au maximum de l'application industrielle).

Il est alors nécessaire de fonctionner en circuit fermé pour limiter cette consommation. Un réservoir en acier inoxydable d'un volume utile de 1.5L permet le stockage du carburant utilisé. Ce réservoir est lui stocké dans une cuve remplie de liquide de refroidissement comme le montre la figure 3.6. La température de ce liquide est comprise entre -5°C et 0°C . L'ensemble des réservoirs est situé dans une enceinte réfrigérée ce qui permet d'assurer le niveau de température et de conserver les fluides à l'abri de la lumière, ce qui permet de conserver les différentes propriétés physiques selon (Cornuault 2008).

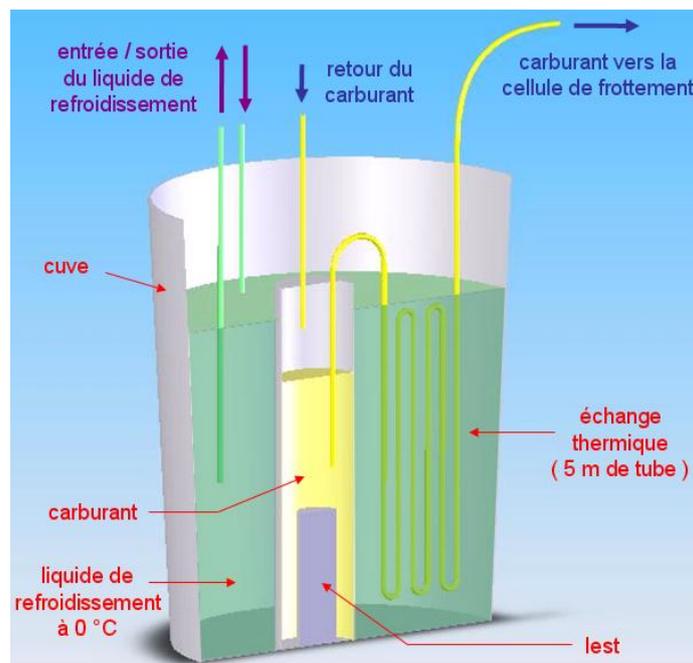


Figure 3.6. Stockage des différents fluides pour le tribomètre HVSF

Le carburant circule en circuit fermé et doit être filtré avant d'être réinjecté dans son réservoir.

Ce circuit est indiqué sur la figure 3.7. Le carburant passe du réservoir à la cellule de frottement représentée sur la figure 3.8 grâce à une pompe péristaltique.. Elle permet d'atteindre un débit volumétrique maximum annoncé de 6L/mn.

Le carburant est ensuite acheminé vers le système de filtration par gravité via le trop plein de la cellule qui permet ainsi de maintenir un volume constant d'environ 28,8 ml. Le débit d'arrivée du fluide dans la cellule est identique à celui de sortie.

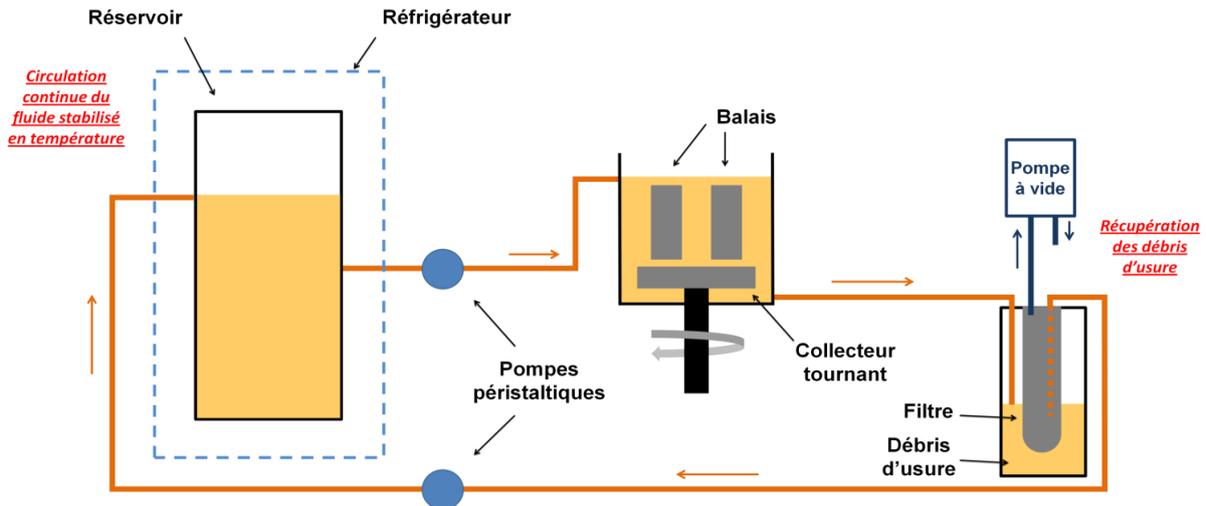


Figure 3.7. Circuit d'alimentation en carburant et de filtration du tribomètre HVSF

Le carburant doit être filtré avant d'être réinjecté dans le circuit fermé dans le but d'éviter que les débris ne soient réinjectés dans le contact. Cette filtration s'effectue grâce à une cartouche céramique dont le seuil de filtration est de $0.45 \mu\text{m}$. Une pompe à vide est utilisée pour créer une dépression dans la cartouche pour aider le mouvement du fluide.

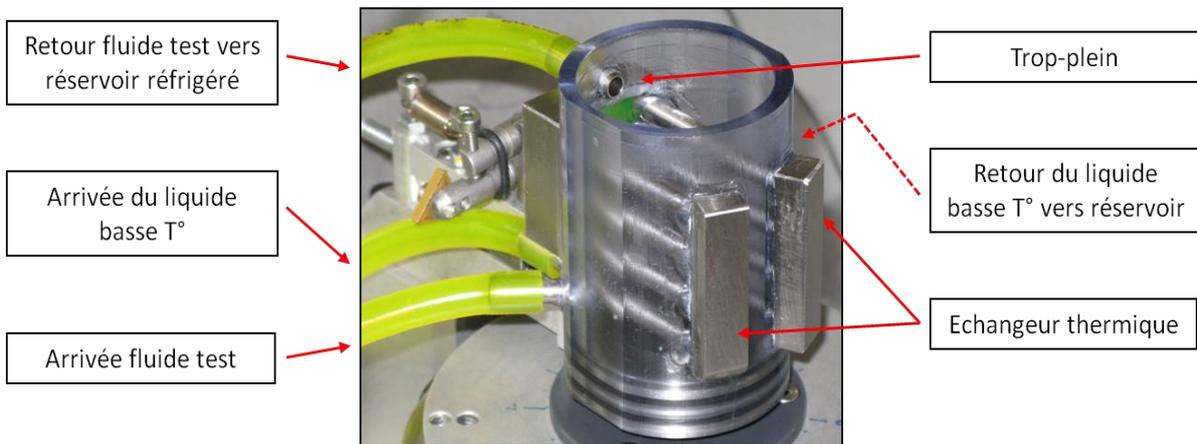


Figure 3.8. Circulation des fluides dans l'enceinte du tribomètre HVSF

Le carburant filtré est ensuite réacheminé vers le réservoir à l'aide d'une seconde pompe péristaltique avec un débit nécessairement égal ou supérieur à celui de l'arrivée en carburant dans la cellule.

Le débit de circulation est limité par le débit de la filtration et une légère décroissance de celui-ci est observée au cours des essais. Ce phénomène est dû à l'obturation des pores de la cartouche céramique par les particules usées. La durée de vie d'une cartouche filtrante est de l'ordre d'une centaine d'heure d'essais.

Les conditions normales d'essai sont un débit de renouvellement de l'enceinte d'environ $1,9 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui correspond à un temps de renouvellement du carburant situé dans l'enceinte d'environ 15 secondes.

Lors d'un essai, le courant électrique circulant dans les contacts est important et induit nécessairement une augmentation non négligeable de la température par effet Joule. Il est alors nécessaire de refroidir la cellule d'essai pour éviter l'évaporation du carburant et avoir une température constante au cours de l'essai (et ainsi éviter toutes formes de dilatations thermiques).

La température du fluide dans la cellule et par conséquent celle des échantillons frottants, est mesurée et enregistrée grâce à un thermocouple de type K situé à environ 12mm du double contact.

Malgré la basse température du carburant arrivant dans la cellule et à cause du faible débit de renouvellement, il est nécessaire d'apporter une source froide supplémentaire. Un échangeur thermique a été placé dans la cellule. Il entoure le double contact. Il est composé de 8 tubes à parois minces en acier inoxydable traversant la cellule de part en part. Ces tubes sont reliés entre eux par des pièces massives en acier inoxydable se trouvant sur les parois extérieures de la cellule comme le montre la figure 3.8 ci-dessus, ce qui permet au liquide de refroidissement de serpenter autour du contact. Il est mis en mouvement à l'aide d'une troisième pompe péristaltique depuis la cuve de stockage se situant dans l'enceinte frigorifique et fonctionne en circuit fermé.

La combinaison des deux sources froides (renouvellement du carburant + échangeur thermique) permet de maintenir une température autour de 30°C ($28^{\circ}\text{C} < T < 32^{\circ}\text{C}$) pendant plusieurs dizaines d'heures pour une puissance électrique circulant dans le double-contact de 35W et une vitesse linéique de glissement moyenne de 8.2 m/s.

III.1.1.5. Stabilité dynamique du contact

La problématique industrielle impose des vitesses de rotations élevées et de faibles pressions de contact. Ces deux paramètres induisent des phénomènes dynamiques pouvant créer un comportement vibratoire non négligeable et sans doute influents sur le comportement lors des essais. Il est alors nécessaire de les minimiser autant que possible. On peut alors espérer une reproductibilité acceptable des essais et donc une exploitation plus aisée des mesures enregistrées non bruitées.

Deux aspects ont été identifiés :

- l'excitation provoquée par le fonctionnement du tribomètre de par ses différents composants
- le voile possible présent sur les échantillons qui associé aux vitesses élevées va exciter le système.

La première source possible de vibrations est comme indiquée précédemment, l'excitation du système mécanique i.e. le tribomètre par l'intermédiaire d'éléments tels que le moteur entraînant la broche, la rotation des différentes pompes péristaltiques...etc.

Afin de mettre en évidence l'effet des vibrations propres du système sur les mesures des efforts de frottement, nous avons effectué un essai au cours duquel la vitesse de rotation varie linéairement avec le temps (augmentation puis diminution). Ce balayage en vitesse de rotation a été réalisé sur le système complet de façon à prendre en considération les différents couplages pouvant exister. La figure 3.9 montre l'évolution de l'effort tangentiel sans contact balai/collecteur lors du fonctionnement du tribomètre. Ce test permet aussi de mettre en évidence les efforts induits par la mise en mouvement du fluide présent dans l'enceinte et se répercutant sur les porte-balais (entraînant alors un effort tangentiel supplémentaire). Lors de cet essai, on note deux pics d'effort (même position en augmentant ou diminuant la vitesse). Les efforts tangentiels mesurés se situent autour de 3grs tandis les fréquences d'excitation qui sont estimées à 73 et 141 Hz correspondant à des vitesses de rotation de la broche de 4400 et 8500 trs/mn.

On peut remarquer que les différentes fréquences de résonance ont volontairement été déplacées au maximum vers les hautes fréquences, en modifiant certaines structures et leur souplesse de manière empirique.

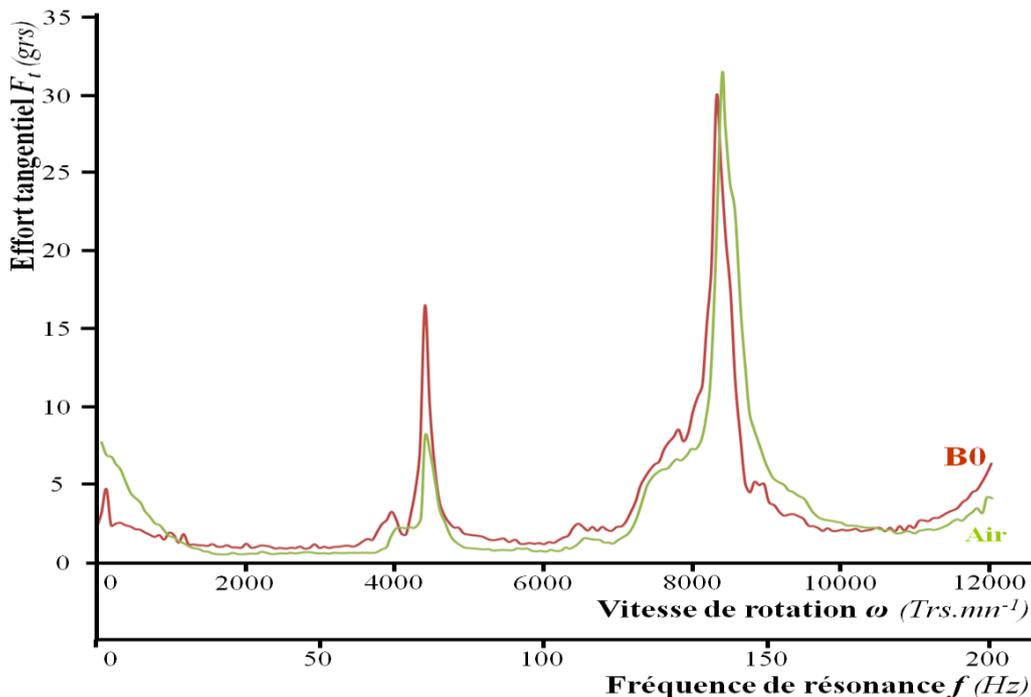


Figure 3.9. Mesure de l'effort tangentiel dans l'enceinte du tribomètre HVSF sous une sollicitation variable et sans contact balai/collecteur.

L'échangeur thermique de la cellule de frottement permet probablement de réduire la mise en mouvement du liquide ce qui conduit à une variation d'effort négligeable par rapport à ceux mesurés lors des essais (les efforts tangentiels représentant seulement 2 à 4% des efforts de frottements).

La deuxième source de vibrations provient d'un éventuel voile (défaut de planéité) du disque carboné qui peut être dû à un mauvais centrage par rapport à l'axe de la broche (la surface

initiale (après fabrication) est bombée). Selon (Cornuault 2008), il est nécessaire que la valeur du voile soit inférieure à 15 μm pour pouvoir considérer un glissement du balai sur le disque sans un effet de portance par le fluide.

Pour assurer ce voile minimum, le tribomètre possède un système d'usinage in-situ présenté sur la figure 3.10.

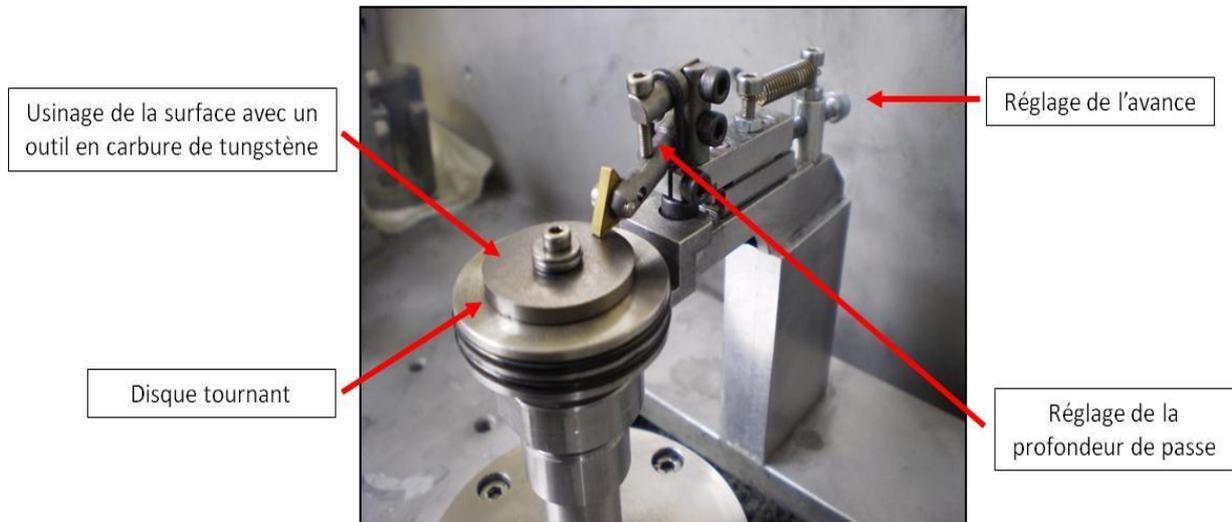


Figure 3.10. Système d'usinage in-situ des collecteurs sur le tribomètre HVSF

Ce système d'usinage reprend le principe du tournage. Un outil en carbure de tungstène est guidé en translation par l'intermédiaire d'une glissière. La profondeur de passe est réglable. Un balayage manuel radial du disque est effectué grâce au système d'avance. Cette étape correspond à une opération de dressage de la surface qui va être testée. Des systèmes de types élastiques/ressorts permettent d'exercer des forces de rappel sur l'avance et la profondeur de passe. Ce système est ensuite rétractable pour permettre le déroulement des essais. L'avantage de ce système réside dans le fait que tout cercle de la surface de contact du disque dont le centre est situé sur l'axe de rotation présente une même altitude sur son périmètre. Sur chacun de ces cercles, le voile est sensé être nul.

La figure 3.11 permet de comparer des relevés topographiques effectués radialement par profilométrie tactile de la surface du disque brute avant et après usinage et polissage. La variation d'altitude dans le sens radial de la surface est de 15 μm maximum dans la zone de contact balai/collecteur.

Nous pouvons noter que différents défauts de formes induits par l'usinage et le polissage peuvent apparaître en périphérie du disque et en limite maximum d'usinage. Cependant ces défauts sont négligés du fait de leur position hors de la zone de contact balai/collecteur.

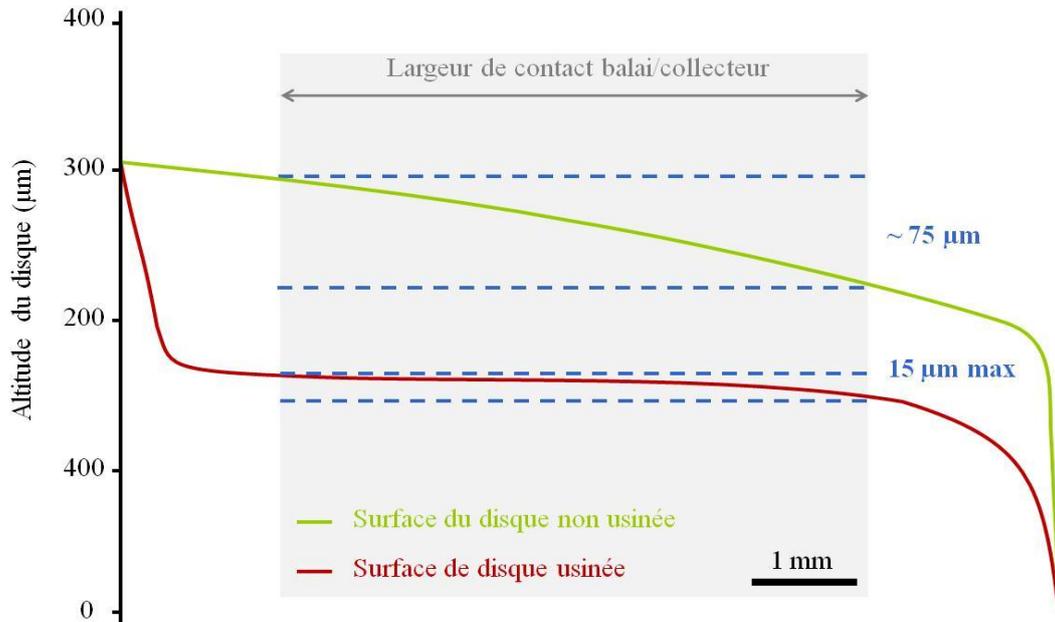


Figure 3.11. Comparaison des profils d'un disque avant et après usinage et polissage in-situ sur le tribomètre HVSF.

III.1.2. Mesures et acquisitions des paramètres d'entrée et de sortie

III.1.2.1. Méthode d'acquisition des données

L'effort normal appliqué est supposé constant. Le dispositif expérimental permet de mesurer différents paramètres d'entrée et de sorties :

- la température proche des contacts,
- l'effort tangentiel pour chaque balai permettant ainsi de connaître le coefficient de frottement,
- la position verticale d'un balai,
- l'intensité du courant électrique traversant le double contact ainsi que la différence de potentiel du double contact permettant de calculer la résistance de contact.

Le voltmètre ainsi que l'ampèremètre mesurant respectivement la tension et le courant aux bornes du double contact sont tous deux directement reliés à un port COM de l'ordinateur via les sorties basse tension de chaque appareil. Les valeurs numériques des mesures sont ainsi directement obtenues.

Pour les autres mesures, le signal brut des différents capteurs est amplifié via un conditionneur pour obtenir une tension analogique comprise entre 0 et 10 Volts compatible avec la carte d'acquisition de l'ordinateur.

Pour les différents types de connexion, un programme développé au laboratoire permet l'acquisition et le stockage des données. Ce programme permet de lire les données analogiques ou numériques et d'étalonner les capteurs. L'étalonnage des capteurs à sorties analogiques revient à convertir la tension envoyée en une grandeur physique que l'on souhaite mesurer.

La figure 3.12 schématise la méthode d'acquisition des données sur le tribomètre HVSF. A partir du signal brut, le logiciel permet de choisir un mode d'acquisition des points en définissant la période et la durée d'acquisition ainsi que le nombre de points à acquérir pendant cette durée et dont la moyenne correspondra à la mesure enregistrée.

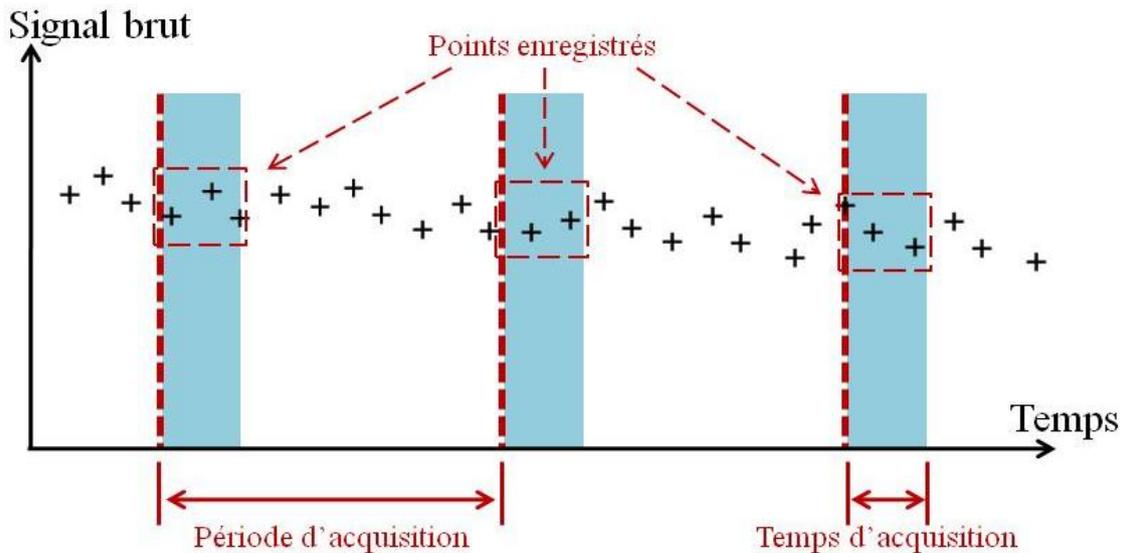


Figure 3.12. Méthode d'acquisition des données sur le tribomètre HVSF

Le programme permet également de choisir et contrôler la vitesse de rotation du moteur qui peut être constante ou linéairement variable au cours de différentes séquences dont la durée doit être également définie.

A la fin de chaque essai, le programme permet d'obtenir un fichier texte dans lequel apparaissent la mesure de l'intensité du courant, la tension aux bornes du double contact, la température au plus proche des balais, les efforts appliqués à chaque balai, la position verticale d'un balai et la vitesse de rotation ainsi que la mesure du temps associée aux précédentes valeurs.

III.1.2.2. Mesure du coefficient de frottement

La charge normale appliquée à chaque balai étant connue; Le coefficient de frottement est égal au ratio effort tangentiel mesuré sur effort normal appliqué.

Chaque bras horizontal possède un capteur d'effort permettant de mesurer les efforts transmis au balai pendant le frottement avec le disque carboné. Visible sur la figure 3.13, le capteur est un corps parallélépipédique creux pour permettre une grande déformabilité lorsqu'il est sollicité en traction et compression et rester très rigide dans les deux autres directions de sollicitation.

