HAL
open science

Dialogues Numériques Entre Échelles Tribologiques

Mathieu Renouf, Aurélien Saulot, Francesco Massi, Nicolas Fillot

To cite this version:

Mathieu Renouf, Aurélien Saulot, Francesco Massi, Nicolas Fillot. Dialogues Numériques Entre Échelles Tribologiques. 2013. hal-00833180

HAL Id: hal-00833180

https://hal.science/hal-00833180v1

Submitted on 12 Jun 2013

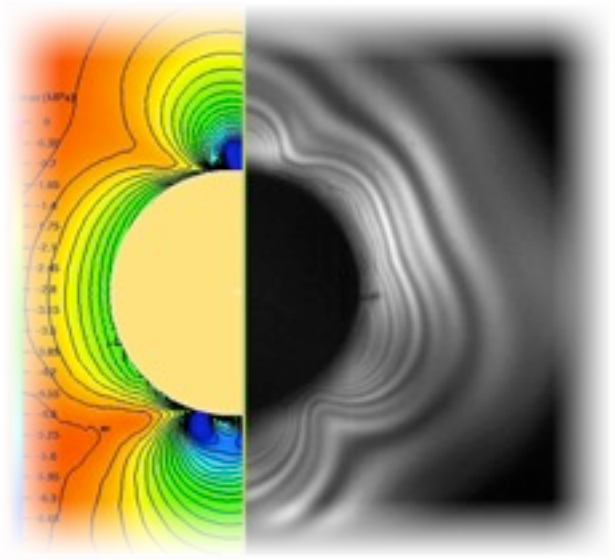
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

PROJET ANR-08-JCJC-0020

DiNEET

Dialogues Numériques Entre Echelles Tribologiques



Rapport Scientifique Final

Coordinateur:

Mathieu Renouf

Rédacteurs:

Mathieu Renouf, Aurélien Saulot, Francesco Massi, Nicolas Fillot

Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (UMR CNRS/INSA 5259)
Institut Européen de Tribologie
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
Bâtiment Jean d'Alembert - 20, avenue Albert Einstein - 69621 Villeurbanne Cedex - France
Téléphone (+33) 04 72 43 89 37 - Fax (+33) 04 78 89 09 80 – e-mail : Mathieu.Renouf@univ-montp2.fr

Sommaire

INTRODUCTION

1.CONTEXTE
2.CONTENU SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU PROJET

PARTIE 1 - GT1 EXPERIENCES MODELES

1.CAHIER DES CHARGES DE L'EXPERIENCE MODELE
- 1.1.Objectifs du dispositif expérimental
- 1.2.Restriction pour chacun des GT actifs
- 1.3.Choix et test des