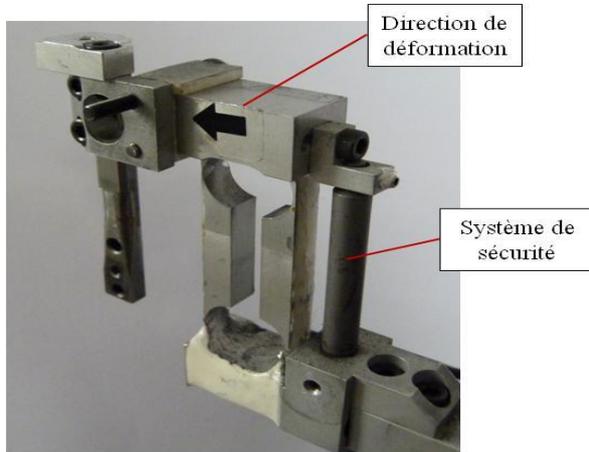


Figure 3.13. Capteur d'effort tangentiel présent sur le tribomètre HVSF

Des jauges de déformation basées sur le principe du pont de Wheatstone sont collées sur les parois extérieures verticales du corps. La déformation créée par le frottement va entraîner une variation de potentiel aux bornes du pont qui est alimenté sous une faible tension. Un conditionneur permet d'amplifier le signal émis pour ensuite être transmis au programme d'acquisition des données.

La figure 3.13 permet aussi de mettre en avant que le positionnement du balai sur le disque strictement dans le même axe que le bras horizontal, permet une sollicitation du capteur d'effort en traction pure lorsque la rotation du disque est dans le sens horaire.

Le capteur est situé au plus proche du contact balai-collecteur. La liaison avec le balai est assurée par une structure dont la rigidité est largement supérieure au capteur d'effort pour assurer la transmission des efforts et donc la déformation du capteur seul.

Les valeurs attendues en se basant sur des études précédentes effectuées par (Cornuault 2008), (Dufour 2008), sont de l'ordre d'une centaine de millinewtons pour l'effort ce qui correspond à un coefficient de frottement inférieur à 0.1. En raison de ces charges normales pouvant être appliquées, le capteur est dimensionné pour pouvoir mesurer des efforts pouvant atteindre 5N. Afin de rester dans le domaine élastique lors de la déformation sans entrer dans le domaine plastique, une tige de sécurité rigide et réglable est positionnée en arrière du capteur pour limiter l'effort maximum imposable au système à 4N.

L'étalonnage des capteurs d'efforts est nécessaire pour permettre la conversion du signal amplifié en effort transmis au balai. Il s'effectue en appliquant une sollicitation en traction au capteur permettant la construction d'une courbe étalon correspondant à la charge appliquée en fonction du signal transmis par le capteur (variation du potentiel des jauges). L'évolution de cette courbe doit être linéaire, ce qui correspond à la caractéristique du capteur.

Un mât cranté permet de laisser le bras libre (contact du balai sur le disque) ou de maintenir une faible position angulaire (réglable) du bras avec l'horizontale (moins d'un millimètre sépare les surfaces du balai et du disque).

Cette dernière configuration est celle correspondante à l'étalonnage. Comme le montre la figure 3.14, l'application de la charge est normale au balai et dans la direction du bras. Elle s'effectue par des masses mortes via un fil suspendu parallèle à l'axe du bras. Bien que les éléments constituant le porte-échantillon situés entre le capteur et le balai soient considérés comme indéformables, l'accroche du chargement s'effectue au plus proche du contact (dans les trous de fixation du balai).

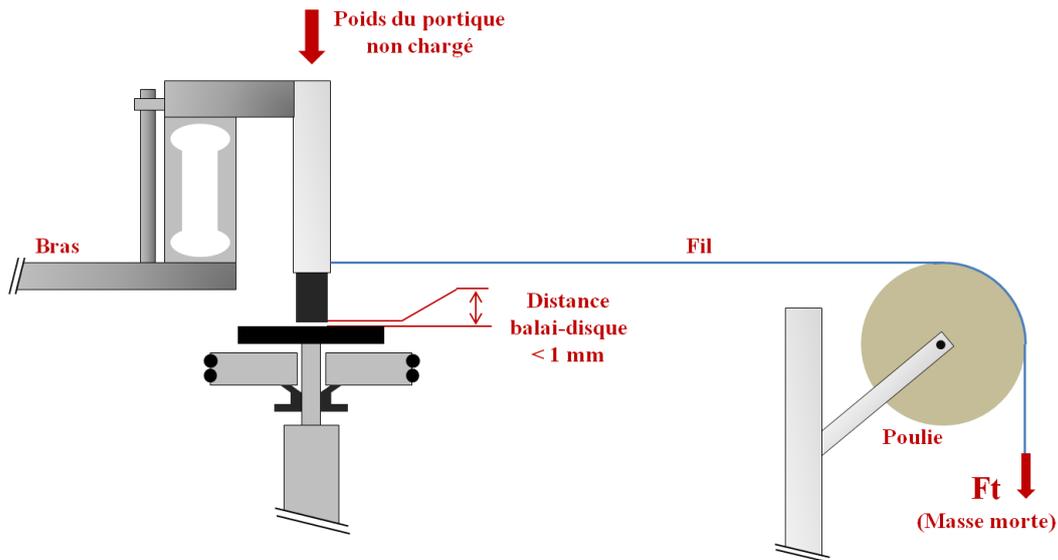


Figure 3.14. Principe d'étalonnage d'un capteur d'effort du tribomètre HVSF.

Cependant la mesure de l'effort n'est pas directe. En effet l'effort F_t de frottement doit tenir compte des efforts induits par la mise en mouvement du fluide au sein de la cellule. Ainsi lors de l'essai, l'effort mesuré par le capteur f est la somme des efforts de frottements F_f et de la force F_f correspondant aux forces surfaciques exercées sur le balai et le porte-balai par le fluide entraîné en rotation comme le montre la figure 3.15.

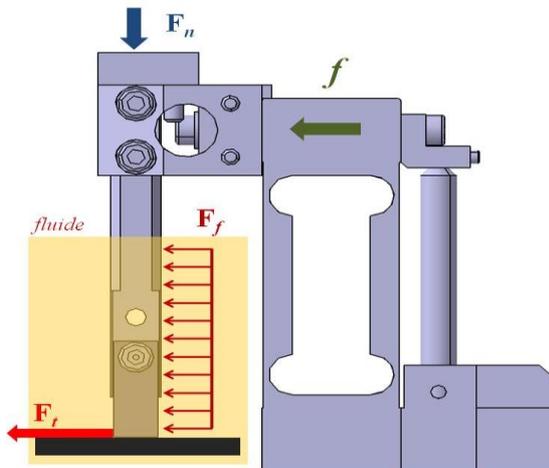


Figure 3.15. Bilan des forces exercées sur un capteur d'effort lors du frottement

Ainsi le calcul du coefficient de frottement est dépendant des différents efforts comme suit :

$$f = F_t + F_f \quad \text{Equation 3.1}$$

$$\mu(t) = \frac{F_t(t)}{F_n(t)} = \frac{f - F_f}{F_n} \quad \text{Equation 3.2}$$

Les efforts F_f sont dépendants du positionnement du bras, de la vitesse de rotation du disque, de la viscosité du fluide et de la température qui varie au cours d'un essai entre 28 et 32°C. Cependant la géométrie de la cellule ainsi que la disposition des tubes de l'échangeur thermique permettent de minimiser ces efforts. La figure 3.9 présente au §3.1.1.5 montre les faibles efforts mis en jeu qui sont proche de 15mN tandis que la valeur de F_t est proche de 1,5N, ce qui représente une erreur potentielle de seulement quelques pourcents.

III.1.2.3. Mesure de la position verticale d'un balai

La figure 3.16 montre le système de mesure de la position verticale d'un des balais au cours de l'essai. Une diode laser est fixée sur le bras à proximité du capteur d'effort et une cellule photoélectrique captant son faisceau est fixée au bâti.

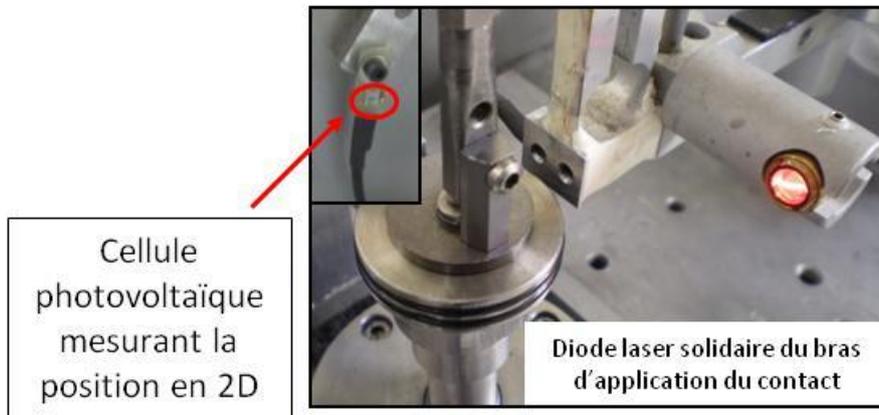


Figure 3.16. Circuit d'alimentation en carburant et de filtration du tribomètre HVSF

L'usure simultanée du disque carboné et du balai induit une baisse de l'altitude du contact qui correspond à la légère rotation du bras et ainsi à l'abaissement vertical de la position du spot laser émis par la diode sur la photocellule. La variation locale de l'intensité lumineuse sur la photocellule se traduit par une variation de tension qui est amplifiée avant d'être communiquée au programme d'acquisition des données. Un étalonnage doit être effectué au préalable à l'aide d'une butée micrométrique située à la place du balai.

La position verticale du balai au cours du temps peut ainsi être connue avec une précision d'1 μm lorsque le contact s'effectue à température ambiante. Cependant le courant circulant dans les contacts entraîne un effet Joule non négligeable qui malgré le refroidissement permanent de la cellule peut entraîner une dilatation thermique des échantillons et porte-échantillons.

Des essais réalisés en statique ont permis de mettre en évidence cet effet Joule qui se traduit par une variation d'altitude proche d'un micron par degré. Durant l'essai la température varie de 28 à 32°C, ce qui induit une erreur maximum d'altitude d'environ 4 µm, soit environ quelques pourcents de l'altitude maximum mesurée lors des essais.

Cependant il est nécessaire de préciser que la connaissance de la position verticale du balai :

- ne donne pas accès aux usures séparées du balai et du disque, mais donne une information sur l'usure générale du contact balai-collecteur,
- permet de mesurer une perte de cote maximale qui dépend de l'inclinaison du balai par rapport à la surface du disque.

Les essais effectués sur le tribomètre HVSF se situent dans ce second cas (correspondant à un défaut d'alignement) malgré les précautions prises lors de la mise en place et préparation des échantillons.

Dans le cas d'une usure faible comme le montre la figure 3.17 a), la perte de cote Z mesurée par le système correspond à la somme des pertes de cote du balai et du disque uniquement au point de contact d'altitude minimale et vaut :

$$Z = (Z_R)_{max} \cdot \cos \alpha \quad \text{Equation 3.3}$$

$(Z_R)_{max}$ correspond à la perte de cote réelle maximale du contact.

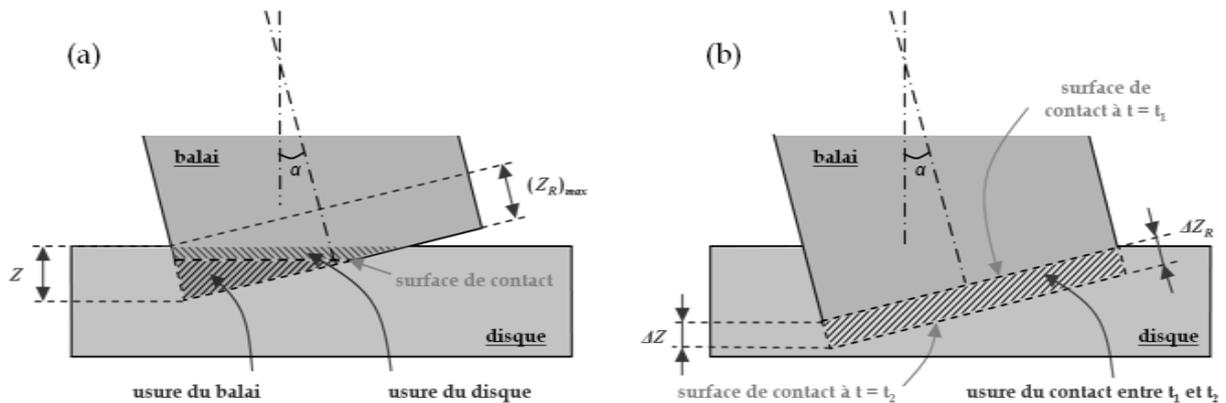


Figure 3.17. Conséquences d'un défaut d'alignement sur l'usure du contact entre le balai et le collecteur sur le tribomètre HVSF selon (Cornuault 2008)

Dans le cas d'une usure forte (surface apparente du balai entièrement en contact) schématisé sur la figure 3.17 b), si l'on considère deux temps t_1 et t_2 , la perte de cote ΔZ vaut :

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = \Delta Z_R \cdot \cos \alpha \quad \text{Equation 3.4}$$

Avec Z_1 et Z_2 correspondent aux altitudes mesurées par le système à t_1 et t_2 .

Pour une faible valeur de l'angle α ($\cos(\alpha)=1$), nous pouvons considérer que la surface de contact égale à la surface apparente du balai se déplace verticalement d'une distance Z et vaut :

$$Z = Z_{balai} + Z_{disque} \quad \text{Equation 3.5}$$

Durant les essais il est alors nécessaire de garantir un angle α très faible et des surfaces opposées les plus planes possibles. La première condition est réalisée grâce à une observation effectuée à l'œil nu tandis que la deuxième s'effectue à l'aide d'un polissage fin. En effet, comme expliqué précédemment le disque carboné est usiné puis poli in-situ à l'aide de papier abrasif jusqu'au grade #4000.

III.1.2.4. Mesure de la résistance électrique du double contact

Le système étudié sur le tribomètre HVSF est de type double pion-disque. La mesure d'un contact unique pion-disque n'est pas techniquement possible à cause des très hautes vitesses utilisées ainsi que du fort ampérage circulant dans le contact.

La mesure du double contact R_{2c} est cependant réalisable. La tension et le courant circulant dans les interfaces sont enregistrés en fonction du temps, ce qui nous permet de connaître la résistance du double contact.

Cependant, malgré les efforts d'isolation des éléments supportant les échantillons (bras...etc.), le courant traverse diverses structures (porte-balais et leurs supports) avant d'atteindre le double contact. La conduction est donc modifiée, nous parlerons de résistance interne.

Une mesure de cette résistance interne a été évaluée en mesurant la tension aux bornes du contact en fonction de différents ampérages en s'affranchissant des interfaces de contact (remplacement de celles-ci par un câblage en fil de cuivre) selon (Cornuault 2008). La structure possède un comportement ohmique dont la résistance interne R_{int} a été évaluée à $0,26 \Omega \pm 0,02$.

La résistance du double contact R_{2c} s'exprime en fonction de la tension U et du courant I en fonction du temps par l'équation suivante :

$$R_{2c}(t) = \frac{U(t)}{I(t)} - R_{int} \quad \text{Equation 3.6}$$

III.1.3. Procédure d'essai

La première étape d'un essai est la préparation des balais et des collecteurs utilisés. Ils sont usinés puis polis in-situ à l'aide de papier abrasif (grade maximum #4000). Le système de filtration permet des durées d'essais très importantes (plusieurs heures consécutives) et n'est donc pas un facteur limitant. Le débit d'alimentation en carburant de la cellule de frottement du tribomètre est plus important que le débit de filtration du carburant. La cartouche

céramique permettant la filtration des débris est changée lorsque le couple de matériaux d'essai est différent.

Ensuite, le logiciel de pilotage du tribomètre et d'acquisition des données permet de déterminer les différentes phases de l'essai en termes de vitesses de rotation, et de durées des différentes séquences pendant lesquelles seront enregistrées les données de température, de l'effort normal, de la position verticale du balai, de la tension et du courant circulant dans le contact. La tension et le courant circulant dans le contact peuvent être modifiés en cours d'essai.

Selon l'objectif de l'essai, il est possible de réaliser des rampes d'accélération et de décélération de la vitesse ou de la laisser constante.

III.2. Etude du contact expérimental

III.2.1. Géométrie et cinématique du contact

La géométrie du contact est particulière. En considérant que les surfaces sont alignées, le contact présente une géométrie de type plan/plan dont la surface apparente A_0 qui est égale à la surface frottante du balai d'une valeur égale à $31,3 \text{ mm}^2$. La figure 3.19 permet la description géométrique du contact lorsque le disque est animé d'une vitesse de rotation ω .

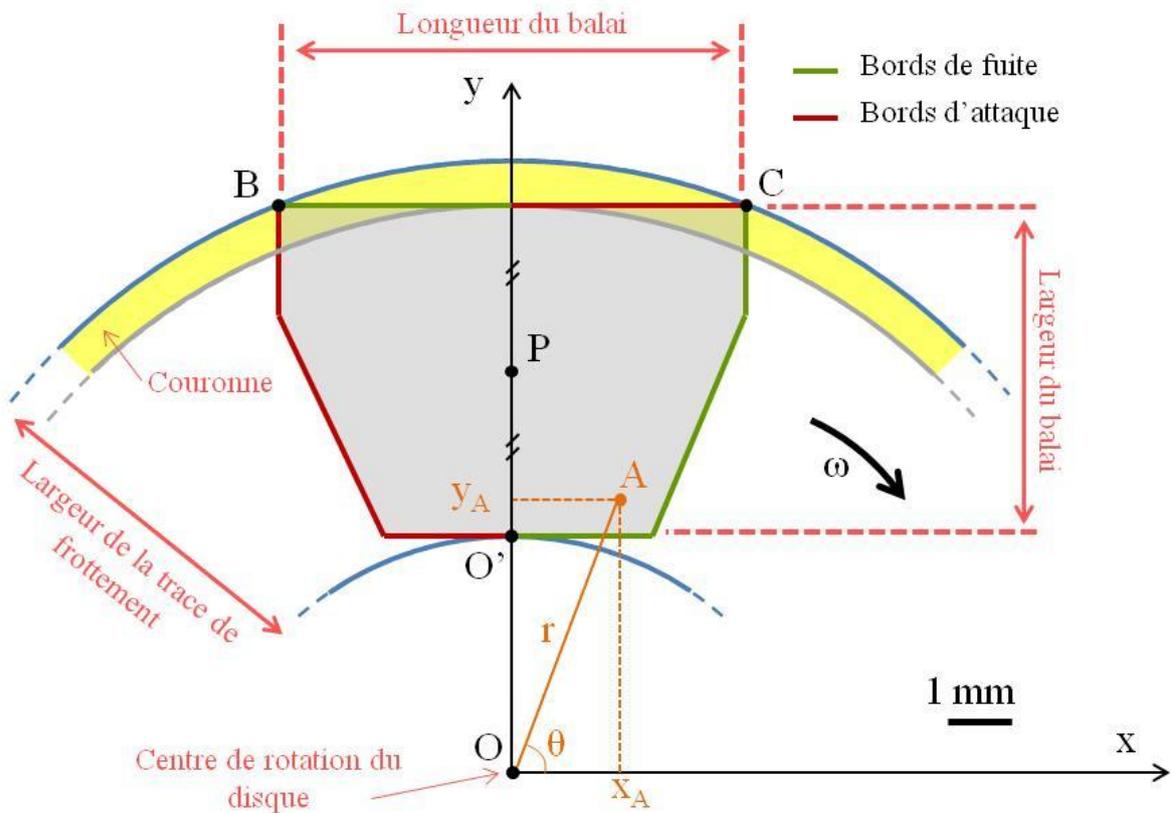


Figure 3.19. Description géométrique d'un contact balai-collecteur sur le tribomètre HVSF

Des bords de fuite et d'attaque sont mis en évidence selon le sens de rotation (horaire). La zone correspondante à la couronne présente ces deux cas simultanément. Un point A situé sur la surface A_0 repéré en coordonnées cylindriques va permettre de calculer les différentes vitesses linéiques de glissement et la longueur cinématique du contact.

Concernant le disque carboné, la vitesse linéique d'un point de sa surface et la longueur cinématique associée sont indépendantes de θ et, pour une vitesse de rotation ω donnée, sont des fonctions linéairement croissantes en fonction de r . La longueur cinématique est minimale et égale à 28,3 mm en O' et maximale et vaut 64,5 mm aux points B et C.

Concernant le contact, les calculs de la vitesse linéique de glissement et de la longueur cinématique ont été étudiés par (Cornuault 2008). Il met en évidence les grandes disparités sur la surface de contact. La vitesse linéique peut être doublée d'un extremum à l'autre (2,8 pour 6,5 $m.s^{-1}$). Cependant la variation de la vitesse est moindre dans le sens de la longueur du balai ce qui signifie que l'effet de la distance au centre de rotation l'emporte sur l'inhomogénéité géométrique du balai. La longueur cinématique du balai reste globalement comprise entre 4,5 et 7,2mm. Les points O' , B et C restent des zones de contact particulières dans lesquelles le rapport L_{disque}/L_{balai} augmente drastiquement.

Pour la suite de l'étude, tout en gardant en mémoire la grande disparité des valeurs de vitesses et de longueurs cinématiques dans le contact, la cinématique du contact sera décrite par celle du point P situé à mi-longueur et mi-largeur du balai par :

$$V = 0,821 \cdot 10^{-3} \cdot \omega \quad (\text{avec } V \text{ en } m.s^{-1}, \text{ et } \omega \text{ en } trs.mn^{-1}) \quad \text{Equation 3.7}$$

$$L_{balai} = 6 \text{ mm} \quad \text{Equation 3.8}$$

$$L_{disque} = 49,24 \text{ mm} \quad \text{Equation 3.9}$$

III.2.2. Corrélation avec l'application industrielle

Le tribomètre HVSF permet de contrôler les paramètres d'entrée que sont la vitesse de rotation du disque, l'effort normal appliqué aux balais, le courant circulant dans le contact, mais aussi de mesurer certains paramètres de sortie pertinents comme le coefficient de frottement ou encore la résistance du double contact de type double pion-disque pouvant être immergé et/ou électrifié. Le tribomètre a été développé afin d'étudier le contact balai-collecteur d'une pompe de gavage automobile. Il est donc nécessaire que ces caractéristiques d'essai soient les plus proches possibles de l'application industrielle visée.

- La géométrie de contact :

Les échantillons utilisés lors des essais proviennent directement de l'usine de fabrication du partenaire industriel associé à ce projet. Ainsi nous pouvons considérer que les caractéristiques géométriques et que la configuration générale sont respectées.

- L'effort normal appliqué :

Le tribomètre permet l'application de l'effort normal F_n sur chaque balai allant de 1 à 10N. Selon (Cornuault 2008) et les données industrielles, l'effort appliqué aux balais via le ressort de la pompe, diminue dans le temps à cause de l'usure des balais. Cet effort varie de 5 à 2N. Les charges admissibles sur le tribomètre permettent de couvrir cette plage d'effort normal.

- La température et l'environnement :

Les températures d'essais sont proches de l'ambiante sur le tribomètre HVSF, ce qui correspond au cas réel. Le volume de fluide environnant le contact est sensiblement identique à celui des pompes de gavage.

- Le courant circulant dans le contact :

L'intensité traversant le double contact sur le tribomètre HVSF peut aller de 1 à 10 Ampères. Elle correspond sensiblement à la gamme d'intensité pour le fonctionnement des pompes qui se situe entre 5 et 11A.

- La vitesse de rotation :

La mise en place d'un nouveau système d'entraînement en rotation permet au collecteur d'atteindre une vitesse de rotation allant jusqu'à 12000 trs/mn. Les pompes industrielles tournent généralement à une vitesse comprise entre 5000 et 8000 trs/mn mais la tendance vise à augmenter cette vitesse pour être plus proche de 10000 trs/mn. Les conditions de rotation sont donc acceptables pour l'étude visée.

III.3. Conclusion

Le tribomètre HVSF créé puis développé au sein du laboratoire LTDS est un dispositif informatisé de mesures répondant parfaitement aux contraintes définies par le fonctionnement de la pompe de gavage. Il est adapté à l'étude du double contact balais-collecteur.

L'emploi du tribomètre HVSF nécessite cependant une certaine "application expérimentale" en raison de la complexité du tribo-système étudié. En effet le contact est traversé par un courant électrique et immergé dans un fluide de type diesel. De plus le fort ampérage et les hautes vitesses de rotation associés à de faibles charges normales appliquées au balai ne facilitent pas la reproductibilité des différents essais. Compte tenu de cette complexité, l'utilisation du tribomètre HVSF nécessite une excellente connaissance de son fonctionnement et implique le respect de procédures d'essais délicates.

L'atout majeur du tribomètre HVSF réside dans sa capacité à mesurer en continu et en simultané le coefficient de frottement, le taux d'usure et la résistance du double contact lors d'un même essai. Les dispositifs expérimentaux exposés dans la littérature (Uecker), (Zaidi et

al. 1995), (Kuhlmann-Wilsdorf 1996), (Lancaster b), (Lancaster a), (Jones 2004) n'égalent pas ces capacités expérimentales.

Le tableau 3.1 ci-dessous récapitule les conditions d'essai, les paramètres d'entrée et de sortie du tribomètre HVSF.

<i>Conditions d'essais</i>	<i>Paramètres d'entrée</i>	<i>Paramètres de sortie</i>
Double contact <i>type pion-plan</i>	Charge normale F_n : <i>1 à 10 N</i>	$F_t(t)$ <i>[résolution 1mN]</i>
Immersion des contacts <i>(V = 28,8 mL)</i>	Courant électrique continu I : <i>0 à 10 A</i>	Position $Z(t)$ sur un contact <i>[résolution 1μm]</i>
Stabilité de la température <i>(échangeur thermique)</i>	Vitesse de rotation ω : <i>Jusqu'à 12.000 trs/mn</i>	Résistance électrique de contact $R_{2c}(t)$ <i>[résolution 10mΩ]</i>
Circulation du fluide avec une filtration	Environnement : <i>De type diesel</i>	

Tableau 3.1. Conditions d'essai et paramètres d'entrée et de sortie du tribomètre HVSF.

III.4. Bibliographie

Cornuault, P.-H., 2008. *Contribution à l'étude du comportement tribologique de matériaux carbonés pour applications électriques*. thèse. Ecully: Ecole Centrale de Lyon. N° ordre 2008/17.

Cornuault, P.-H., Nauleau, B. & Kapsa, P., 2008. A new tribometer to measure wear and low-friction of high velocity sliding electrical contacts immersed in organic liquids. Dans ICEC. Saint Malo.

Dufour, A., 2008. *Etude de l'évolution des propriétés physico-chimiques des matériaux carbonés utilisés dans les moteurs à courant continu*. thèse. Mulhouse: université de Haute-Alsace. N° d'ordre 2008

Jones, G.A., 2004. On the tribological behaviour of mechanical seal face materials in dry line contact: Part II. Bulk ceramics, diamond and diamond-like carbon films. *Wear*, 256(3-4), p.433-455.

Kuhlmann-Wilsdorf, D., 1996. What role for contact spots and dislocations in friction and wear? *Wear*, 200(1-2), p.8-29.

Lancaster, J.K., a. The influence of arcing on the wear of carbon brushes on copper. *Wear*, 6(5), p.341-352.

Lancaster, J.K., b. the relationship between the wear of carbon brush materials and their elastic moduli. *British Journal of Applied Physics*, 14, p.pp. 497-505.

Uecker, A., Lead-free carbon brushes for automotive starters. *Wear*, 255(7-12), p.1286-1290.

Zaidi, H., Robert, F. & Paulmier, D., 1995. Influence of adsorbed gases on the surface energy of graphite: consequences on the friction behaviour. *Thin Solid Films*, 264(1), p.46-51.

Comportement tribologique et usure des contacts

Ce chapitre a pour but de présenter les différentes observations et conclusions apportées suite aux essais effectués sur les matériaux carbonés présents dans la pompe à carburant. Une première partie concernera l'aspect tribologique du double contact balais-collecteur par des essais de frottement puis une seconde apportera des éléments de réponse nécessaire à la compréhension des phénomènes mis en jeu lors du fonctionnement de la pompe de gavage d'un point de vue électrique. Un modèle élémentaire d'usure schématisant le processus d'usure des matériaux sera alors proposé.

Sommaire

CHAPITRE IV.	93
COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE ET USURE DES CONTACTS	93
IV.1. DESIGNATIONS ET CONVENTIONS	94
IV.2. FROTTEMENT ET USURE DE MATERIAUX CARBONES	95
IV.2.1. <i>Comportement tribologique du double contact</i>	95
IV.2.2. <i>Influence des conditions d'essais</i>	99
IV.2.3. <i>Mécanismes d'usure : vers un modèle phénoménologique d'usure</i>	104
IV.3. CREATION D'ARCS ELECTRIQUES UNIQUES	109
IV.3.1. <i>Dispositif expérimental</i>	109
IV.3.2. <i>Phénomènes induits par l'arc d'ouverture unique</i>	112
IV.3.3. <i>Discussions – modèle d'endommagement par arc</i>	121
IV.4. DISCUSSIONS : VERS UN MECANISME ELEMENTAIRE D'USURE	127
IV.5. BIBLIOGRAPHIE	130

IV.1. Désignations et conventions

Les essais sont réalisés en utilisant deux balais de matériau identique frottant sur un disque. Les disques peuvent être de nuance de matériau identique aux balais ou différente. Ainsi, pour améliorer la compréhension lors de la désignation de ces nuances, le couple balais - collecteur sera nommé X_bY avec X représentant le matériau des balais et Y celui du disque.

Le sens du courant traversant chaque balai est différent comme le montre le schéma 4.1 ci-dessous. Le balai anodique (récepteur d'électrons) sera nommé balai positif et le balai cathodique (donneur d'électrons) sera nommé balai négatif. Lors d'une rotation, chaque point de la surface frottée du disque est alternativement donneur et receveur d'électrons au cours du temps selon le balai en contact.

Il est nécessaire de rappeler l'appellation du fluide constituant l'environnement du tribocontact étudié. Ce milieu est constitué de diesel non additivé auquel il peut être mélangé différents pourcentages massiques d'Esters Méthyliques d'Huiles Végétales selon les essais. Ainsi, le fluide testé sera nommé B_x avec x représentant le pourcentage utilisé.

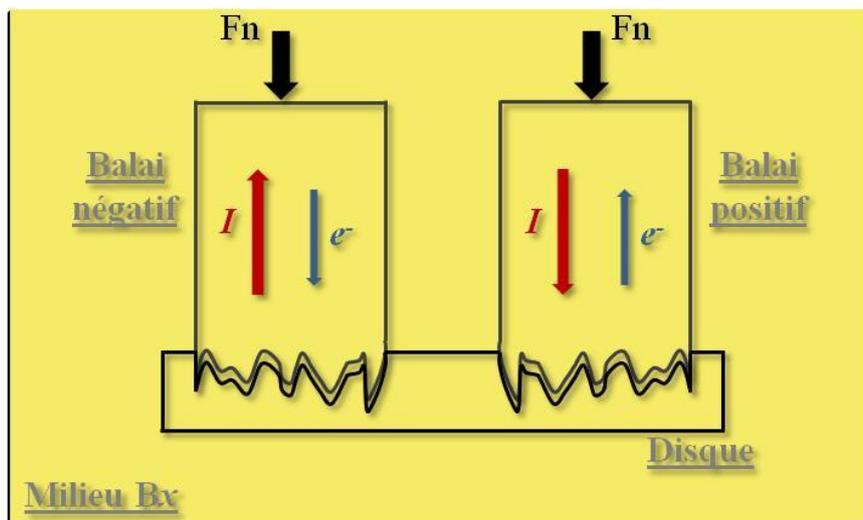


Figure 4.1. Définition des appellations du double contact balais-collecteur.

IV.2. Frottement et usure de matériaux carbonés

Des essais de frottement reproduisant au plus près du réel le cas de la pompe de gavage pour automobile ont été réalisés sur le tribomètre HVSF décrit précédemment. Une première étude menée au sein du Laboratoire LTDS a permis d'énoncer différentes hypothèses quant aux mécanismes d'usure de ce double contact balais-collecteur. Le dispositif expérimental, suite à des améliorations techniques récentes, permet aujourd'hui de réaliser des essais dans des conditions de sollicitation de la pompe de gavage et permet d'étudier le frottement balais-collecteur. Toutefois, le phénomène de commutation agissant dans le cas réel ne sera volontairement pas étudié. La complexité technique et électrique en résultant limite les possibilités d'observations du fait des vitesses élevées et des faibles efforts de frottement.

IV.2.1. Comportement tribologique du double contact

IV.2.1.1. Frottement en l'absence de courant électrique

La littérature associée à différents essais a permis de mettre en évidence certains comportements tribologiques lors du frottement balais-collecteur. L'usure est très faible et l'endommagement en résultant sur les surfaces est lui aussi faible. Il est possible d'évaluer le taux d'usure qui correspond à la perte de cote (mesurée par le système diode-cellule photoélectrique) divisée par la distance parcourue. Il est de l'ordre $0.1 \mu\text{m.km}^{-1}$.

Cette usure est observable sur les surfaces des matériaux testés. Le faciès d'endommagement est composé de stries fines ce qui permet de conclure quant au régime de lubrification régissant le contact. Il s'agit bien du régime limite dans lequel les aspérités des corps antagonistes sont en contact. Cependant, du fait que l'usure est faible et que le polissage des échantillons testés induit inévitablement des défauts, cette usure reste localisée et plus particulièrement sur les balais. Bien que la préparation des échantillons s'effectue in-situ, le défaut de parallélisme des surfaces en contact subsiste.

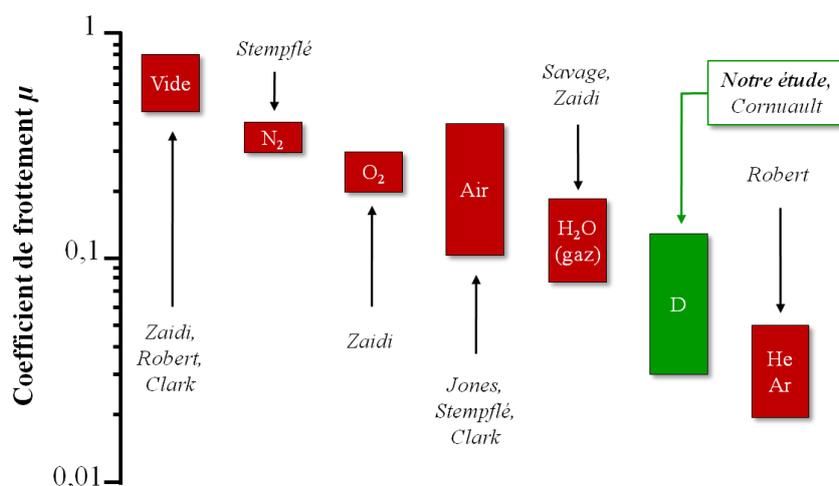


Figure 4.2. Comparaison des coefficients de frottement observés sur des matériaux carbonés en fonction de différents environnements

La littérature ainsi que nos essais montrent clairement que le coefficient de frottement dépend de la nature de l'environnement. La figure 4.2 permet de situer notre étude en fonction des différents environnements (Clark et al. 1963) (Jones 2004) (F. Robert, Paulmier, et al. 1995b) (Savage & H. Robert 1948) (Stempflé & Von Stebut 2006) (Zaidi et al. 1995) (Cornuault et al. 2008). Le frottement reste fortement dépendant de son milieu. Même si les différents matériaux composant cette comparaison ne sont pas exactement identiques, ils restent cependant similaires du fait qu'ils soient tous très majoritairement constitués de graphite. Les coefficients de frottement observés en milieu diesel (D) sont situés entre ceux issus d'un milieu constitué d'air humide ou d'un gaz inerte. Il est possible que le milieu liquide dans lequel le frottement se réalise puisse jouer un rôle mécanique dans l'interface balais-collecteur.

Le frottement de matériaux carbonés en l'absence de courant induit donc de faibles coefficients de frottement et une faible usure sur les surfaces de matériaux testés expliqués par un phénomène de cisaillement des feuillettes de graphite selon (Cornuault 2008). Il est alors intéressant de se rapprocher du cas réel et d'introduire un courant électrique dans le tribosystème testé.

IV.2.1.2. Frottement en présence d'un courant électrique

Le passage d'un courant électrique dans l'interface du double contact balais-collecteur modifie profondément son comportement tribologique. La figure 4.3 met en évidence les deux étapes observées lors d'un essai de frottement. Il existe deux phases : la première sera nommée phase d'accommodation et la seconde phase linéaire (le trait pointillé vert indique le changement).

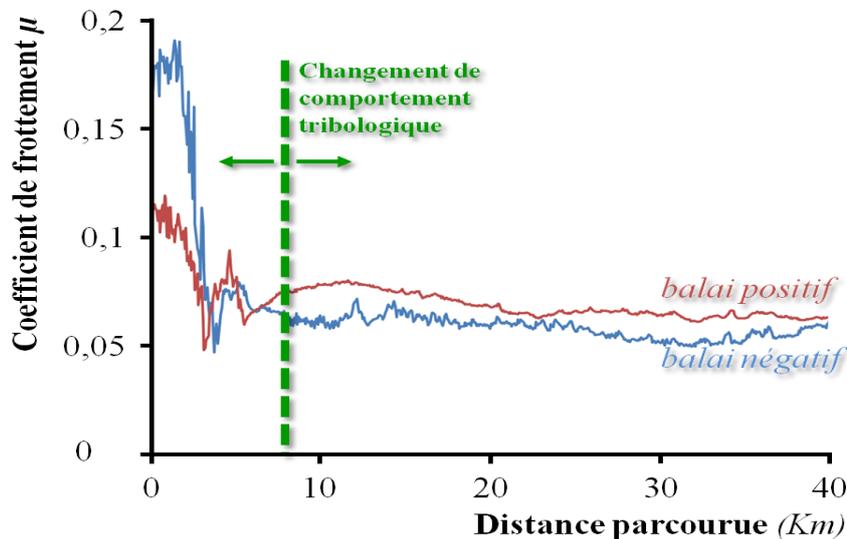


Figure 4.3. Mise en évidence de deux phases lors du frottement du double contact balais-collecteur (Couple P_bP , $I=6A$, $V=6,5 m.s^{-1}$, $F_n=10N$)

Nous pouvons noter la faible différence entre le balai positif et négatif. Même si la forme de l'évolution des deux grandeurs est similaire ce qui tend à mettre en évidence un comportement tribologique semblable, il subsiste une légère différence : la valeur concernant le balai positif est 10 à 15% supérieure à celle du balai négatif. La littérature confirme cette

tendance et montre une similitude avec la tendance du balai positif à plus s'user que le balai négatif. Cette différence reste minimale face aux grandeurs observées. Afin de simplifier les résultats, il sera présenté dans la suite de l'étude une moyenne de ces deux valeurs qui correspondra à la valeur du coefficient de frottement du double contact balais-collecteur.

IV.2.1.2.1. *Phase d'accommodation*

Cette phase correspond à l'accommodation des surfaces des balais et du disque durant cette phase la surface réelle de contact va augmenter au cours de l'essai. Cette phase correspond à un comportement tribologique très instable : les signaux enregistrés sont très bruités par la présence de vibrations générées par le grand nombre de séparations des surfaces frottantes du double-contact de manière transitoire. Il est donc difficile de calculer un coefficient de frottement ou une résistance du double contact convenable. La perte de cote relevée au niveau du balai instrumenté est très rapide durant cette phase.

Lors de tous les essais de frottement avec passage de courant électrique réalisés, il a été possible de visualiser à l'œil nu grâce à la transparence des parois de l'enceinte, l'existence de décharges lumineuses aux contacts balais-collecteur. Elles sont de couleur blanche et leur durée est variable. Ces décharges vont ensuite se stopper, ce qui correspond au début du régime linéaire.

Le comportement des contacts va alors se stabiliser lentement et atteindre une deuxième phase dite linéaire. Il est évident que des essais sont impossibles car les signaux enregistrés ne seraient pas lisibles durant cette période, aucune conclusion ne pourra être énoncée.

IV.2.1.2.2. *Phase stationnaire*

Durant cette phase, le coefficient de frottement conserve la valeur atteinte en fin de période d'accommodation et se stabilise. Les valeurs atteintes sont environ 30% supérieures en comparaison d'essais réalisés en absence de courant pour des conditions similaires. Le passage du courant modifie donc probablement l'interface des contacts.

La phase d'accommodation est rapide par rapport à la durée de vie d'une pompe de gavage qui est dimensionnée pour fonctionner 4000 h à une vitesse de rotation de 8000 trs/mn. Ceci correspond à une distance parcourue théorique approchant 100 000 km. Il est évident que réaliser des essais aussi longs est impossible. Les quelques premiers kilomètres correspondant à l'accommodation observée sont négligeables quant on s'intéresse à la durée de vie totale de la pompe. Pour nos essais il est nécessaire de sortir de cette phase et de se situer en phase stationnaire de fonctionnement.

Sur une pompe en fonctionnement réelle, le taux d'usure théorique estimé (fourni par l'industriel) est de 2.5 microns par heure de fonctionnement. Les essais préliminaires présentés montrent des usures nettement supérieures. L'hypothèse est donc que malgré la stabilisation observée, des différents paramètres mesurés, le contact se situe toujours en phase de rodage (pour 70 kms de tests effectués). Les tests devant être réalisés en phase linéaire, le

contact observera une distance de rodage d'environ 200 km suffisante pour sortir de l'accommodation des surfaces.

L'introduction d'un courant électrique modifie profondément le comportement tribologique du double contact et induit une augmentation de l'usure notable. L'usure "électrique" semble être prépondérante sur l'usure "mécanique". La phase d'accommodation pendant laquelle le taux d'usure est très élevé est principalement responsable de ce comportement.

IV.2.1.3. Régime de lubrification limite et profils d'usure

Le passage du courant est indispensable pour le fonctionnement de la pompe de gavage, indiquant alors que le contact entre les balais et le collecteur est obligatoirement présent. Le diesel peut être considéré comme un fluide diélectrique. Il présente une très grande résistivité : de l'ordre de $10^{10} \Omega.m$. Si un contact se produit entre les deux surfaces opposées, le régime de lubrification est dit limite : l'épaisseur du carburant circulant dans le contact est alors inférieure à celle des aspérités des surfaces. Cependant, un film d'épaisseur nanométrique, suffisant à stopper la circulation du courant, peut être formé en surface du contact, augmentant ainsi la résistance R_{2c} seulement de 1 à 3% selon (Féchant 1996). Ainsi, il convient de considérer que l'existence d'un film nanométrique est difficile à prévoir et qu'une séparation des surfaces par une couche mince de carburant n'est pas à exclure.

La figure 4.4 présente trois profils topographiques correspondant aux trois couples testés. Le couple P_bP est celui qui possède le profil le plus accidenté avec une profondeur maximum d'environ 260 microns contre environ 100 microns pour les deux autres couples.

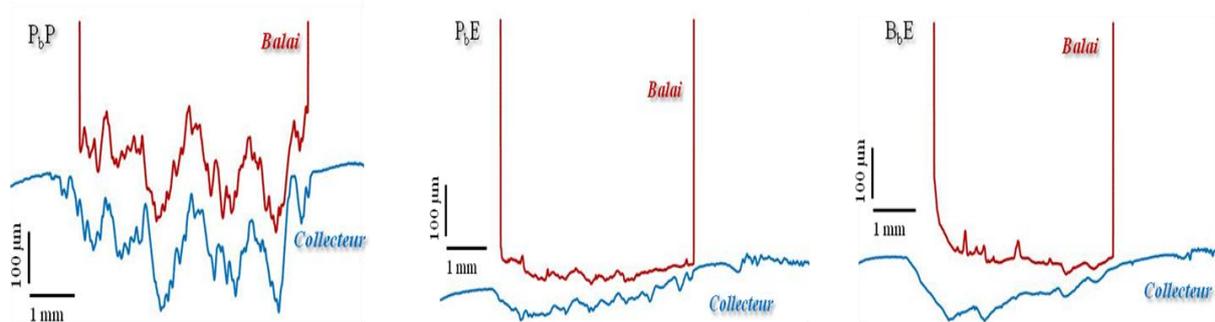


Figure 4.4. Profils topographiques de surfaces frottées pour les trois couples étudiés (B0, 3-7-10A, 10N, 500km)

La figure 4.5 donne les différents volumes usés pour chaque couple après une distance de frottement de 500 km. Les couples B_bE et P_bE possèdent une usure quasi similaire tandis que celle du couple P_bP leur est environ 4 fois supérieure. Le couple P_bP possède des propriétés d'usure supérieures à celle des couples B_bE et P_bE . Le matériau E composant le collecteur en comparaison de P semble influencer le double contact quant à son comportement à l'usure tandis que les matériaux P et B composant les balais semblent réagir de façon similaire face au frottement.

Ces informations peuvent être corrélées à leurs propriétés mécaniques et leurs compositions respectives. En effet les matériaux B et P possèdent des propriétés mécaniques comparables ainsi que des compositions chimiques et microstructurales proches (cf. Chapitre 2).

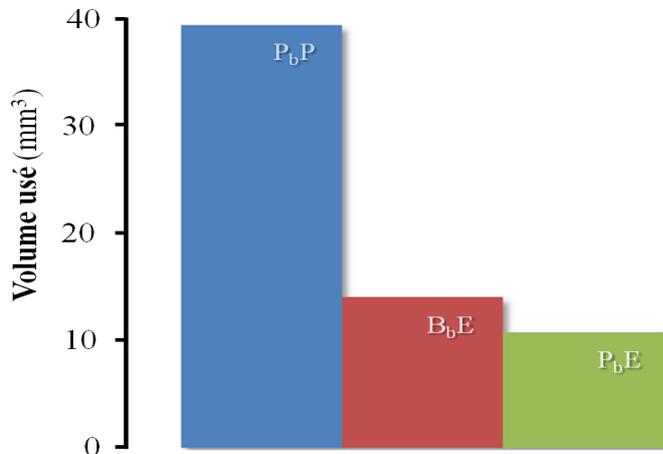


Figure 4.5. Volume utilisé des collecteurs pour chaque couple de matériaux (B0, 3-7-10A, 10N, 500 km)

IV.2.2. Influence des conditions d'essais

Plusieurs paramètres influant sur les conditions d'essai du double contact balais-collecteur ont été testés. Le tribosystème étudié est caractérisé par différents facteurs : l'effort normal, la vitesse de rotation, l'intensité du courant qui traverse le double contact, le milieu ainsi que le couple de matériaux. Nous avons mis en évidence précédemment l'apparition d'une première phase d'accommodation lors du frottement des échantillons dont il est nécessaire de se soustraire pour une lisibilité optimale des résultats. Pour ce faire, le double contact va donc subir une première phase de frottement d'environ 250 km. La seconde phase correspond à l'essai, les différents paramètres variant en créneaux (montée puis descente). Les essais ont tous été réalisés à une température proche de l'ambiante (entre 25 et 35 °c).

IV.2.2.1. Influence de l'effort normal

Des essais corroborés par l'étude menée par Cornuault, ont mis en évidence un effet de l'effort appliqué aux contacts sur le comportement à l'usure des balais et du collecteur. Il est nécessaire de déterminer un coefficient d'usure adimensionné tel que :

$$K = \frac{\Delta Z}{\Delta L} = \frac{Z_f - Z_i}{L_f - L_i} \quad \text{Equation 4.1}$$

Avec Z_i et Z_f : les pertes de cotes mesurées respectivement en début et en fin de la période concernée (perte de cote constatée à l'issue de la phase d'accommodation). Elles correspondent à la somme des pertes du balai et du disque. K correspond à la pente de la partie linéaire de $Z(L)$, L_i et L_f étant respectivement les distances de glissement parcourues en début et fin de la période concernée.

Des essais effectués en milieu B0 et pour une intensité proche de 6A mettent en évidence une baisse du coefficient K selon une loi puissance de coefficient se situant autour de -0.5 pour le couple PbP . De plus, les débris d'usure sont de tailles différentes selon la pression appliquée

au contact : à fortes charges, ils paraissent être de fins feuillets (5 à 10 microns) tandis que des débris massifs (jusqu'à 100 microns) sont créés sous de faibles charges (Cornuault 2008)..

Les vitesses de rotation importantes du collecteur peuvent entraîner des vibrations pouvant être néfastes à la bonne lisibilité des paramètres observés lors des différents essais. Le choix de n'utiliser qu'une charge importante (10N) et supérieure au cas réel pour les futurs essais, a permis de diminuer ces risques et de sévérer le contact testé au maximum. Cette hypothèse réductrice permet aussi d'accélérer la phase d'accommodation de nos matériaux qui est néfaste à la lecture et la compréhension des phénomènes mis en jeu lors du frottement.

IV.2.2.2. Influence de l'intensité du courant électrique

Nous avons précédemment observé une modification du comportement tribologique en termes d'usure lors de l'introduction d'un courant électrique au sein de l'interface frottée : celle-ci augmente. Des essais ont donc été réalisés en utilisant différentes intensités.

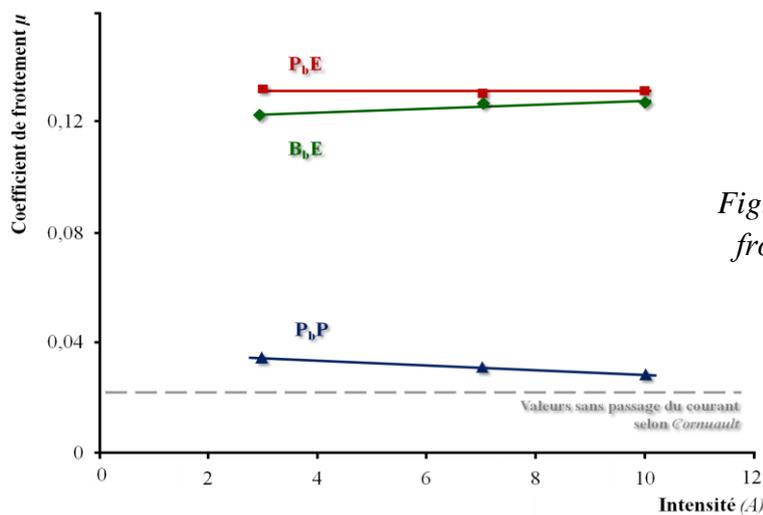


Figure 4.6. Evolution du coefficient de frottement en fonction de l'intensité (B0, 10N, 7,5 m.s⁻¹)

La figure 4.6 met en avant l'évolution du coefficient de frottement avec l'augmentation de l'intensité du courant variant de 3 à 10 A. Malgré la nette différence de coefficient (4 fois la valeur du couple P_bP), l'intensité ne semble pas jouer un rôle prédominant sur le coefficient de frottement lors des essais réalisés. Il reste constant avec l'augmentation de l'intensité : autour de 0.12 pour les couples P_bE et B_bE et proche de 0.04 pour le couple P_bP. Les valeurs du coefficient de frottement sans passage de courant se situent autour de 0,03 selon (Cornuault 2008). Le matériau E en comparaison des matériaux composites à bases de graphite que sont P et B, semble cependant être influent et la cause de cette augmentation de coefficient de frottement.

L'intensité appliquée entraîne une augmentation du taux d'usure K plus au moins forte selon les couples testés : les pentes calculées de K en fonction de la vitesse de rotation sont de l'ordre de 0.25 pour les couples P_bE et B_bE tandis que celle du couple P_bP est de l'ordre de 0.09. Des essais réalisés à une intensité de 10A, une vitesse de rotation de l'ordre de 7,5 m.s⁻¹ dans un milieu de type B0 mettent en évidence une différence de la valeur de K qui se situe autour de 2,5 μm.km⁻¹ et de 1.5 μm.km⁻¹ entre les couples P_bE, B_bE et P_bP.

Les évolutions des résistances du double contact R_{2c} pour les trois couples de matériau testés restent similaires (figure 4.7). La résistance diminue avec l'augmentation de l'intensité circulant dans le contact avec une pente d'une valeur approchant $0,15 \Omega \cdot A^{-1}$. Cependant, le couple PbP possède la résistance la plus faible en comparaison des deux autres couples pour des conditions identiques. Des essais réalisés à 10A, $7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans un milieu B0 et pour une charge appliquée de l'ordre de 10N donnent des valeurs de R_{2c} proche de $0,56\Omega$, $1,35\Omega$ et $2,75 \Omega$ (respectivement P_bP , B_bE et P_bE). L'augmentation de l'aire réelle de contact associée à une augmentation des spots de contact électrique peut expliquer ce phénomène.

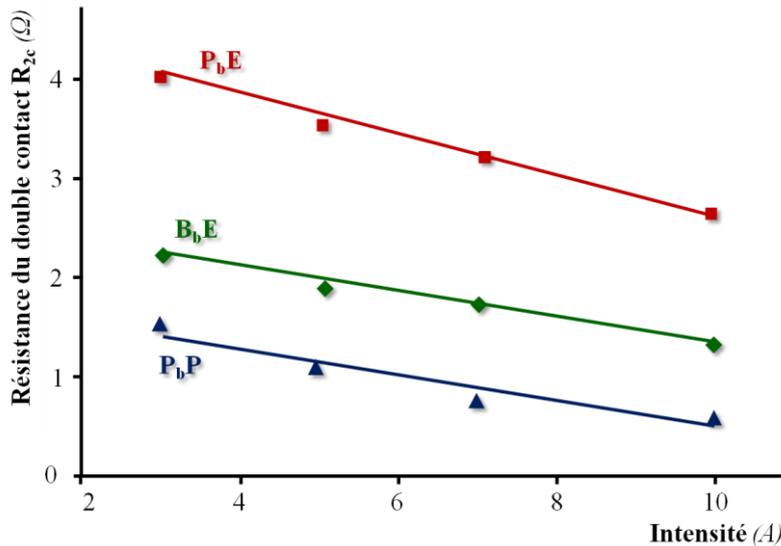


Figure 4.7. Evolution de R_{2c} en fonction de l'intensité (B0, 10N, $7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Le fait que le coefficient de frottement soit stable alors que l'usure augmente et que la résistance de contact diminue, signifie que l'augmentation de l'intensité n'implique pas de modifications mécaniques et tribologiques à l'interface. Une explication simple serait de dire que la majeure partie de l'usure provient de phénomènes électriques tels que des arcs ou sparks.

IV.2.2.3. Influence de la vitesse de rotation

Les conséquences de l'augmentation de la vitesse de rotation sont d'autant plus intéressantes à observer du fait que la pompe de gavage tend vers une miniaturisation et par conséquent une augmentation de la vitesse de glissement du contact balais-collecteur. Il est alors nécessaire d'étudier le comportement tribologique du double-contact pour nos trois couples de matériaux.

La figure 4.8 montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de rotation pour des conditions de fonctionnement typiques de la pompe. Le coefficient de frottement reste quasi constant avec l'augmentation de la vitesse de rotation même si les couples P_bE , B_bE et P_bP observent une légère pente dégressive respectivement de l'ordre de $-4 \cdot 10^{-6}$ et de $-2 \cdot 10^{-6}$. La vitesse de rotation ne semble donc pas influencer sur les propriétés de frottement des couples de matériaux carbonés testés.

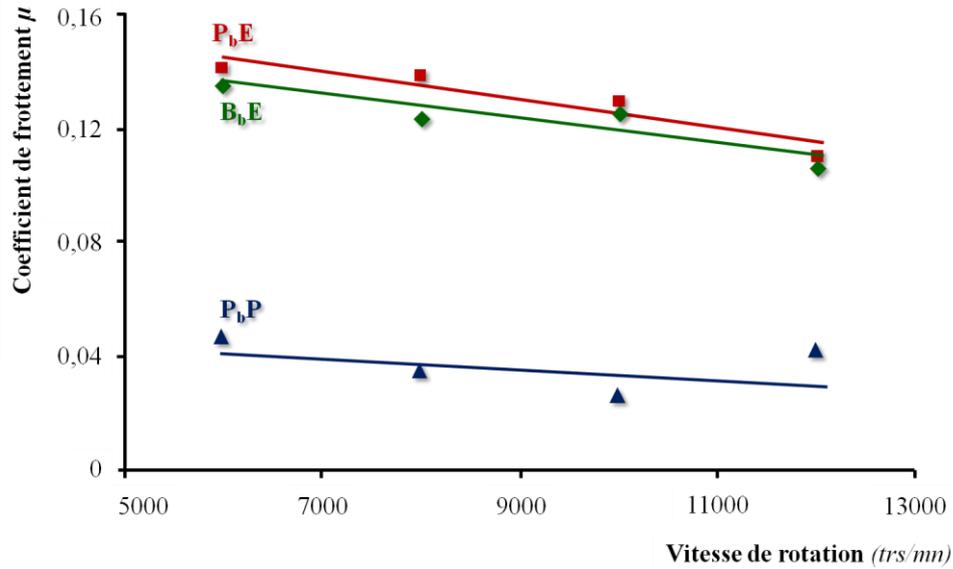


Figure 4.8. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de rotation (B0, 10N, 7A)

La vitesse a cependant un rôle essentiel quant au frottement balais-collecteur en présence d'un courant électrique comme le montre la figure 4.9 ci-après. Les pentes croissantes des différents couples montrent cette dépendance. Le taux d'usure chute fortement entre 6000 et 12000 trs/mn pour les couples P_bP et P_bE (respectivement -7.10^{-4} et $4.10^{-4} \mu\text{m.km}^{-1} .(\text{trs/mn})^{-1}$) tandis qu'il reste constant pour le couple B_bE (autour de 1.9 microns par kilomètre parcouru).

Sachant que l'usure est fortement dépendante de la composante électrique et plus particulièrement des perturbations électriques de type arcs ou sparks, nous pouvons penser qu'à des vitesses importantes de glissement, ces perturbations sont moins nombreuses ou d'intensités plus faibles.

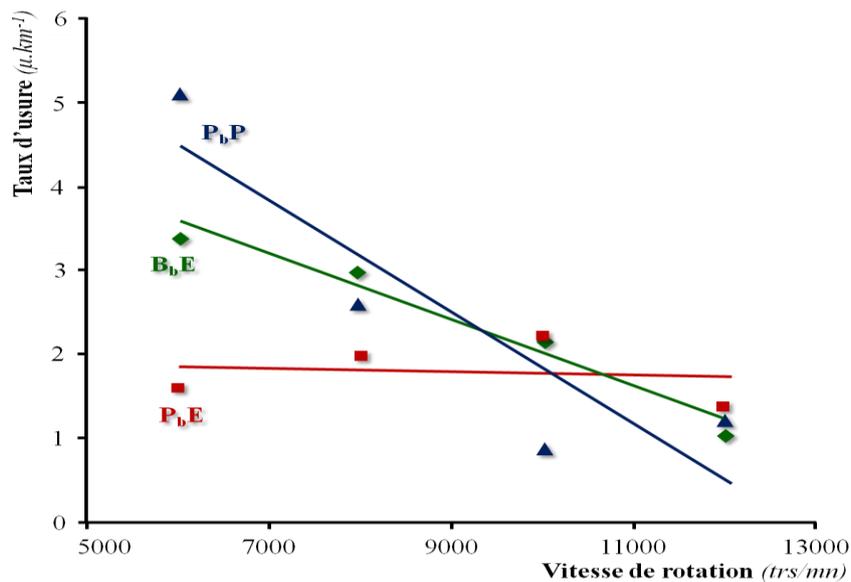


Figure 4.9. Evolution du taux d'usure en fonction de la vitesse de rotation (B0, 10N, 7A)

La résistance du double contact R_{2c} possède quant à elle deux comportements distincts selon les couples de matériaux testés comme le montre la figure 4.10. Les couples P_bE et B_bE voient leur résistance diminuer linéairement avec une pente proche de $1,5 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot (\text{trs}/\text{mn})^{-1}$ tandis que celle du couple P_bP augmente linéairement avec une pente proche de $0,6 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot (\text{trs}/\text{mn})^{-1}$. Cependant, pour une vitesse de rotation de 10 000 trs/mn, les résistances des trois couples convergent vers une valeur proche de 1 Ω . La différence semble venir de la présence du matériau E composant le collecteur et non pas de la présence du polymère dans les balais même si ce dernier est aussi présent dans les balais du couple P_bP . Le matériau du collecteur semble posséder un impact plus important quant aux phénomènes induits par le frottement électrifié des balais et du collecteur.

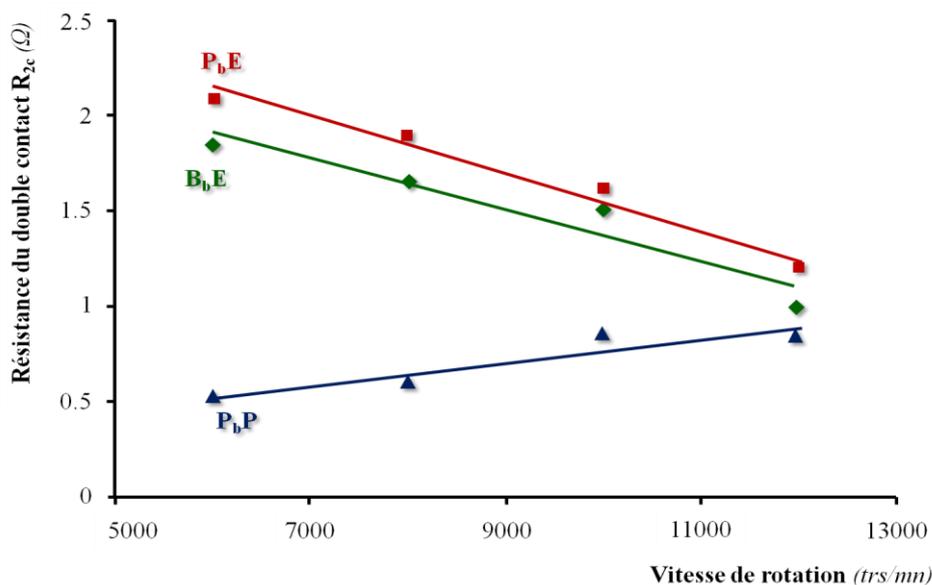


Figure 4.10. Evolution de la résistance R_{2c} en fonction de la vitesse de rotation (B0, 10N, 7A)

IV.2.2.4. Influence du milieu

Des essais effectués dans des carburants B10 et B30 ont été effectués pour des conditions similaires aux essais présentés précédemment pour le couple P_bP ($F_n = 10N$, $I = 7A$). L'évolution de grandeurs telles que le coefficient de frottement, la résistance du double contact ou le taux d'usure suit deux phases. Une première phase d'accommodation décrivant les mêmes propriétés que celle expliquée précédemment puis une seconde phase stationnaire. Les coefficients de frottement calculés dans les deux carburants testés sont de l'ordre de 0,15, les taux d'usure rencontrés se situent autour de $1,4 \mu\text{m} \cdot \text{km}^{-1}$ et une résistance du double contact proche de 1 ohm.

Les valeurs déduites du frottement du couple P_bP dans les carburants B10 et B30 sont très proches de celles rencontrés dans le B0. Il semblerait que la présence d'huiles végétales participant à la composition du carburant n'influe pas sur le comportement tribologique du double contact balais-collecteur lors de nos essais.

IV.2.3. Mécanismes d'usure : vers un modèle phénoménologique d'usure

IV.2.3.1. Observations microscopique des surfaces frottées

Les observations des surfaces des disques frottés par les balais en microscopie électronique à balayage permettent de conclure quant à différents mécanismes d'usure régissant le double contact balais-collecteur.

Les figures 4.10 et 4.11 mettent en évidence la faible usure constatée sur les disques pour respectivement les couples B_bE et P_bE frottés en milieu B₀. Les figures 4.10.a et 4.11.a présentent un plan large du faciès endommagé par le frottement. Il est constitué de fines stries circulaires dont leur centre est le centre de rotation du disque. Les fines stries se retrouvent sur le matériau antagoniste qui compose les balais.

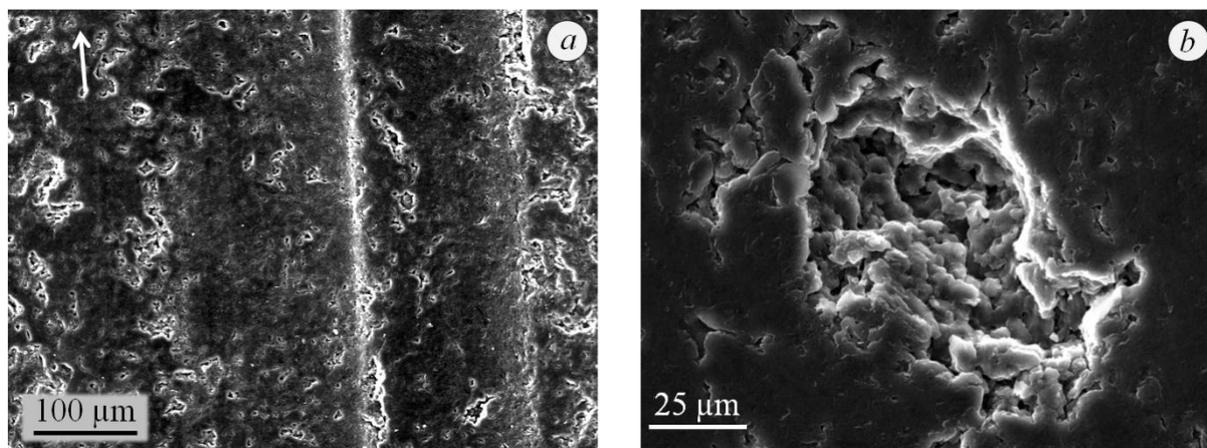


Figure 4.10. Observations MEB de la surface du disque E
(Couple B_bE, Milieu B₀, 10N, 9A, 7.5m.s⁻¹)

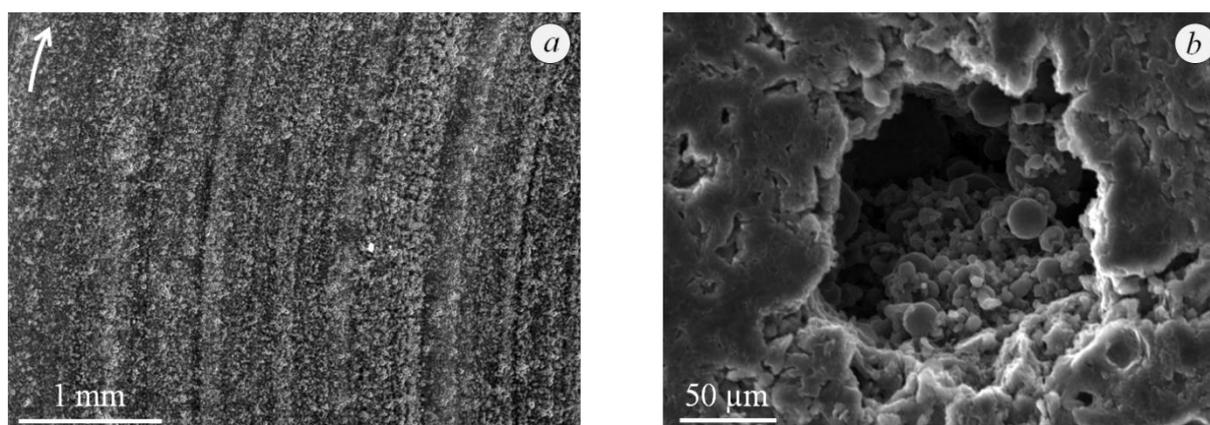


Figure 4.11. Observations MEB de la surface du disque E
(Couple P_bE, Milieu B₀, 10N, 9A, 7.5m.s⁻¹)

En surface, de nombreux trous sont observés et peuvent être créés suite à l'endommagement de la surface laissant ouvertes les nombreuses porosités que contient ce matériau (cf. chapitre

2) ou suite à la création d'arcs électriques ou sparks dus au passage du courant. Sachant que l'usure est faible quelque soit le courant circulant, il est probable que la majorité des trous soient créés par l'usure des surfaces laissant ouverts les pores du matériau présents sous la surface.

Les figures 4.10.b et 4.11.b permettent d'observer à une échelle adaptée un trou présent à la surface. Il semblerait que la microstructure du matériau soit conservée : de petites sphères composées de graphite apparaissent et composent la paroi du cratère. Cette observation confirmerait que les trous observés sont les pores subsurface du matériau. Nous pouvons également observer que la surface entourant le cratère est très lisse. Le frottement semble former une couche ou patine lisse à la surface du disque malgré la présence des stries fines observées à plus grande échelle.

La figure 4.12 présente des observations MEB de la surface du disque P_bP. Il est aisé d'observer la quantité des stries ou sillons présents en surfaces ainsi que leurs tailles supérieures à celles observées sur le disque E et similaires aux balais antagonistes.

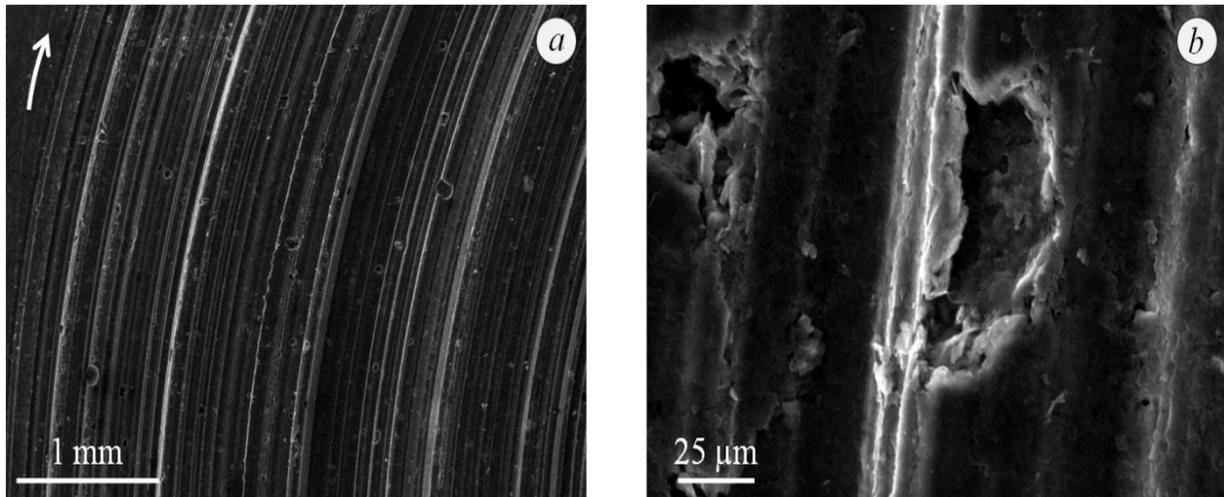


Figure 4.12. Observations MEB de la surface du disque P
(Couple P_bP, Milieu B0, 10N, 7A, 9m.s⁻¹)

La figure 4.12.a montre une surface possédant un faciès très endommagé sous forme de stries profondes et irrégulières synonyme d'un comportement tribologique sévère. Les cratères observés sont moins fréquents et parsemés sur la surface frottée. Ils sont plus moins fréquents sur les balais. Cependant ils sont de taille moyenne plus importante et peuvent s'expliquer par la présence d'arcs électriques ou sparks à l'interface. Le faciès d'endommagement de ces cratères témoigne d'une rupture rapide pouvant s'expliquer par une éjection rapide des plans graphitiques (cf. figure 4.12.b). Les plans de graphites sont observables en fond et bords de cratère.

La surface frottée du matériau P semble recouverte d'un empilement de plans graphitiques épousant les sillons, donnant ainsi à la surface frottée un aspect très lisse. Cette observation

est identique à celle de Cornuault qui montre un empilement de feuillets graphitiques disposés comme les ardoises d'un toit (Cornuault 2008).

Certains cratères sont cerclés de soufre observés en *MEB-EDX* comme le montre la figure 4.13 ci-dessous. Ces observations permettent de mettre en évidence la présence de la microstructure de ce matériau P et des endommagements créés. En effet, le matériau P est constitué de billes creuses de polymère soufré de taille allant de 50 à 100 μm (cf. chapitre 2). Des stries typiques du phénomène d'abrasion sont observées autour du cratère lisse soufré. Ces stries correspondent parfaitement aux stries du frottement car elles les prolongent.

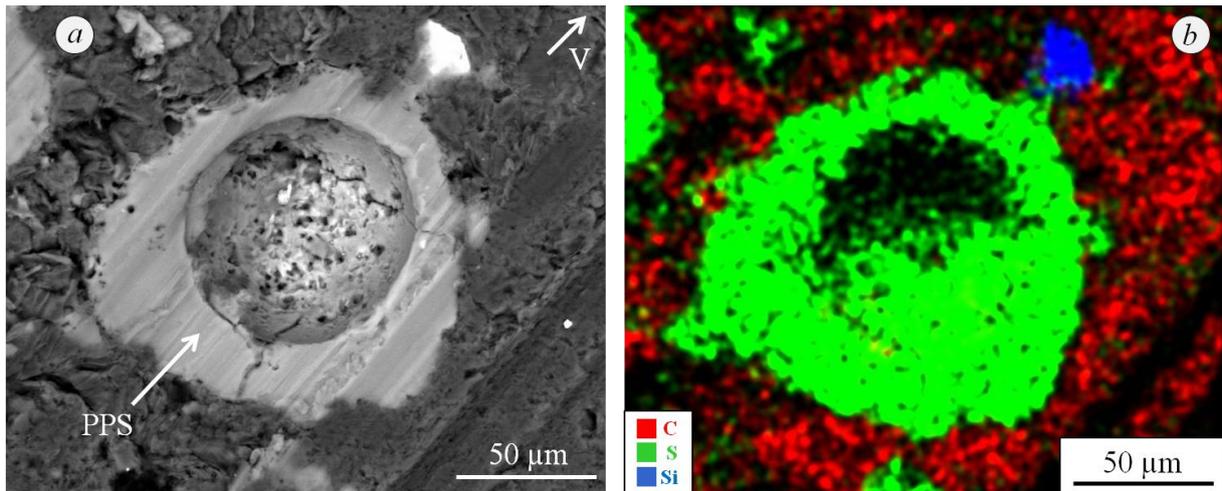


Figure 4.13. Observations MEB(a) associée à l'EDX (b) de la surface du disque P
(Couple P_bP , Milieu B0, 10N, 7A, $9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Au vu de ces observations, il est possible que les débris issus des arrachements observés soient en partie responsables du processus d'usure. La dureté de ces débris étant similaire à celle des surfaces, on peut imaginer qu'ils vont déformer la surface autant qu'elle les déforme. Il en résulte qu'un équilibre doit être trouvé entre le rayage des surfaces par le troisième corps que constituent les débris et les cisaillements de ceux-ci.

Le processus d'usure le plus utilisé lors du frottement du double contact balais-collecteurs semble être l'abrasion. Ce mode d'usure correspond à l'endommagement de la surface par des aspérités ou des particules dures soit par une déformation ou par le phénomène de coupe (Stachowiak & Batchelor 2001) (Mazuyer 2007). Le troisième corps constitué des débris pourrait correspondre aux particules dures créant des phénomènes d'usure par déformation ou des phénomènes de coupe, particules venant elles-mêmes de l'abrasion ou des éjections créées par les arcs électriques ou sparks en surfaces. De plus, le matériau polymère présent dans le matériau P et plus dur que le graphite constituant ce dernier peut entraîner ces mêmes phénomènes tout en restant incrusté dans les surfaces frottantes. Le matériau E étant plus dur (cf. chapitre 2), il va par conséquent moins s'user et donc entraîner des stries de tailles inférieures.

IV.2.3.2. Modèle phénoménologique d'usure

Les essais réalisés associés aux différentes observations effectuées permettent la mise en évidence de certains phénomènes tribologiques concernant l'électro-contact glissant des matériaux carbonés.

En milieu carburant de type biodiesel, un frottement de notre tribocontact sans passage du courant met en évidence un phénomène de cisaillement des feuillettes de graphite selon (Cornuault 2008) conduisant à un effet bénéfique sur l'usure créée : un film autolubrifiant est formé et conduit à une usure négligeable.

Un courant électrique traversant le contact induit une modification profonde du comportement tribologique des matériaux à liant polymère. Il est nécessaire de dissocier les matériaux P et B comportant une phase polymère du matériau E composé intégralement de graphite (électrographite). La confrontation des résultats expérimentaux avec la littérature permet de postuler quant à un mécanisme d'usure influencé par des perturbations électriques de type arcs électriques. En effet l'usure électrique est largement plus importante, ce qui montre la prépondérance de celle-ci sur celle sans passage de courant. La littérature met en évidence une courbe en U si on représente les différentes usures (électrique et mécanique) en fonction de la charge appliquée comme le montre la figure 4.14 (Braunović et al. 2007) (Shobert 1976) (Yasar et al. 2007).

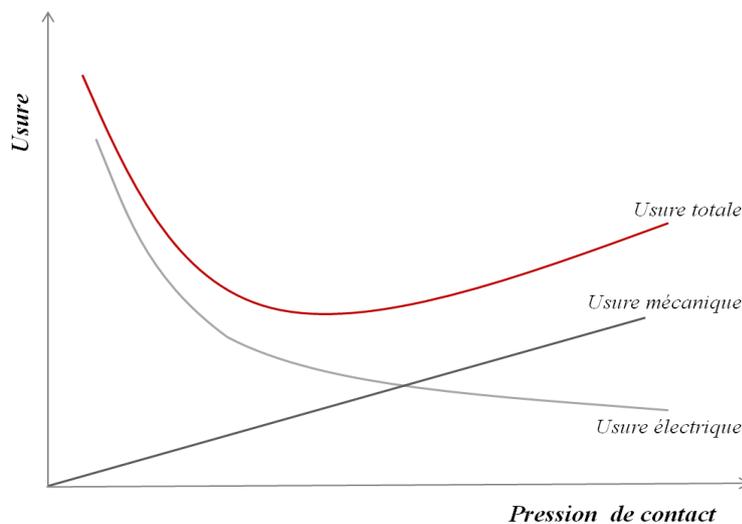


Figure 4.14. Usure totale et composantes électrique et mécanique de l'usure en fonction de la pression appliquée

La similitude entre cette considération et nos résultats expérimentaux tend à montrer que le phénomène est identique pour le frottement de nos matériaux. L'usure spécifique exprimée par (Popa & Militaru 2002), (Yasar et al. 2007) et (Cornuault 2008), montre l'analogie entre l'usure observée et la somme des puissances spécifiques mécaniques et électriques générées par unité de surface dans le double contact. Cette puissance spécifique, notée P^* , dépend des pertes mécaniques (dus aux conséquences du frottement, de l'effort normal appliqué et de la vitesse de rotation) et des pertes électriques (dus aux écarts de tension et à la densité de courant). A partir des valeurs de μ et de R_{2c} calculées, l'équation donnant la puissance spécifique par unité de surface si l'on considère que les surfaces de contact mécanique et électrique sont identiques, est selon (Popa & Militaru 2002) et (Yasar et al. 2007) :

$$P^* = P_m^* + P_e^* \quad \text{Equation 4.2}$$

Avec P^* l'usure totale, P_m^* l'usure spécifique mécanique :

$$P_m^* = \frac{F_n}{S} \cdot \mu \cdot \omega \quad \text{Equation 4.3}$$

et P_e^* l'usure spécifique électrique :

$$P_e^* = \frac{R_{2c}}{2.S} \cdot I^2 \quad \text{Equation 4.4}$$

Avec : F_n l'effort normal (N), S la surface (m^2), μ le coefficient de frottement, ω la vitesse de rotation ($m.s^{-1}$), R_{2c} la résistance de contact (Ω), I le courant (A).

La figure 4.15 montre l'évolution de P^* ainsi que celle des deux composantes électrique et mécanique pour le couple PbP en fonction de la vitesse de rotation.

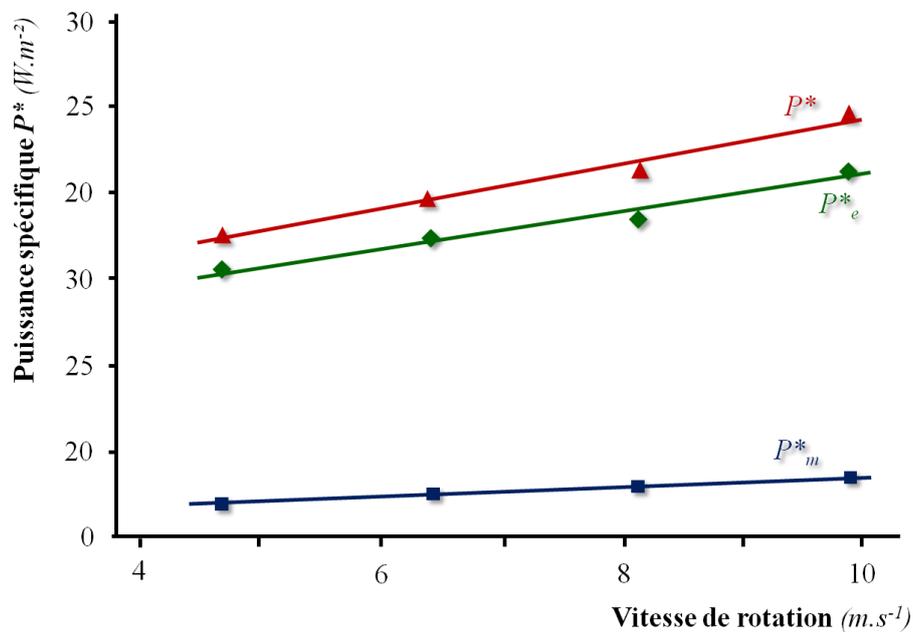


Figure 4.15. Puissance spécifique par unité de surface en fonction de la vitesse de rotation du couple PbP

Le calcul de cette puissance spécifique permet donc de montrer que le fonctionnement du double contact semble être gouverné par l'existence d'un courant électrique circulant dans celui-ci même s'il nous est en cet instant impossible d'en définir l'origine ainsi que les mécanismes mis en jeu lors du frottement.

La littérature mettant en avant une usure de type sparks ou arcs électriques, une étude de l'endommagement potentiel créé par ces phénomènes sur nos matériaux a été réalisée. Des arcs électriques ont été créés en "statique" à l'aide d'un dispositif spécifique.

IV.3. Création d'arcs électriques uniques

L'étude du frottement des balais avec le collecteur met en évidence une très forte implication de la composante électrique lors de l'usure globale. Il est donc apparu nécessaire de comprendre les phénomènes mis en jeu lors de cette usure dite électrique. Pour ce faire, un dispositif spécifique a été réalisé au sein du laboratoire pour créer un arc électrique unique et localisé (contact ponctuel sur le disque) afin de comprendre les conséquences du passage du courant sur les surfaces de nos matériaux, en particulier le collecteur.

IV.3.1. Dispositif expérimental

Afin d'étudier l'arc électrique et ses conséquences sur nos matériaux, principalement le disque, un nombre d'arcs minimum doit être créé localement pour ainsi limiter les paramètres influents. Idéalement, un seul arc doit être créé lors du soulèvement du balai. La surface du disque a donc été polie de façon bombée pour assurer un contact ponctuel entre les deux surfaces et ne créer ainsi qu'un seul arc électrique (cf. figure 4.15).

IV.3.1.1. Principe du dispositif

Le principe du dispositif est schématisé dans la figure 4.16 ci-dessous. Le balai arrondi est mis en contact avec le disque puis est soulevé. Un arc électrique unique se crée lors de la montée. Le balai atteint alors une distance h du disque pour laquelle la création d'arc est impossible et stoppe sa montée. Le disque n'étant pas en mouvement, nous dirons que l'arc est créé en statique.

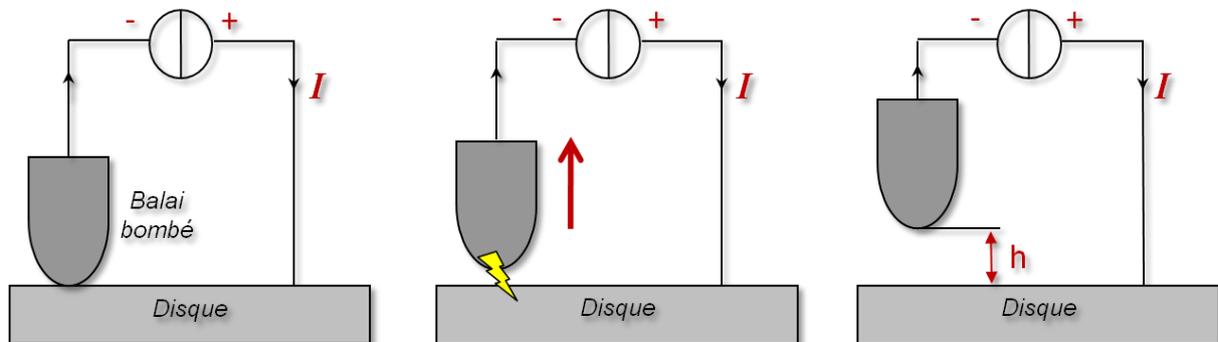


Figure 4.16. Principe de création d'un arc unique.

Une distance minimale variable selon les conditions environnantes est nécessaire pour créer un arc électrique mais la hauteur h doit être aussi très grande pour assurer l'absence d'un nouvel arc électrique ou la non-persistance de l'arc. Ainsi cette distance h a été fixée à 6 mm pour notre étude.

Afin de simplifier au maximum le contact et ainsi diminuer les risques de perturbations électriques tel que la résistance de contact, le balai positif est supprimé et le disque est directement relié au générateur de courant et tension. Ainsi le circuit fermé sera composé exclusivement du générateur, du disque et du balai.

Lorsqu'un contact électrique est soumis à une force extérieure et parcouru par un courant électrique, Haug et al mettent en évidence une force de répulsion F_r entre les électrodes s'opposant à la force extérieure et la définissent comme :

$$F_r = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \cdot \log\left(\frac{b}{a}\right) \quad \text{Equation 4.5 selon (Haug et al. 1991)}$$

Avec μ_0 la perméabilité du vide (égale à $4\pi \cdot 10^{-7}$ H.m⁻¹), I le courant appliqué, b le rayon du cylindre du contact et a le rayon de la surface de contact donné par Hertz selon (Zambelli & Vincent 1998) comme étant :

$$a = \left(\frac{3 \cdot F_{ext} \cdot R}{4 \cdot E}\right)^{1/3} \quad \text{Equation 4.6}$$

Avec F_{ext} la force appliquée sur le balai, R le rayon de courbure du balai (environ 1,5 mm) et E le module d'Young du matériau (considéré pour les matériaux de notre étude à 10 GPa).

Pour une force appliquée de 0,123 N, le rayon de contact est de 31 µm et la force de répulsion appliquée au contact est alors de $7,226 \cdot 10^{-7}$ N (le courant circulant est de 6 A). Cette valeur étant très faible devant la force extérieure, la force de répulsion sera donc négligée.

Les paramètres contrôlés et appliqués au contact sur le dispositif sont :

- Le courant et la tension appliqués aux bornes du contact : le générateur est contrôlé en courant et peut aller de 1 à 10 A.
- L'effort normal : entre 1 et 10 N, appliqué par des masses mortes situées à la verticale du balai
- Les matériaux : ils sont de type P (balai et collecteur), B (balai) et E (collecteur)
- La vitesse de montée : il est difficile de contrôler la montée du balai qui s'effectue à l'aide d'un vérin pneumatique. Cependant nous pouvons différencier une vitesse faible (environ 1 mm.s⁻¹) d'une vitesse élevée (environ 80 mm.s⁻¹).
- L'environnement du contact : il peut être effectué dans l'air ou dans le Diesel et Biodiesel identiques à ceux de l'étude en frottement.

Les paramètres enregistrés sont :

- Le courant et la tension circulant dans le contact au cours de l'essai. Ils sont enregistrés à l'aide d'un oscilloscope (directement pour la tension et à l'aide d'une pince ampère-métrique pour le courant). Ainsi le courant et la tension lors de l'arc électrique sont connus. Il est alors possible de calculer les énergies d'arc.
- Des observations par rugosimétrie (interférométrie optique), en microscopie électronique à balayage, en microscopie optique ou encore tomographie à rayons X seront réalisées sur les surfaces des échantillons endommagés.

La figure 4.17 présente le dispositif expérimental permettant la création d'arcs uniques en statique.

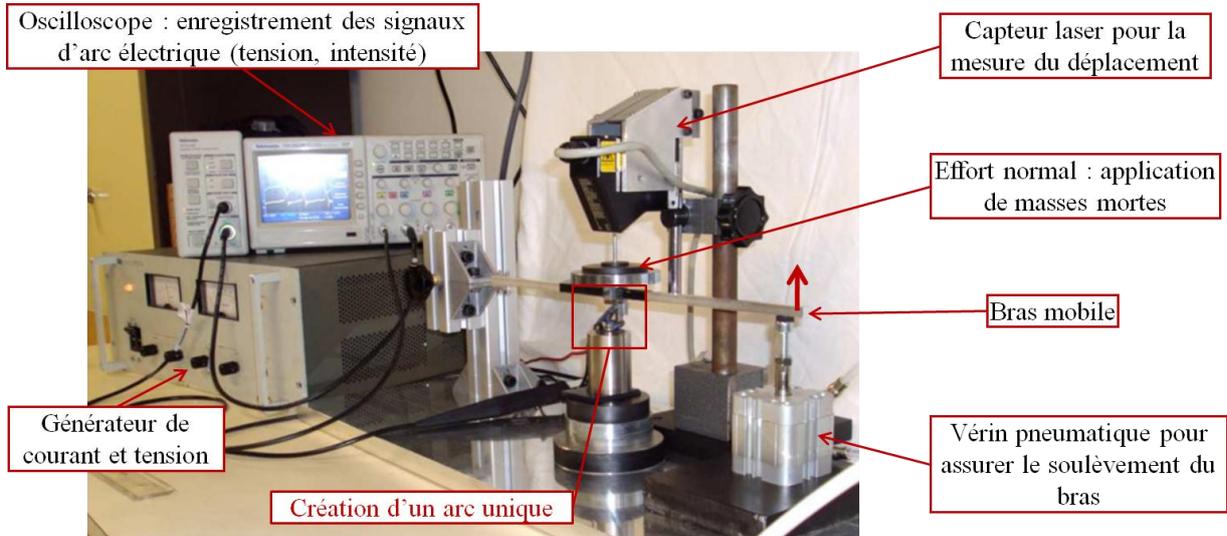


Figure 4.17. Dispositif expérimental de création d'arc.

IV.3.1.2. Protocole d'essai

L'essai en lui-même est court mais nécessite une préparation minutieuse des échantillons. Le balai et le disque doivent être tous deux polis pour permettre une caractérisation optimale des surfaces après endommagements. Le balai est poli suivant un arrondi en son extrémité inférieure et est ensuite placé sur le dispositif. Le collecteur est poli puis gravé afin de visualiser au mieux les endommagements créés. Le polissage permet une rugosité surfacique approchant 30 nm. La figure 4.18 montre les différentes étapes de cette préparation.

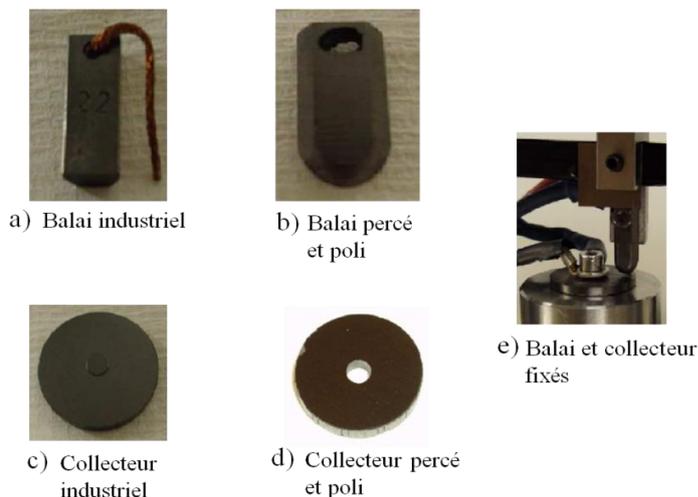


Figure 4.18. Préparations des échantillons

Les échantillons sont mis en contact puis le générateur piloté en courant est allumé pour permettre le passage du courant dans l'interface. L'arc est alors créé par soulèvement du balai qui ne redescend pas puis le générateur est éteint. Les échantillons peuvent ensuite être observés par les techniques de caractérisation susnommées.

IV.3.2. Phénomènes induits par l'arc d'ouverture unique

IV.3.2.1. Signaux électriques et endommagements typiques de l'arc

La figure 4.19 donne l'évolution typique des signaux électriques enregistrés lors de la création d'un arc unique d'ouverture. La tension se situant initialement autour de 5V ici, augmente rapidement pour atteindre une valeur maximum V_{\max} se situant typiquement autour de 25 V. Cette tension diminue ensuite de façon similaire à un amortissement pendant une durée d'arc τ_a très courte (environ $0,45\mu\text{s}$) avant de chuter fortement, atteignant une valeur quasi nulle pour ensuite remonter à sa valeur initiale. Cette signature en tension de l'arc généré est semblable à celles observées par Cornuault lors d'essais de frottement (Cornuault 2008). L'intensité initiale circulant dans le contact va diminuer pour atteindre une valeur constante avant l'arc (correspondant à $t=0$ sur la figure 4.19) pour ensuite diminuer quasi linéairement jusqu'à une valeur nulle en fin d'arc. Les signaux enregistrés sont similaires à ceux de l'équipe de Sawa et al même si celui-ci trouve des durées d'arcs environ 10 fois plus grandes s'expliquant par la présence d'une inductance présente dans leur circuit électrique (Takaoka & Sawa 2001) (Shigemori & Sawa 2004).

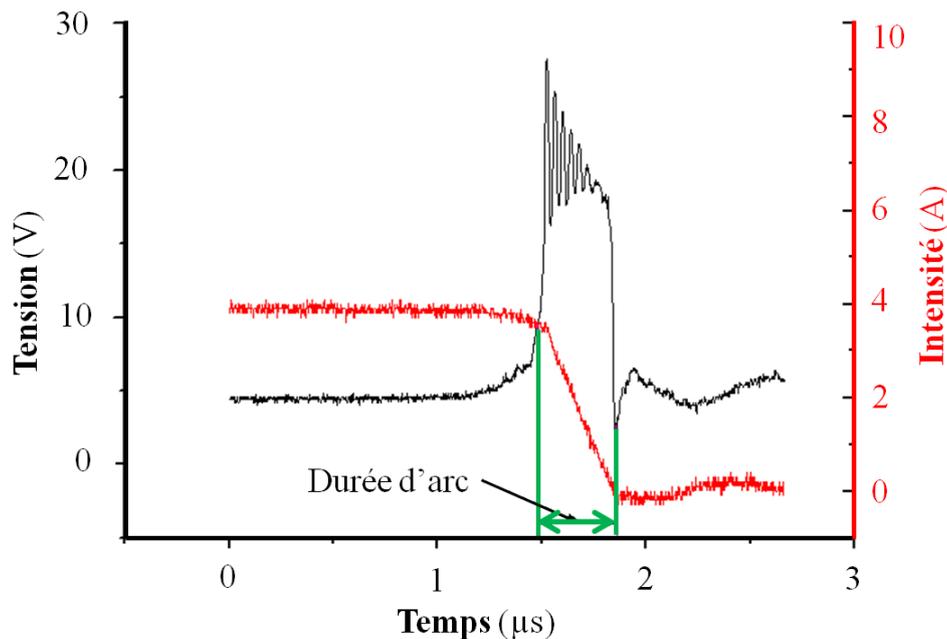


Figure 4.19. Signaux électriques d'un arc unique

Les endommagements créés peuvent être observés par interférométrie optique.

Tout d'abord, il faut noter que sur l'ensemble des essais réalisés, le matériau E ne présente pas d'endommagement observable malgré la création d'un arc visible par les signaux électriques.

Le matériau P présent dans les couples P_bP et P_bB engendre des endommagements beaucoup plus conséquents sous forme de cratères, de bosses ou îlots volumiques ou d'un mixage des deux dans des proportions variant avec l'intensité appliquée : à 3A, environ 70% des endommagements sont des îlots tandis qu'ils ne représentent qu'environ 30% lorsque I approche 10A. Si les premiers sont très fréquemment présents dans la littérature (Braunović et

al. 2007), le second type d'endommagement est moins classique. La figure 4.20 montre ces différents types d'endommagement.

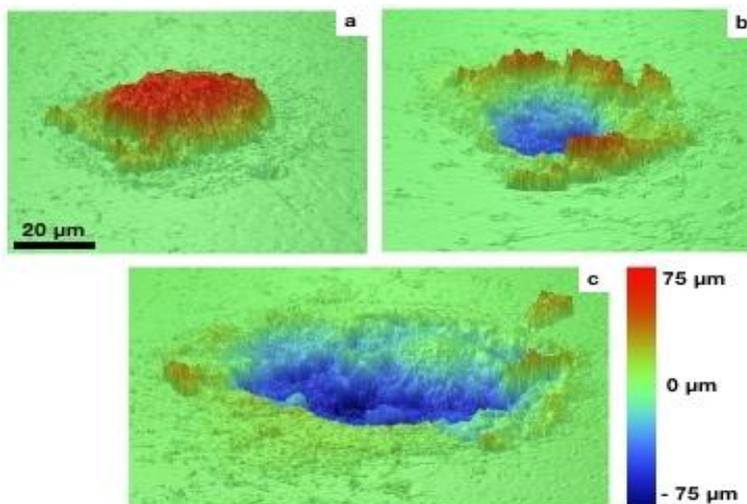


Figure 4.20. Observation de la topographie 3D (mesurée en interférométrie optique) pour différents types d'endommagement créés par arc électrique unique sur un collecteur P:
a) bosse, b) mixte, c) cratère

IV.3.2.2. Effets de différents paramètres sur l'arc

IV.3.2.2.1. Effet de la polarité

La littérature montre diverses opinions sur le phénomène de polarité dans le contact balais-collecteurs lors de la création d'arcs électriques. Lancaster montre que pour des balais en électrographite (de type E) frottant contre un collecteur en cuivre, le balai positif s'use d'avantage que le négatif sous l'effet de l'augmentation de la rugosité par l'ensemble des arcs et des flashes, ou sous l'effet de l'érosion due aux arcs (Lancaster 1963). Braunovic et al observent cependant le contraire (Braunović et al. 2007).

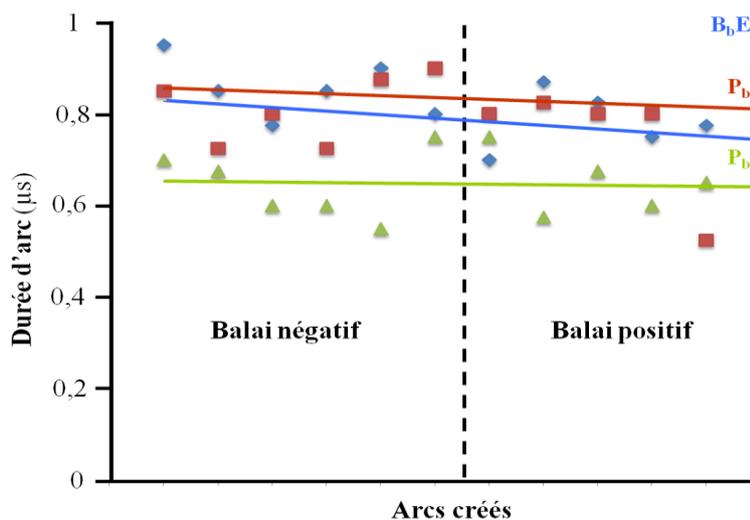


Figure 4.21. Influence de la polarité sur la durée d'arc (courant imposé de 6A)

La figure 4.21 ci-dessus met en évidence l'absence d'influence du sens de la circulation du courant électrique concernant la création d'arcs électriques d'ouverture pour les couples de

matériaux étudiés que sont B_bE, P_bP et P_bE. Il est nécessaire de noter la bonne reproductibilité des essais. La durée d'arc moyenne pour ces trois couples de matériaux testés se situe autour de $\tau_{a_{moyen}} = 0,75 \mu s$ avec un écart-type de 0,1. Il est important de noter que la tension d'arc moyenne $V_{a_{moyen}}$ (correspondant à la valeur de la tension lors du pic généré par la création de l'arc), enregistrée lors de ces essais est semblable pour chaque couple et se situe autour de $27 V \pm 5$.

La polarité ne semble donc pas influencer sur les caractéristiques de l'arc électrique. La durée et tension d'arc sont du même ordre pour les trois couples testés. Les études interférométriques ne montrent aucune corrélation entre endommagement et polarité.

Cependant, il s'avère difficile de conclure sur l'implication du phénomène de polarité lors de la création d'arcs du fait de la complexité et du nombre de paramètres influent sur ces phénomènes électriques.

IV.3.2.2.2. *Effet de la microstructure du matériau*

Des essais ont été réalisés pour mettre en évidence l'influence de la microstructure sur l'endommagement créé par l'arc électrique d'ouverture. Un arc unique a été créé à un endroit très spécifique et observé post arc en microscopie MEB (figure 4.22). Il est aisé de différencier la phase polymère PPS en gris clair de celle graphitique en gris foncé.

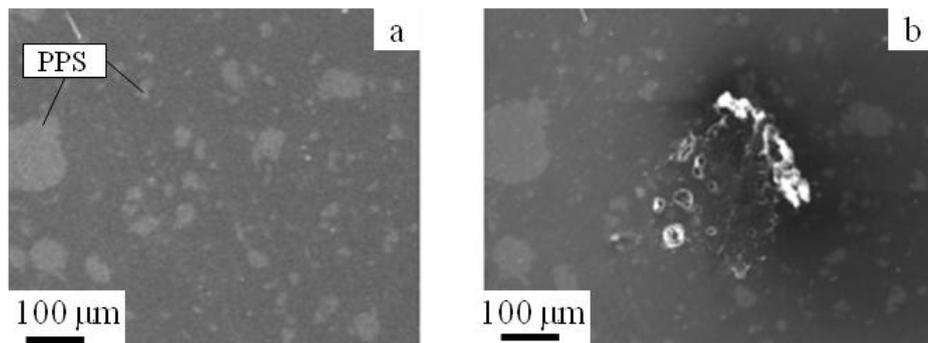


Figure 4.22. Images MEB-SE, disque P : a) avant l'arc, b) après l'arc électrique ($I= 6A$)

Malgré des conditions expérimentales identiques pour plusieurs essais, les résultats peuvent différer, en particulier pour les matériaux à liant organique tel que P. La microstructure peut en être la cause. En effet, un endommagement situé dans la phase polymère sera différent de celui créé sur la phase graphitique. Malgré la bonne reproductibilité des résultats, le matériau P comporte une structure très hétérogène ne permettant pas de conclure quant à la création de bosse et/ou cratère car les dimensions de la phase polymère (PPS) surfacique et subsurfacique sont plus petites que celles de l'endommagement : une bille de PPS peut atteindre $100 \mu m$ de diamètre tandis que la taille de l'endommagement peut aller jusqu'à $250 \mu m$. Il est donc impossible de différencier deux endommagements en fonction de l'emplacement de la microstructure du matériau.

Par ailleurs, les observations d'endommagements en microscopie optique montrent qu'il apparaît de manière quasi systématique autour de l'endommagement une auréole de couleur noire plus foncée que le graphite alentour (figure 4.23). Cette auréole correspond à une zone

dans laquelle le carbone est mieux organisé et comportant une morphologie et une rugosité différente à celle de la surface initiale (Ghimbeu et al. 2009).

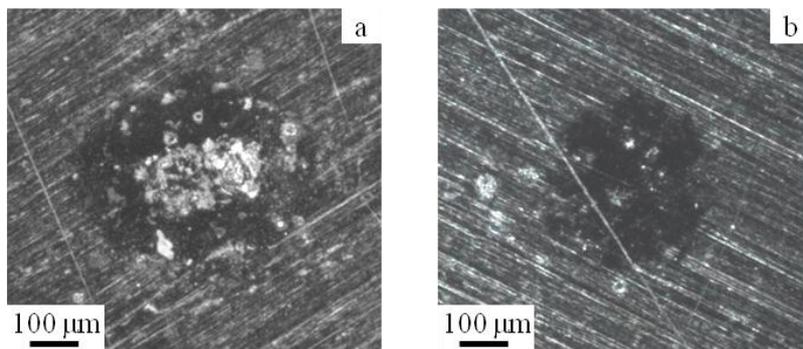


Figure 4.23. Mise en évidence d'une auréole noire cerclant l'endommagement(a) et le contact (b) (intensité 6A)

Ces différentes analyses peuvent être corrélées aux travaux de Senouci et al montrant la modification de l'organisation spatiale des graphènes en surface des contacts lors du passage d'un courant (Senouci, Frene, et al. 1999).

IV.3.2.2.3. *Effet de la vitesse*

La vitesse de levée du balai semble être un facteur déterminant sur la création de l'endommagement par arc électrique sur nos matériaux carbonés. Le dispositif ne permettant de tester que deux vitesses mais cependant très distinctes l'une de l'autre, des essais ont été réalisés à faible vitesse ($0,2 \text{ mm.s}^{-1}$) et haute vitesse (80 mm.s^{-1}).

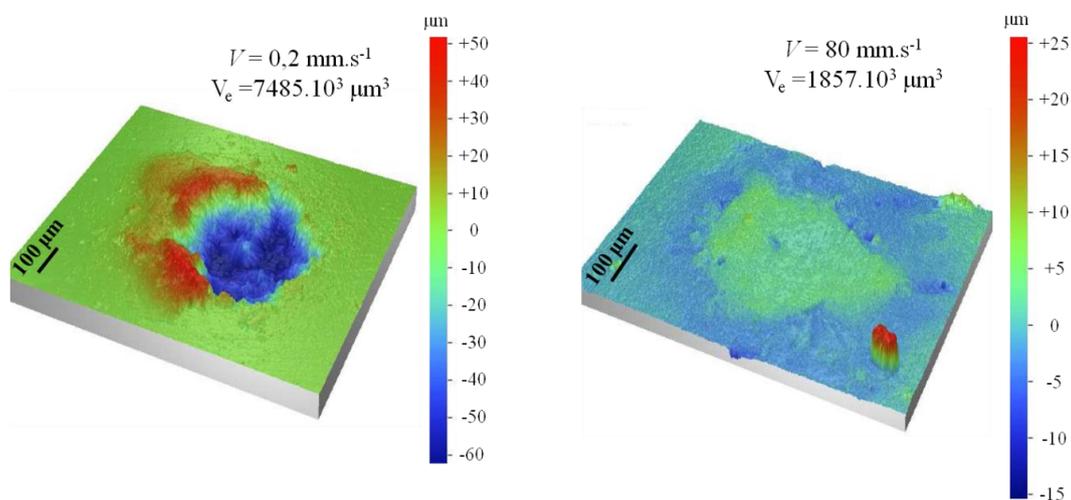


Figure 4.24. Observations interférométriques d'endommagements typiques pour deux vitesses distinctes (couple P_bP , $I=10A$, $F_n=5N$, $B0$).

La figure 4.24 ci-dessus montre deux exemples d'endommagement induits par l'arc électrique sur un collecteur carboné de type P dans un milieu carburant, pour une intensité de 6A. Il est aisé de remarquer une nette différence entre les deux vitesses concernant les volumes endommagés V_e . Ces deux volumes diffèrent d'un facteur 4 : $7,4.10^6 \mu\text{m}^3$ pour $0,2 \text{ mm.s}^{-1}$

contre $1,8 \cdot 10^6 \mu\text{m}^3$ pour $80 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Il est utile de préciser que le type d'endommagement créé est aléatoire et non fonction de la vitesse.

Les caractéristiques électriques mesurées montrent des différences en fonction de la vitesse. L'arc créé à basse vitesse est plus long comparé à celui créé en haute vitesse, respectivement $1,11 \mu\text{s}$ et $1,62 \mu\text{s}$, même si les maximums en tension d'arc sont similaires et se situant autour de 25V comme le montre la figure 4.25.

La tendance est donc de conclure à la forte influence de la vitesse de levée du balai. Ainsi, l'endommagement créé diminue fortement avec l'augmentation de cette vitesse.

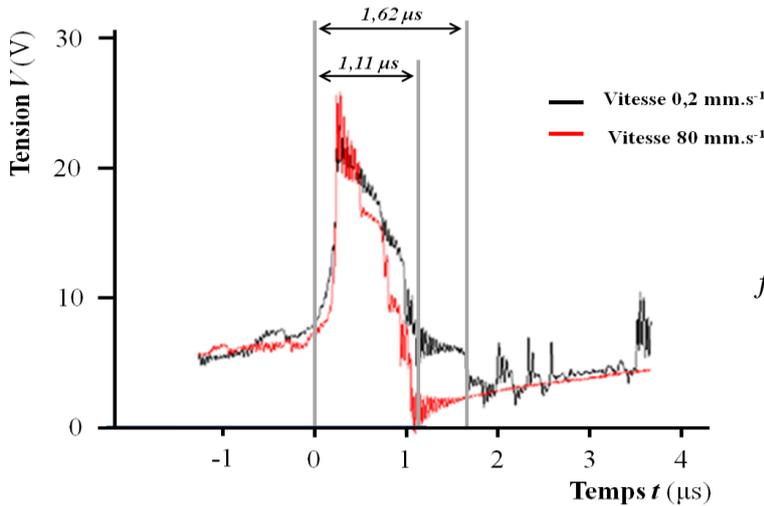


Figure 4.25. Evolution de la tension d'arcs électriques en fonction du temps pour différentes vitesses de levée du balai (couple P_bP , $I=10\text{A}$, $F_n=5\text{N}$, B0)

IV.3.2.2.4. Effet de l'environnement

Des essais ont été réalisés dans deux milieux différents, l'air ambiant et le diesel non-additivé B0 présenté précédemment. Ces deux milieux sont fréquemment testés dans la littérature, plus particulièrement par l'équipe de Sawa, Yamamoto et al. Ce dernier montre que le milieu carburant favoriserait un endommagement important en comparaison de l'air (Yamamoto et al. 1996). Les essais effectués sur nos matériaux carbonés ne montrent pas de réelles différences, tant pour les caractéristiques électriques que pour l'endommagement aléatoire même si la figure 4.26 ne montre que deux bosses.

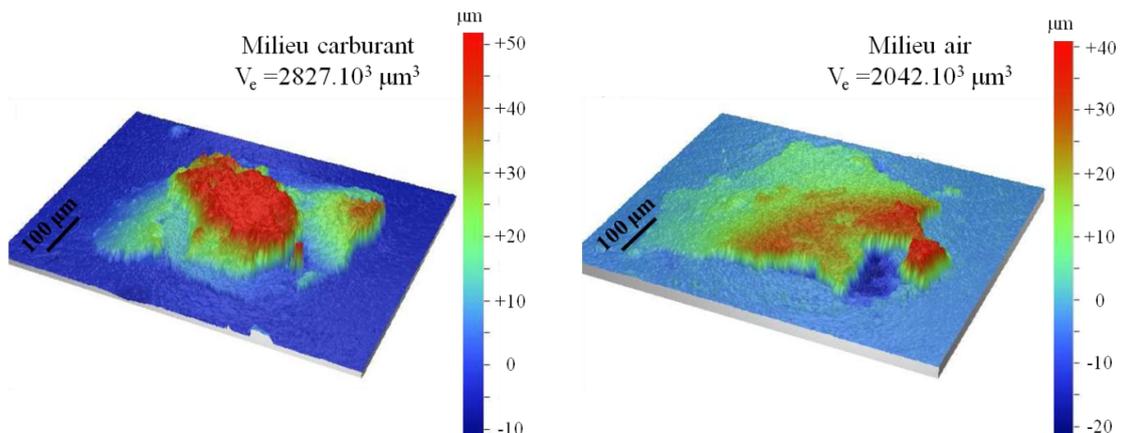


Figure 4.26. Observations interférométriques de deux endommagements en milieu carburant et air (couple P_bP , $I=6\text{A}$).

Les volumes endommagés se situent autour de $2,5 \cdot 10^6 \mu\text{m}^3$ pour les différents essais et ne permettent pas de conclure quant à un éventuel effet du milieu environnant sur l'arc électrique créé. La présence de carburant ne semble donc avoir aucun effet sur les propriétés de l'arc électrique statique créé ainsi que sur l'endommagement créé. De plus, le milieu ne semble pas induire un type d'endommagement particulier. Des analyses effectuées en microscopie électronique à transmission sur des poussières prélevées sur des endommagements de type bosses, montrent que celles-ci ne contiennent que du graphite. Aucune trace de suies n'est présente. En effet, le craquage du carburant sous l'effet de la forte chaleur dégagée par l'arc pourrait conduire à la formation de suies qui auraient pu se déposer en surface, expliquant alors le phénomène de bosses. Le carburant ne semble donc pas participer à la formation des bosses.

IV.3.2.2.5. *Effet de l'effort normal*

L'influence de l'effort normal sur les endommagements créés par arc électrique a été étudiée pour les matériaux carbonés de l'étude. Les surfaces du matériau E (collecteur) ne possèdent pas de cratères ou bosses observables par les techniques d'interférométrie et microscopie usuelles. Par conséquent seul le matériau P a été observé dans le cas du couple P_bP .

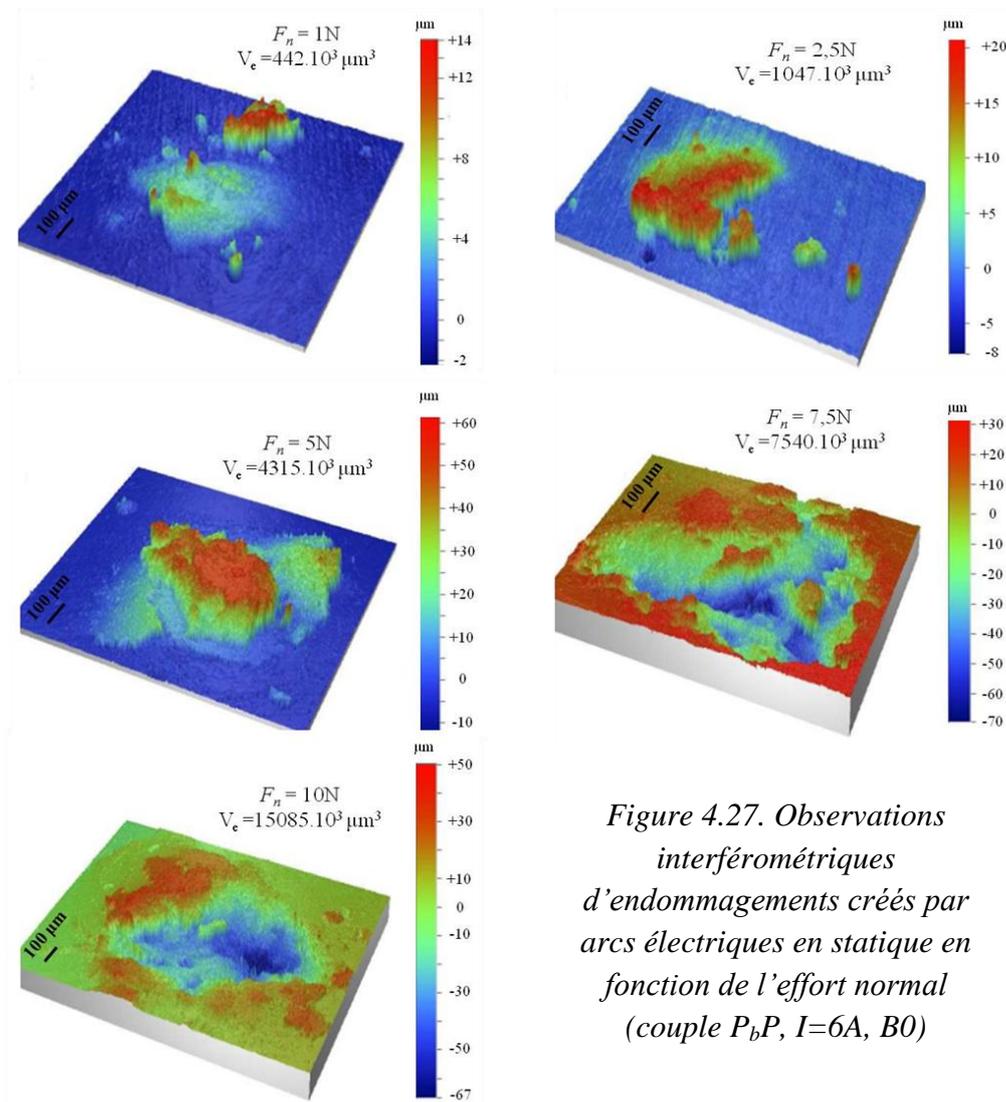


Figure 4.27. Observations interférométriques d'endommagements créés par arcs électriques en statique en fonction de l'effort normal (couple P_bP , $I=6A$, B0)

La figure 4.27 montre les topographies 3D en interférométrie optique d'endommagements. Le volume de l'endommagement est calculé en fonction de l'effort normal appliqué au contact balai-collecteur. La tendance est à créer davantage de cratères ou d'endommagements mixtes lorsque la charge augmente. Les valeurs des volumes endommagés calculés sont montrées sur la figure 4.28.

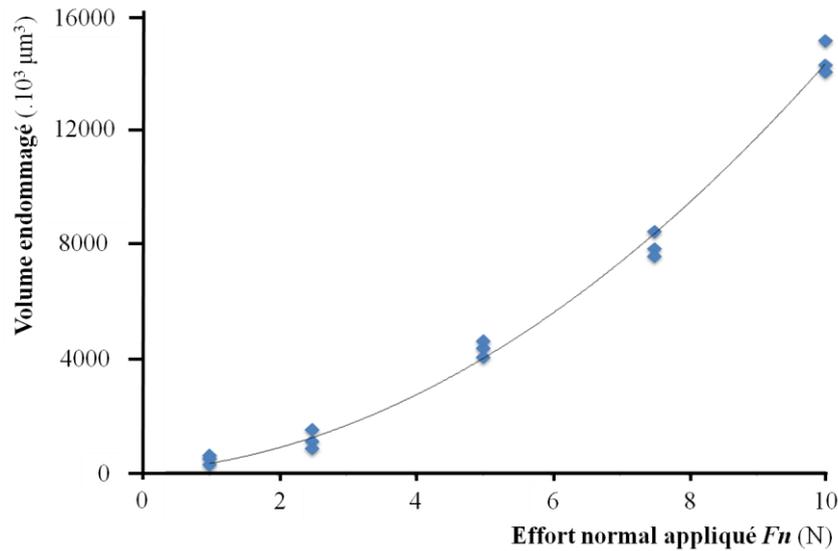


Figure 4.28. Evolution du volume endommagé en fonction de l'effort normal appliqué pour le couple testé P_bP

L'endommagement créé par un arc en statique est fortement dépendant de l'effort normal appliqué F_n au contact balai-collecteur. En effet l'augmentation de cet effort entraîne une augmentation exponentielle du volume endommagé. Les caractéristiques électriques de l'arc sont elles aussi différentes selon l'effort normal appliqué et également corrélés à cette précédente conclusion. En effet même si les signaux de tension des différents arcs créés sont similaires (autour de $25\text{V} \pm 5\text{V}$), les signaux de courant diffèrent comme le montre la figure 4.29.

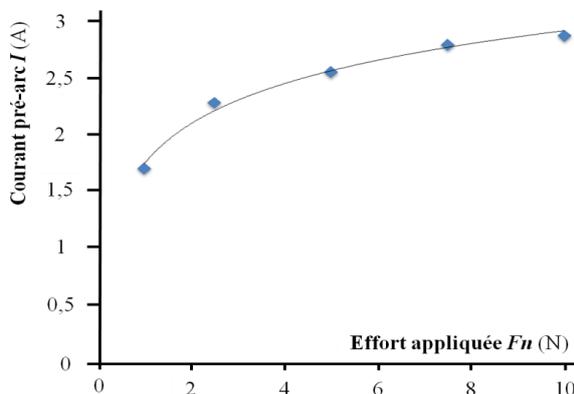


Figure 4.29. Evolution du courant pré-arc en fonction de l'effort appliqué au contact pour le couple testé P_bP

Le courant initial traversant le contact est de 6A. Lors de la montée du balai, la pression appliquée diminue, augmentant ainsi la résistance de contact R_c . Selon la loi ohmique décrivant le passage du courant dans notre circuit expérimental (cf. II.2.4), cette augmentation de la résistance va diminuer la valeur du courant traversant le contact, la tension restant stable.

Le courant diminue (pour atteindre une valeur que l'on nommera courant pré-arc) jusqu'à la création de l'arc qui le fait chuter rapidement. La valeur du courant pré-arc susnommé correspond à cette valeur et l'effort appliqué influe sur celle-ci comme le montre la figure 4.29. L'augmentation de l'effort appliqué impose une augmentation logarithmique du courant précédant l'arc. Ce phénomène peut s'expliquer par la variation de la surface réelle de contact. Celle-ci va augmenter avec l'effort appliqué et ainsi engendrer une diminution de la résistance de contact. La valeur de la tension restant constante, le courant pré-arc augmente.

IV.3.2.2.6. *Influence du courant circulant lors de l'arc créé*

La figure 4.30 met en évidence l'influence de l'intensité du courant circulant dans le contact sur les caractéristiques de l'arc créé à travers la durée d'arc τ_a . Selon la littérature, l'intensité du courant est plus importante que la tension pour les conséquences induites par l'arc électrique (Holm 1967) (Lancaster 1963). L'équipe de Sawa montre un comportement électrique de l'arc à travers sa durée, similaire à nos essais même si l'inductance présente dans son circuit électrique nous oblige à diviser ses valeurs par 10 selon (Shigemori & Sawa 2004).

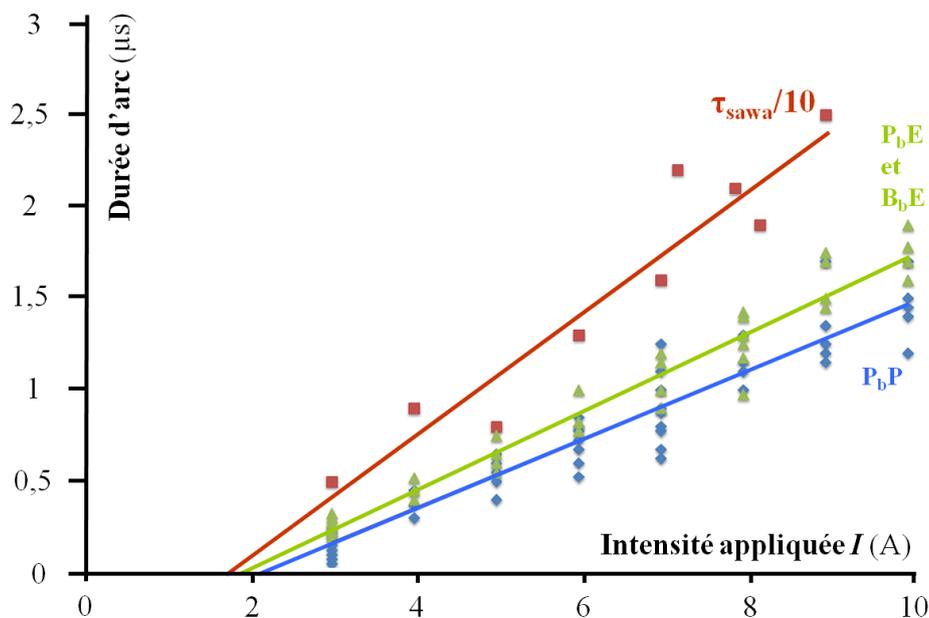


Figure 4.30. Comparaison de la durée d'arc statique créé en fonction de l'intensité entre la littérature et le couple P_bP , P_bE et B_bE dans un milieu B0 (Shigemori & Sawa 2004)

L'arc électrique ne se crée pas en dessous d'un courant minimum I_{min} se situant autour de 2A pour nos matériaux comme pour la littérature. Les durées d'arcs générés en milieu B0 sur les couples de matériaux étudiés sont des fonctions linéaires de I présentant des pentes similaires. Les durées d'arcs effectués en statique sont nettement supérieures à celles observées lors d'essais de frottement réalisés avec la même intensité. Ces dernières se situant autour de 0,2 µs pour des intensités de courant se situant autour de 6A selon Cornuault (Cornuault 2008). L'énergie développée en "statique" est plus importante lors du frottement. La partie suivante étudiera cette approche énergétique (cf §4.3.2.3).

La figure 4.31 met en évidence l'augmentation linéaire des endommagements induits par les arcs électriques créés en statique avec celle de l'intensité pour le couple P_bP. Les proportions d'îlots et de cratères générés lors des essais semblent s'inverser lorsque le courant traversant augmente de sorte qu'à 3A, 60 à 80% des endommagements observés sont des îlots tandis qu'ils ne représentent que 20 à 40% autour de 9A.

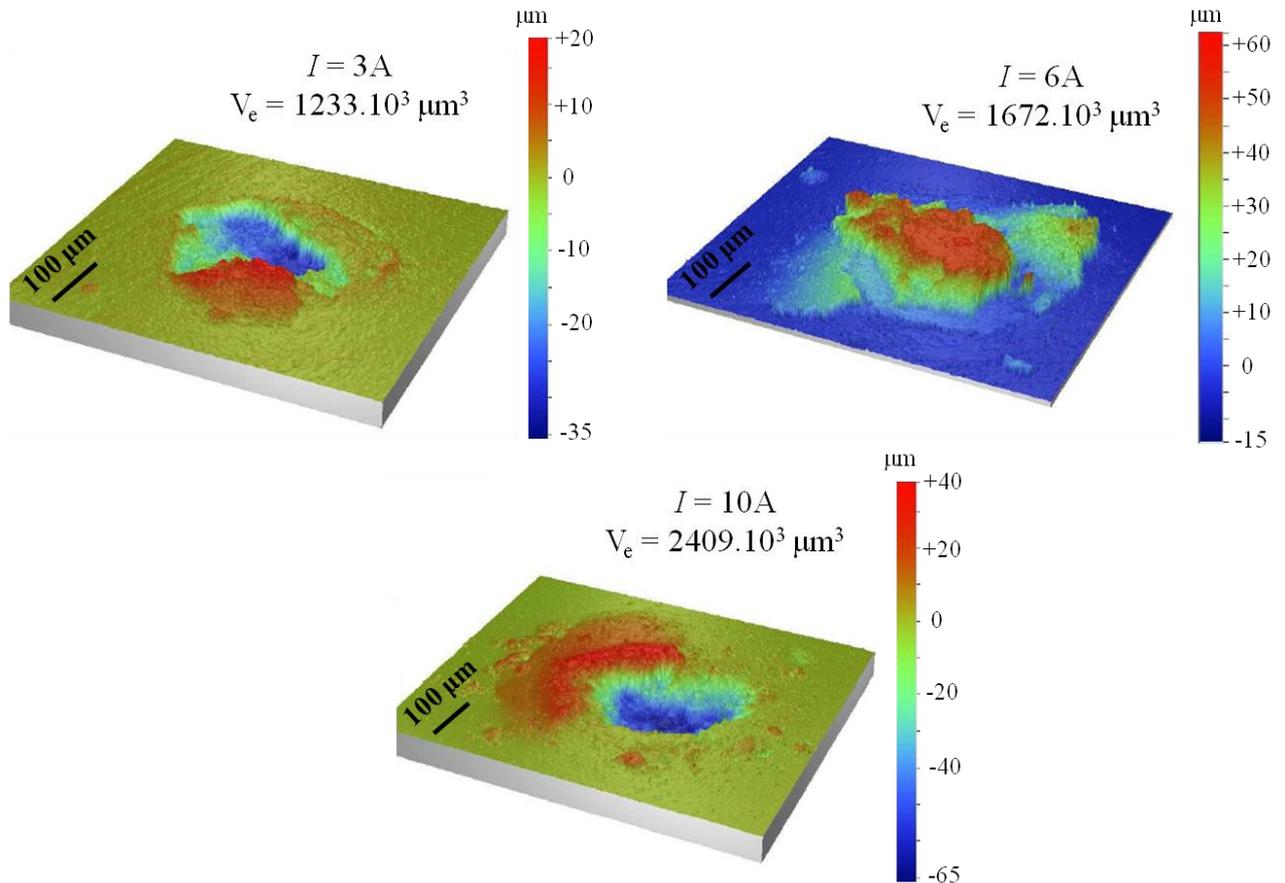


Figure 4.31. Endommagements induits par arcs électriques en fonction de l'intensité (contact P_bP, milieu B0)

IV.3.2.3. Evolution de l'énergie d'arc

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, la tendance est donc de créer en "statique" des arcs développant une énergie d'arc E_a plus importante que lors du frottement pour des arcs créés en "dynamique" selon la relation qui sera utilisée dans le paragraphe suivant :

$$E_a = \int \frac{1}{2} \cdot V_a(t) \cdot I_a(t) \cdot dt \quad \text{Equation 4.7}$$

Avec V_a la tension d'arc et I_a l'intensité d'arc.

La figure 4.32 montre la relation existant entre le volume endommagé et l'énergie d'arc pour le couple P_bP pour différentes intensités. Holm met en évidence que cette énergie d'arc dissipée est indépendante de la tension (Holm 1967). Cependant le courant influence fortement le volume endommagé ainsi que l'énergie d'arc. Quatre courants sont représentés et montrent de

réelles différences mettant en avant différentes zones propres à chacun. Le volume endommagé qu'il apparaisse sous forme de cratère ou de bosse, augmente de façon générale avec l'énergie d'arc E_a .

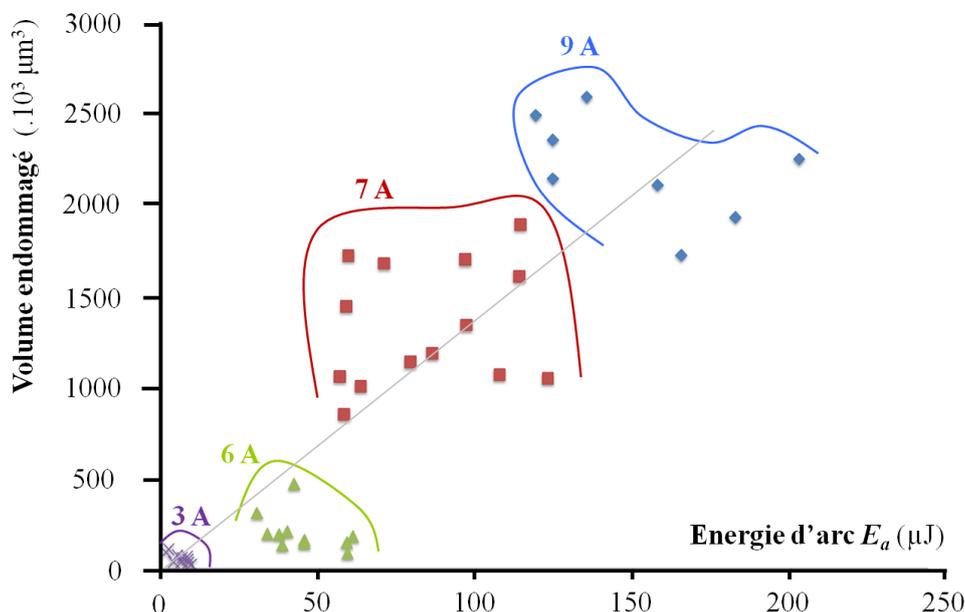


Figure 4.32. Evolution du volume endommagé en fonction de l'énergie d'arc pour différentes intensités (couple PbP, milieu B0)

Les résultats montrent qu'une augmentation de l'énergie d'arc conduit à un endommagement plus important ne pouvant être dissocié de la grandeur du courant traversant.

IV.3.3. Discussions – modèle d'endommagement par arc

IV.3.3.1. Variations de volumes : cratères ou bosses

Notre étude a montré différents résultats quant à la création d'un arc électrique unique lors du décollement du balai avec le collecteur. L'arc possède un effet très faible sur le matériau E ce qui ne nous a pas permis de quantifier l'endommagement éventuel. Le matériau P quant à lui montre deux types d'endommagements distincts : un cratère ou une bosse en quantité aléatoire. Les proportions d'îlots et de cratères générés semblent s'inverser lorsque le courant traversant augmente de sorte qu'à 3A, 60 à 80% des endommagements observés sont des îlots tandis qu'ils ne représentent que 20 à 40% à 9A.

⇒ Variation négative du volume : cratère

L'endommagement sous forme de cratère est le plus cité dans la littérature lors de la création d'un arc électrique sur des matériaux carbonés. La figure 4.33 montre ce type d'endommagement observé en microscopie électronique à balayage (électrons secondaires, MEB-SE). Le faciès du cratère est brutal, les plans graphitiques empilés sont visibles en fond de cratère et sur son pourtour de façon désordonnée. Nous pouvons noter la microstructure spécifique au matériau P (agrégats de graphite en forme de boules, voir chapitre 1). Des plis

composés exclusivement de graphite sont mis en évidence aux bords du cratère et peuvent témoigner du mécanisme d'endommagement. En effet, ces formes pourraient témoigner d'une "explosion subsurfacique brutale".

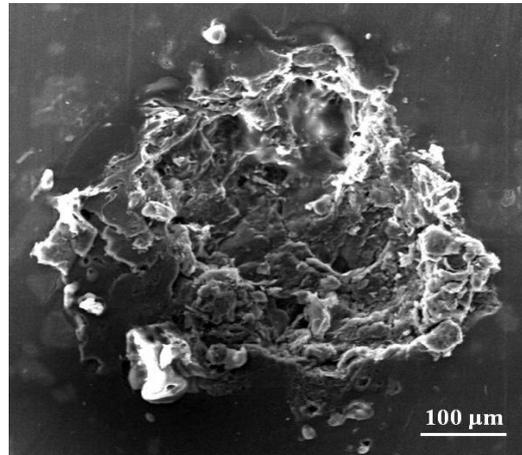


Figure 4.33. Observations en Microscopie Electronique à Balayage d'un cratère (Matériau P, Milieu B0, 6A)

Cette explosion peut s'expliquer par la présence de polymère dans le matériau qui, sous la forte énergie associée à l'arc électrique (avec une température pouvant atteindre plusieurs milliers de degrés selon (Holm 1967)), passerait directement de la phase solide à la phase gazeuse. Le gaz écarterait violemment les plans graphitiques provoquant leur éjection de la zone d'arc.

Des trous sont visibles autour de la zone endommagée. Ils correspondent à la phase polymère. Cette dernière apparaît en blanc lors de l'observation MEB-SE. La microstructure typique au matériau P explique ce phénomène. Le polymère PPS se trouve dans le matériau sous forme de billes creuses et, lors de l'arc électrique, il peut subir une liquéfaction avec l'augmentation de la température et donc remplir le creux de la bille puis se solidifier à nouveau ou être éjecté de la zone d'arc, laissant alors place à un trou. Des analyses EDX en MEB confirment la présence de Soufre et par conséquent du polymère PPS autour de ces trous circulaires.

⇒ Variation positive du volume : bosse

Si les endommagements de type cratère sont largement recensés dans la littérature, ceux de type bosse ou îlot le sont beaucoup moins (Braunović et al. 2007). La taille des endommagements de ce type est similaire à ceux de type cratère avec un diamètre de l'ordre 150-250 µm.

La figure 4.34 permet d'observer une bosse en microscopie électronique à balayage créée en surface d'un collecteur de type P. Une zone plane paraît surélevée par rapport à la surface initiale de contact. La zone endommagée est essentiellement composée de graphite non transformé. Certains procédés comportant des décharges électriques peuvent ainsi former des fullerènes, nanotubes...etc. selon (Creasy & Brenna 1990), (Parkansky et al. 2004), (Takikawa et al. 1999).

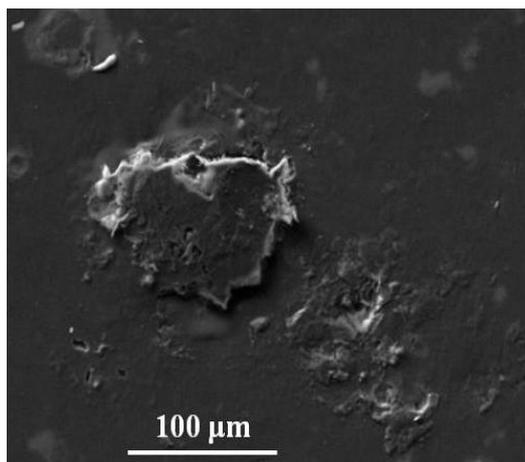


Figure 4.34. Observations en Microscopie Electronique à Balayage d'une bosse (Matériau P, Milieu air, 6A)

La présence de ces îlots possède plusieurs explications. La première pourrait être un transfert de matière du balai vers le collecteur. L'arc électrique pourrait créer un détachement de particules surfaciques du balai grâce à l'élévation de température, créant ainsi un cratère sur le balai. Les particules éjectées se fixeraient alors sur la surface du collecteur dans la zone d'arc, créant ainsi une bosse ou îlot. La deuxième serait un processus de transformation volumétrique du matériau que l'on peut retrouver lors de la création du graphite expansé (voir chapitre 1). L'élévation de la température due à l'énergie dissipée de l'arc électrique vaporiserait le soufre (principalement utilisé lors de la création du graphite expansé). Ce phénomène créerait un éclatement des empilements des feuillets graphitiques sans les éjecter hors de la zone d'arc, générant ainsi une bosse en surface.

La figure 4.35 permet d'observer la section d'un îlot obtenue par abrasion ionique (collecteur de type P) dans une direction perpendiculaire à la surface de contact (Cornuault 2008). Les feuillets de graphite se sont séparés. Il faut noter l'absence du polymère sous sa forme initiale. Il peut cependant avoir subi une carbonisation avec la haute température associée à l'arc électrique. Cependant une carbonisation ou la disparition du polymère peut permettre de supporter la deuxième explication précédemment énoncée.

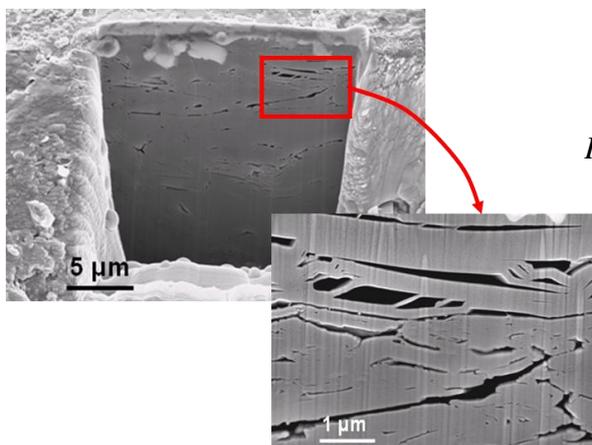


Figure 4.35. Observations au MEB de la section d'un endommagement "bosse" obtenue par une abrasion ionique (Couple PbP, B0, 4A) selon (Cornuault 2008)

Les figures 4.36 et 4.37 sont respectivement une observation en interférométrie optique et des observations en Tomographie à rayons X de sections perpendiculaires à la surface de contact d'un même ilot.

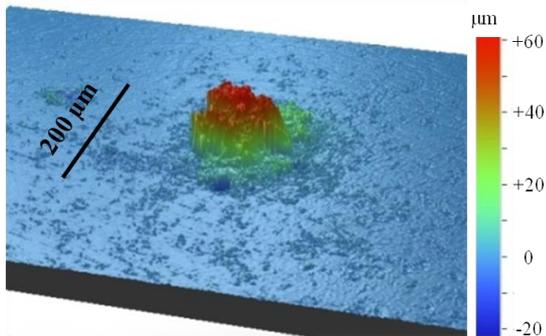


Figure 4.36. Observations en interférométrie optique d'une bosse (Couple P_bP , B0, 6A)

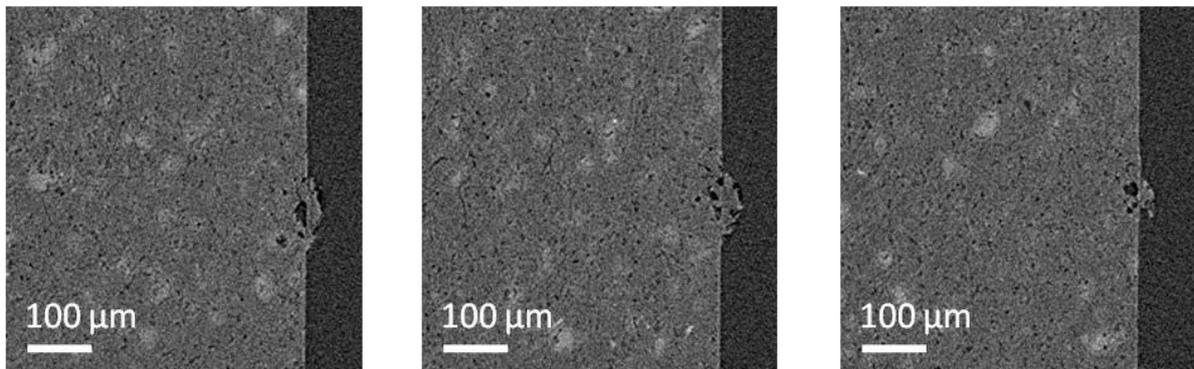


Figure 4.37. Observations en Tomographie à rayons X d'une bosse : sections perpendiculaires à la surface (Couple P_bP , B0, 6A)

Ces diverses observations sont en accord avec celles effectuées en MEB suite à l'abrasion ionique précédente. En effet, la zone affectée par l'arc électrique sous la surface de contact comporte une importante porosité représentée en noir sur la figure 4.35 nettement supérieure à la porosité initiale du matériau (augmentation d'environ 40%). L'abrasion ionique a tendance à lisser la surface observée alors que la tomographie étant une technique non-destructive, la porosité réelle peut être observée. Cette conclusion confirme la théorie de l'expansion des feuillets de graphite due à la sublimation des atomes de soufre.

Les conséquences de la création d'un ilot sur les propriétés mécaniques ne sont pas favorables à sa tenue mécanique. En effet, la dureté est environ 5 fois plus faible sur ce type d'endommagement (en moyenne 25 MPa) par rapport à celle du matériau initial. Cette baisse des propriétés mécaniques est également énoncée dans la littérature (Cornuault 2008). L'arc électrique, dans le cas de la création d'un ilot a pour conséquence l'effondrement des propriétés mécaniques surfaciques du matériau testé.

⇒ Variation mixte du volume : cratère et bosse

L'endommagement mixte qui est composé d'un cratère associé à une bosse de tailles respectives variables ne représente que 10 % des cas et reprend les mécanismes expliqués ci-dessus.

Des études chimiques effectuées par le laboratoire IS2M partenaire du projet ont complété ces informations. Il s'est avéré que l'arc électrique modifie les propriétés morphologiques et structurales du carbone influant alors le processus d'adsorption. La surface endommagée par un arc électrique dans un milieu carburant favoriserait l'adsorption.

Les hypothèses avancées précédemment sont cohérentes avec le très faible endommagement observé sur les matériaux E, ce dernier ne contenant pas de phase organique et étant composé exclusivement de graphite.

IV.3.3.2. Modèle d'endommagement par arc électrique

Les essais de création d'arcs électriques en statique ont permis de mettre en évidence différents modes d'endommagement pour les matériaux carbonés de l'étude. Le matériau E (collecteur) n'est que très peu affecté par l'arc électrique tandis que le matériau P (collecteur) ainsi que B (balai) montre différents comportements à l'arc. Le mécanisme d'endommagement de ces matériaux est schématisé sur la figure 4.38 ci-dessous.

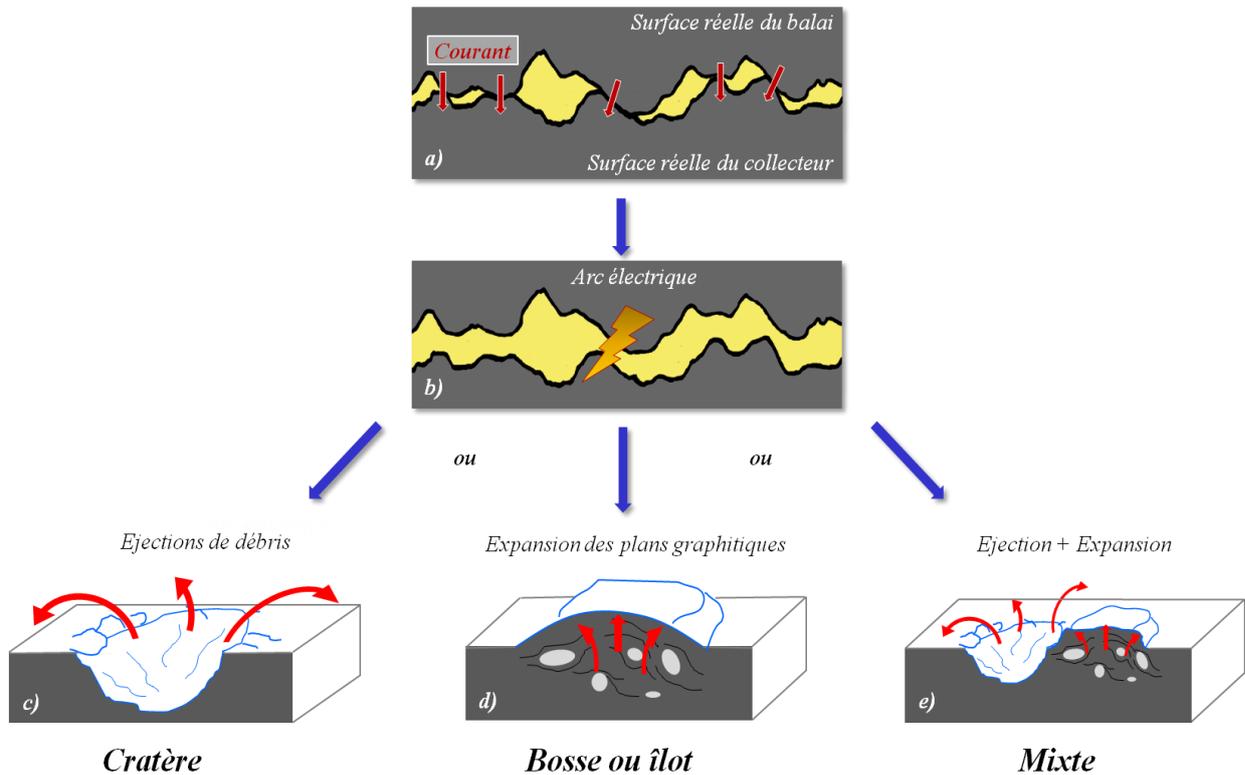


Figure 4.38. Mécanisme d'endommagement par arc électrique des matériaux P et B.

Le mécanisme d'endommagement peut être décrit comme suit :

- a) Le contact est effectué entre le balai et le collecteur entre les aspérités les plus importantes. Le courant circule dans ce contact, le phénomène de constriction induit une résistance de contact. La présence du carburant n'a pas d'effets observables lors de cette étape mais est présent au sein de l'interface.

- b) La levée du balai permet le décollement local des surfaces, créant ainsi un arc électrique. Ses caractéristiques électriques et sa durée sont variables même si la tension reste quasi similaire pour tous les essais (environ 25V). L'arc créé est très court (quelques microsecondes) et l'enregistrement des signaux électriques permet un calcul de l'énergie diffusée. Plusieurs processus d'endommagement sont alors possibles.
- c) L'arc a pour conséquence la création d'un cratère : l'énergie développée par l'arc électrique va entraîner la sublimation du soufre présent sous la surface, menant ainsi à l'éjection de particules ou débris de matière hors de la zone d'arc laissant place à un cratère (d'une taille comprise entre 150 et 250 μm).
- d) L'arc donne lieu à une bosse ou îlot : l'énergie émise par l'arc électrique va sublimer le soufre présent sous la surface mais la tenue mécanique des graphènes sera suffisante pour empêcher leur éjection mais suffit à l'expansion de ces plans graphitiques. Le soufre laisse place alors à une porosité conséquente sous la surface de l'îlot. Ce processus ressemble fortement à celui utilisé pour la création du graphite expansé. La taille de l'endommagement constaté est du même ordre de grandeur que les cratères.
- e) L'arc donne lieu à un endommagement mixte : les deux processus d'éjection et d'expansion précédents sont constatés. Il reste cependant possible que du polymère soufré soit liquéfié, éjecté puis solidifié autour de l'endommagement créant ainsi une bosse. La taille totale de l'endommagement reste similaire aux précédentes.

La diminution du nombre d'ilots observés lorsque le courant traversant le contact augmente permet d'étayer les hypothèses précédentes. En effet, le courant augmentant, l'énergie émise par l'arc électrique est augmentée et favorise ainsi l'éjection des débris hors de la zone d'arc. Même s'il n'est pas possible d'observer la transformation du matériau pendant l'arc électrique, les hypothèses énoncées précédemment semblent correspondre aux phénomènes engendrés par la création d'un arc électrique.

IV.4. Discussions : vers un mécanisme élémentaire d'usure

Les essais et observations réalisés tant lors du frottement du double contact que lors de la création d'arcs électriques en "statique", montrent la réelle difficulté et la complexité du tribosystème étudié. La nature des matériaux constituant le couple testé ont une influence très importante quant aux mécanismes d'usure alors générés. La vitesse de glissement, l'intensité du courant, la nature du milieu ainsi que l'effort normal jouent eux aussi un rôle plus ou moins primordial pour définir le comportement tribologique du double contact balais-collecteur.

Les essais et observations réalisés montrent que l'origine principale de l'usure du double contact balais-collecteur serait l'existence de perturbations électriques pouvant être des arcs ou des sparks. Lorsque le courant est absent du contact, l'usure est très faible et difficilement quantifiable et correspond à un détachement de feuillets de graphite étant automatiquement réintroduits dans le contact, créant ainsi une auto-reconstruction de la surface et facilitant ainsi le frottement. L'introduction d'un courant électrique, à l'inverse, va modifier totalement les mécanismes d'usure et ainsi augmenter fortement cette dernière. Les surfaces observées sont fortement striées et des blocs de matière en surface d'un diamètre équivalent maximum proche de 150 μm ont été arrachés. Deux phases distinctes caractérisent le frottement : une phase initiale dite d'accommodation durant laquelle des décharges lumineuses sont observées à l'œil nu et dont le taux d'usure est très fort, puis d'une phase stationnaire débutant après quelques kilomètres parcourus de frottement et correspondant à la phase d'essai.

Les perturbations électriques rencontrées dans la littérature sont des arcs ou des sparks selon (Holm 1967) (Shobert 1965) (Shobert 1976). Pour le second phénomène susnommé, les auteurs préconisent l'existence d'un spot unique en contact se dilatant fortement sous l'effet Joule avant d'être éjecté puis un autre spot décrira le même processus selon (Bryant 1989) (Bryant 1991) (R. A. Burton & R. G. Burton 1989) (Lawson & Dow 1985) (Liu et al. 1992). Cette hypothèse n'est pas cohérente avec les mesures et observations réalisées. De plus, les sparks sont typiquement observés pour des vitesses de glissement et/ou des intensités plus grandes que les nôtres. Le contact serait alors sujet à des arcs électriques induits par une séparation des surfaces en régime transitoire. Cette séparation peut être due à la génération d'une portance de courte durée par le fluide environnant ou à un bond du balai causé par des obstacles pouvant être créés par des débris ou des aspérités.

Afin de mieux comprendre les phénomènes tribologiques induits par le frottement, des arcs électriques d'ouverture ont été créés en statique à l'aide d'un dispositif spécifique annexe au tribomètre HVSF. Les signatures électriques de ces derniers et les observations post-arc similaires à celles considérées en frottement ont permis de conforter l'hypothèse d'usure par arc électrique même si la durée d'arc en frottement reste inférieure selon (Cornuault 2008).

En premier lieu, il est nécessaire de différencier le matériau E de P et B car ne possédant pas de phase organique, les phénomènes d'usure induits par l'arc sont différents. Même si les

essais de frottement montrent une usure non négligeable des couples P_bE et B_bE , les endommagements du matériau E par arc électrique ne sont pas quantifiables. Nous nous sommes donc focalisés sur les matériaux à liant organique et plus particulièrement au couple P_bP .

Les endommagements induits par la création d'un arc d'ouverture sur les matériaux carbonés à liant polymère étudiés sont de trois types : le cratère, l'îlot ou bosse et le mixte (reprenant les mécanismes des deux premiers). L'observation de cratères est classiquement rencontrée dans la littérature tandis que la formation de bosses est très peu référencée. La tenue mécanique en surface de la bosse est plus faible que la surface initiale, ce qui permet d'imaginer sa destruction due au frottement et/ou à la pression locale appliquée.

Compte tenu de l'ensemble de ces observations, nous formulons l'hypothèse que le double contact balais-collecteur suit le mécanisme d'usure schématisé sur la figure 4.39 et qui peut être décrit comme suit (seul un contact balai-collecteur est représenté) :

- Le contact entre les surfaces est assuré : on est en lubrification limite, les efforts mécaniques ainsi que le passage d'un courant électrique sont assurés (*a*). L'aire réelle de contact mécanique étant supérieure à l'aire réelle de contact électrique, de nombreux spots de petite taille se déforment élastiquement.
- Il est nécessaire, à ce stade, de différencier l'usure électrique (*b*) de l'usure mécanique (*c*). La première provient d'une séparation transitoire des surfaces : une légère hausse locale de la force de portance du fluide peut entraîner un décollement des surfaces accentué par la réduction de la charge normale appliquée et par l'augmentation de la vitesse de glissement imposée. Un arc électrique d'énergie variable est alors créé si la distance séparant les deux surfaces est suffisante et si le courant traversant dépasse une intensité critique spécifique aux matériaux. La seconde provient d'une usure abrasive des aspérités générant inévitablement des débris d'usure (*f*).
- La séparation des surfaces (*b*) peut donner lieu soit à un cratère (*d*) soit à une bosse (*e*). La création d'un cratère entraîne une perte de matière en surface et des débris sont générés (*g*). La capacité des débris à sortir du contact dépend de leur énergie cinétique lors du mécanisme d'éjection et de l'entraînement du fluide. Cette explosion subsurfacique brutale pouvant être créée par le passage rapide du polymère de l'état solide à gazeux associé à une fatigue thermique peut fragiliser les contours du cratère sous forme de fissures ou expansion de plans graphitiques. La création d'une bosse (*e*) entraîne une hausse de l'aspérité en provoquant l'expansion des plans graphitiques présents sous la surface par un changement d'état du polymère de solide à gazeux. Cette protubérance surfacique sera détruite soit par la fermeture du contact, soit par le cisaillement créé par le frottement du fait de sa faible tenue mécanique. L'abrasion alors réalisée laissera place à une surface d'altitude similaire à celle initiale. Toutefois, la présence de porosité ou vide subsurfacique ou surfacique (apparition de cratère) est observée et pourrait modifier la tenue mécanique et ainsi donc l'usure. Les débris alors

générés (*h*) sont évacués par le fluide ou réintégrés dans le contact mais il est difficile d'évaluer un volume d'usure total car l'interaction de la surface antagoniste peut alors conduire à un volume de débris supérieur ou inférieur à ce dernier.

Les débris alors générés dans les différents cas sont principalement évacués du contact par le mouvement du fluide. Il est possible qu'une partie des débris réintègre la surface par un phénomène d'adhésion-transfert (Cornuault 2008) observé sous forme d'un film pouvant recouvrir partiellement la surface frottée, qui sera d'autant plus grand si la quantité de débris est importante. De plus, il aura lieu principalement pour le couple P_bP.

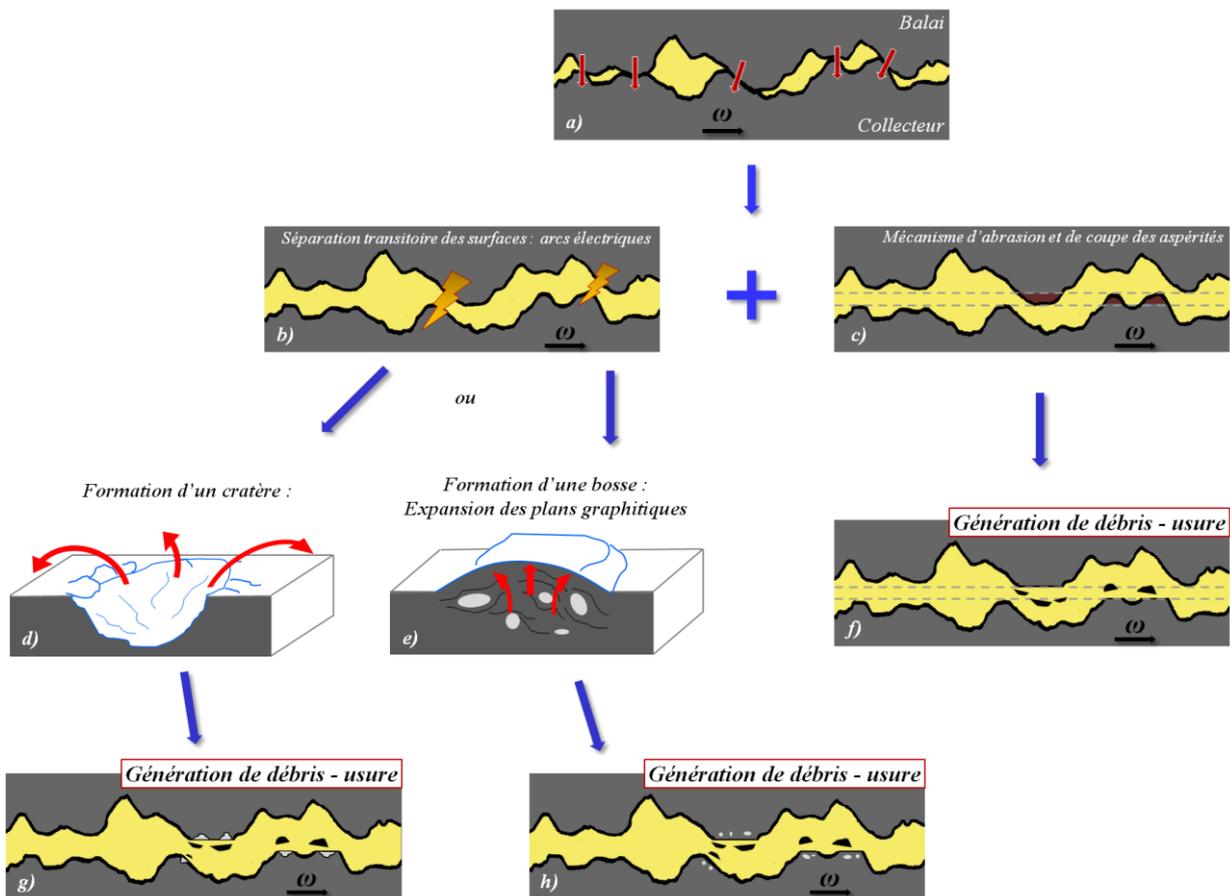


Figure 4.39. Mécanisme élémentaire d'usure lors du frottement de matériaux carbonés à liant organique.

IV.5. Bibliographie

- Braunović, M., Konchits, V.V. & Myshkin, N.K., 2007. *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology*, CRC Press ed.
- Bryant, M.D., 1991. A particle ejection mechanism for brushwear. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, 14(1), p.71-78.
- Bryant, M.D., 1989. Electrically and frictionally derived mound temperatures in carbon graphite brushes. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 12(2), p.229 - 236.
- Burton, R.A. & Burton, R.G., 1989. Experiments and analysis of the thermoelastic behavior of a brush on a slipring. Dans *Proceedings of the Thirty Fifth Meeting of the IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Chicago, p. 25-30.
- Clark, W.T., Connolly, A. & Hirst, W., 1963. The friction and wear of electrographite. *British Journal of Applied Physics*, p.pp. 20-27.
- Cornuault, P.-H., 2008. *Contribution à l'étude du comportement tribologique de matériaux carbonés pour applications électriques*. thèse. Ecole Centrale de Lyon. N° ordre 2008/17.
- Cornuault, P.-H., Nauleau, B. & Kapsa, P., 2008. A new tribometer to measure wear and low-friction of high velocity sliding electrical contacts immersed in organic liquids. Dans ICEC. Saint Malo.
- Creasy, W.R. & Brenna, J.T., 1990. Formation of high mass carbon cluster ions from laser ablation of polymers and thin carbon films. *Journal of Chemical Physics*, 92(4).
- Féchant, L., 1996. *Le Contact électrique: Phénomènes physiques et matériaux* Hermès., Paris.
- Ghimbeu, C., Gadiou, R. & Vix, C., 2009. Compte rendu de réunion - Projet Biocolcarbone.
- Haug, R., Hannachi, F. & Leclercq, M., 1991. *Méthode de mesure électrique de la dureté d'un matériau* Measurement Science and Technology.,
- Holm, R., 1967. *Electric contacts - Theory and application* Springer-Verlag., Berlin.
- Jones, G.A., 2004. On the tribological behaviour of mechanical seal face materials in dry line contact: Part II. Bulk ceramics, diamond and diamond-like carbon films. *Wear*, 256(3-4), p.433-455.
- Lancaster, J.K., 1963. The influence of arcing on the wear of carbon brushes on copper. *Wear*, 6(5), p.341-352.
- Lawson, D.K. & Dow, T.A., 1985. The sparking and wear of high current density electrical brushes. *Wear*, 102(1-2), p.105-125.
- Liu, H.P., Carnes, R.W. & Gully, J.H., 1992. Measurement and prediction of brush interface

- temperature at sliding electrical contact. *Proceeding of the Thirty-Eight IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*.
- Mazuyer, D., 2007. Cours de tribologie de 3ème année de l'Ecole Centrale de Lyon.
- Parkansky, N. et al., 2004. Single-pulse arc production of carbon nanotubes in ambient air. *Journal of Physics - part D* : *Applied Physics* 37(19).
- Popa, A. & Militaru, R., 2002. Experimental contributions regarding the influence of pressure on the electric parameters for sliding electric contacts. *Facta Universitatis - series* : *Mechanical Engineering*, 1(9), p.pp. 1209 - 1215.
- Robert, F. et al., 1995b. Combined influence of an inert gas environment and a mechanical action on a graphite surface. *Wear*, 181-183(Part 2), p.687-690.
- Savage, R.H. & Robert, H., 1948. Graphite Lubrication. *Journal of Applied Physics*, 19(1), p.1 - 10.
- Senouci, A., Frene, J. & Zaidi, H., 1999. Wear mechanism in graphite-copper electrical sliding contact. *Wear*, 225-229(Part 2), p.949-953.
- Shigemori, T. & Sawa, K., 2004. Characteristics of carbon and copper flat commutator on DC motor for automotive fuel pump. Dans *Proceedings of the Fiftieth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. p. 523 - 527.
- Shobert, E.I., 1965. *Carbon brushes - The physics and chemistry of sliding contacts*, New-York: Chemical publishing company.
- Shobert, E.I., 1976. Carbon, graphite, and contacts. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, 12(1), p.62 - 74.
- Stachowiak, G.W. & Batchelor, A.W., 2001. *Engineering Tribology* second edition., Butterworth - Heinemann.
- Stempflé, P. & von Stebut, J., 2006. Nano-mechanical behaviour of the 3rd body generated in dry friction--Feedback effect of the 3rd body and influence of the surrounding environment on the tribology of graphite. *Wear*, 260(6), p.601-614.
- Takaoka, M. & Sawa, K., 2001. An influence of commutation arc in gasoline on brush wear and commutator. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, 24(3), p.349 - 352.
- Takikawa, H., Kusano, O. & Sakakibara, T., 1999. Graphite cathode spot produces carbon nanotubes in arc discharge. *Journal of Physics - part D* : *Applied Physics* 32(18).
- Yamamoto, T., Bekki, K. & Sawa, K., 1996. A study on brush wear under commutation arcs in gasoline. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, 19(3), p.376 - 383.
- Yasar, I., Canakci, A. & Arslan, F., 2007. The effect of brush spring pressure on the wear

behaviour of copper-graphite brushes with electrical current. *Tribology International*, 40(9), p.1381-1386.

Zaidi, H., Robert, F. & Paulmier, D., 1995. Influence of adsorbed gases on the surface energy of graphite: consequences on the friction behaviour. *Thin Solid Films*, 264(1), p.46-51.

Zambelli, G. & Vincent, L., 1998. *Matériaux et contacts, une approche tribologique* Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.,

Conclusion

Ces travaux de doctorat, en collaboration avec la société *AVO CARbon* ainsi que le laboratoire *IS2M*, ont permis d'avancer dans la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lors du frottement électroifié balais-collecteur présent dans la pompe de gavage automobile. A l'aide de techniques de caractérisation de nos matériaux ainsi que du développement et de l'utilisation d'un tribomètre spécifique et complexe, un modèle phénoménologique d'usure a pu être énoncé suite aux diverses expérimentations.

Les analyses structurales des matériaux testés ont mis en évidence une hétérogénéité et une porosité importante pouvant jouer un rôle dans le contact glissant susnommé. Des tests donnant des caractéristiques mécaniques et électriques différentes selon le matériau, ont complété les informations nécessaires pour une compréhension optimale des essais réalisés au cours de ces recherches. Le développement d'un tribomètre instrumenté a permis à l'étude de se rapprocher au plus près du contact réel existant dans la pompe de gavage en termes de vitesses de rotation, d'efforts normaux appliqués au contact et d'environnement de l'interface de frottement.

Les essais et observations réalisés tant lors du frottement du double contact que lors de la création d'arcs électriques en "statique", montrent la réelle difficulté et la complexité du tribosystème étudié. Partant d'une approche généraliste en prenant en compte l'ensemble des paramètres expérimentaux d'entrée régissant le contact balais-collecteur, les premiers essais ont montré une influence notable de la nuance du matériau sur l'usure du contact. La présence de polymère dans les balais et collecteur modifie les phénomènes tribologiques associés au contact en comparaison de ceux entièrement composés de graphite. La vitesse de glissement, l'intensité du courant, la nature du milieu ainsi que l'effort normal jouent eux aussi un rôle plus ou moins primordial pour définir le comportement tribologique du double contact balais-collecteur.

Les études expérimentales menées ont permis de conclure quant à la prépondérance de l'usure d'origine dite "électrique" sur celle dite "mécanique". Cette usure électrique est due à la présence de perturbations électriques au sein de l'interface de contact. Notre démarche expérimentale a donc été divisée en deux parties : une première approche considérant le frottement dans des conditions proches du réel et une seconde approche considérant les perturbations électriques constatées, dans un but ultime de pouvoir corréler ces deux approches pour ainsi comprendre les mécanismes d'usure engendrés par le frottement électroifié balais-collecteur.

Cette seconde approche a donc été étudiée via la création d'arcs électriques en statique sur un dispositif annexe spécifique et instrumenté. Les endommagements créés sont particuliers et plus volumineux lors de l'utilisation de nuances composites graphite-polymère. Ils s'observent sous forme de cratères ou de bosses dont le volume total augmente avec l'énergie développée par l'arc créé. Ce mécanisme d'endommagement que l'on retrouve lors du frottement, modifie l'interface de contact et favorise l'usure des balais et du collecteur. Cependant les diverses expérimentations menées lors de ces travaux de recherche ne permettent pas de statuer sur les causes de la création d'un cratère plutôt que d'une bosse. De plus, les mécanismes d'endommagement observés sont très proches d'un point de vue

phénoménologique à ceux créés par le phénomène de commutation présent lors du fonctionnement de la pompe de gavage.

D'un point de vue technologique, l'importance de la présence de perturbations électriques à l'interface de frottement orientera nécessairement le constructeur à la définition de nouvelles nuances de matériaux de fabrication peu coûteuse et résistantes à l'arc électrique qui est synonyme d'usure prononcée. De plus, l'application d'un effort normal élevé diminuant la présence de ces perturbations lors du frottement électrifié balais-collecteur permettrait de limiter l'usure totale.



Liste des personnes Habilitées à Diriger des Recherches en poste à l'Ecole Centrale de Lyon

Nom-Prénom	Corps grade	Laboratoire ou à défaut département ECL	Etablissement
BEROUAL Abderrahmane	professeur	AMPERE	ECL
BURET François	professeur	AMPERE	ECL
JAFFREZIC-RENAULT Nicole	directeur de recherche	AMPERE	CNRS/ECL
KRÄHENBÜHL Laurent	directeur de recherche	AMPERE	CNRS/ECL
NICOLAS Alain	professeur	AMPERE	ECL
NICOLAS Laurent	directeur de recherche	AMPERE	CNRS/ECL
SCORLETTI Gérard	professeur	AMPERE	ECL
SIMONET Pascal	directeur de recherche	AMPERE	CNRS/ECL
VOLLAIRE Christian	professeur	AMPERE	ECL

Nbre Ampère 9

HELLOUIN Yves	maître de conférences	DER EEA	ECL
---------------	-----------------------	---------	-----

Nbre DER EEA 1

GUIRALDENQ Pierre	professeur émérite	DER STMS	ECL
VINCENT Léo	professeur	DER STMS	ECL

Nbre DER STMS 2

LOHEAC Jean-Pierre	maître de conférences	ICJ	ECL
MAITRE Jean-François	professeur émérite	ICJ	ECL
MARION Martine	professeur	ICJ	ECL
MIRONESCU Elisabeth	professeur	ICJ	ECL
MOUSSAOUI Mohand	professeur	ICJ	ECL
MUSY François	maître de conférences	ICJ	ECL
ZINE Abdel-Malek	maître de conférences	ICJ	ECL

Nbre ICJ 7

DAVID Bertrand	professeur	ICTT	ECL
----------------	------------	------	-----

Nbre ICTT 1

CALLARD Anne-Ségolène	professeur	INL	ECL
CLOAREC Jean-Pierre	maître de conférences	INL	ECL
GAFFIOT Frédéric	professeur	INL	ECL
GAGNAIRE Alain	maître de conférences	INL	ECL
GARRIGUES Michel	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
GENDRY Michel	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
GRENET Geneviève	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
HOLLINGER Guy	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
KRAWCZYK Stanislas	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
LETARTRE Xavier	chargé de recherche	INL	CNRS/ECL
O'CONNOR Ian	professeur	INL	ECL
PHANER-GOUTORBE Magali	professeur	INL	ECL

ROBACH Yves	professeur	INL	ECL
SAINT-GIRONS Guillaume	chargé de recherche	INL	CNRS/ECL
SEASSAL Christian	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
SOUTEYRAND Eliane	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
TARDY Jacques	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
VIKTOROVITCH Pierre	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL

Nbre INL 18

CHEN Liming	professeur	LIRIS	ECL
-------------	------------	-------	-----

Nbre LIRIS 1

BAILLY Christophe	professeur	LMFA	ECL
BERTOGLIO Jean-Pierre	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
BLANC-BENON Philippe	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
BOGEY Christophe	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
CAMBON Claude	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
CARRIERE Philippe	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
CHAMPOUSSIN J-Claude	professeur émérite	LMFA	ECL
COMTE-BELLOT genevièvre	professeur émérite	LMFA	ECL
FERRAND Pascal	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
GALLAND Marie-Annick	professeur	LMFA	ECL
GODEFERD Fabien	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
GOROKHOVSKI Mikhail	professeur	LMFA	ECL
HENRY Daniel	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
JEANDEL Denis	professeur	LMFA	ECL
JUVE Daniel	professeur	LMFA	ECL
LE RIBAUTL Catherine	chargée de recherche	LMFA	CNRS/ECL
LEBOEUF Francis	professeur	LMFA	ECL
PERKINS Richard	professeur	LMFA	ECL
ROGER Michel	professeur	LMFA	ECL
SCOTT Julian	professeur	LMFA	ECL
SHAO Liang	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
SIMOENS Serge	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
TREBINJAC Isabelle	maître de conférences	LMFA	ECL

Nbre LMFA 23

BENAYOUN Stéphane	professeur	LTDS	ECL
CAMBOU Bernard	professeur	LTDS	ECL
COQUILLET Bernard	maître de conférences	LTDS	ECL
DANESCU Alexandre	maître de conférences	LTDS	ECL
FOUVRY Siegfried	chargé de recherche	LTDS	CNRS/ECL
GEORGES Jean-Marie	professeur émérite	LTDS	ECL
GUERRET Chrystelle	chargé de recherche	LTDS	CNRS/ECL
HERTZ Dominique	past	LTDS	ECL
ICHCHOU Mohamed	professeur	LTDS	ECL
JEZEQUEL Louis	professeur	LTDS	ECL
JUVE Denyse	ingénieur de recherche	LTDS	ECL
KAPSA Philippe	directeur de recherche	LTDS	CNRS/ECL
LE BOT Alain	directeur de recherche	LTDS	CNRS/ECL
LOUBET Jean-Luc	directeur de recherche	LTDS	CNRS/ECL
MARTIN Jean-Michel	professeur	LTDS	ECL
MATHIA Thomas	directeur de recherche	LTDS	CNRS/ECL
MAZUYER Denis	professeur	LTDS	ECL
PERRET-LIAUDET Joël	maître de conférences	LTDS	ECL
SALVIA Michelle	maître de conférences	LTDS	ECL

<i>SIDOROFF François</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>SINOUE Jean-Jacques</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>STREMSDOERFER Guy</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>THOUVEREZ Fabrice</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>TREHEUX Daniel</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>VINCENS Eric</i>	<i>maître de conférences</i>	LTDS	ECL

Nbre LTDS 25

<i>Total HdR ECL</i>	91
----------------------	-----------

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 7 août 2006,

Vu la demande du Directeur de Thèse

Monsieur Ph. KAPSA

et les rapports de

Monsieur H. ZAIDI
Professeur - LMS - SP2MI Téléport - 2 bd Pierre et Marie Curie - BP 30179
86932 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL cedex

Et de

Monsieur J-F. ROUCHON
Professeur - NPT - ENSEEIHT - Laboratoire LAPLACE-GREM3 - 2, rue Charles Camichel
31071 TOULOUSE cedex

Monsieur CHARPENAY Romain

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale MATERIAUX

Fait à Ecully, le 17 novembre 2011

P/Le Directeur de l'E.C.L.
La Directrice des Etudes



Résumé

La pompe de gavage ou pompe à carburant est un organe auxiliaire nécessaire au bon fonctionnement d'un véhicule. Elle permet d'acheminer le carburant du réservoir vers les systèmes d'injections du moteur. Cette pompe, constituée d'un moteur électrique entraînant une turbine, permet la mise en mouvement du carburant. Le passage du courant est assuré entre le stator et le rotor par le biais du contact frottant entre deux balais fixes et un collecteur tournant en composite graphite/polymère, immergé en milieu carburant. Ces travaux ont pour but de contribuer à la compréhension de ce contact glissant électrifié immergé. Un tribomètre spécifique a été développé afin de tester différents couples de matériaux balais-collecteur dans des conditions mécaniques, électriques et physico-chimiques variées, tout en mesurant l'usure, l'effort de frottement et la résistance électrique du double contact. De nouvelles nuances de matériaux carbonés s'adaptant aux contraintes chimiques des nouveaux biocarburants présents sur le marché automobile ont été testées et ont mis en évidence différents comportements tribologiques. L'usure observée est principalement due au passage du courant sous forme d'arcs électriques modifiant ainsi la topographie des surfaces. Deux endommagements distincts sont visibles : le cratère et la bosse dont les volumes augmentent avec l'énergie développée par l'arc et sont reliés à la présence subsurfacique de polymère. A partir de ces conclusions expérimentales, un modèle phénoménologique du comportement à l'usure a été proposé. Il permet d'apporter une aide à la compréhension des mécanismes complexes et nombreux, présents dans le frottement des balais et du collecteur.

Mots clefs : Arcs électriques, Contacts électriques, Endommagements, Matériaux carbonés, Tribologie, Usure.

Abstract

The fuel pump, an automotive part, is used to transfer the fuel from the tank to the engine injection systems. This pump consists of an electric motor driving a turbine: this induces the fuel flow. The current flow is realized between the stator and the rotor thanks to the friction of two fixed brushes against a slip ring. All elements are made of graphite/polymer composites and are immersed into fuel. The aim of this work is to contribute to the understanding of immersed electrical sliding contacts. A specific tribometer was developed in order to mimic the fuel pump. It allows simultaneous measurement of friction forces, wear and electrical contact resistance for various mechanical, electrical and physicochemical conditions. New carbonaceous materials, specifically designed for new biofuel, exhibited different tribological behaviour. The wear observed is mainly due to the current flow, electrical arcs in particular, which modifies the surface topography. Two kinds of damage were depicted: craters and bumps whose volume increases with the arc-produced energy as a function of the presence of polymer at the vicinity of the surface. Issued from these experimental results, a phenomenological model of the wear behaviour was proposed. It brings new insights into the complex and numerous mechanisms occurring during the friction of the brushes and commutator.

Keywords : Carbonaceous materials, Damages, Electrical arcs, Electrical contacts, Tribology, Wear.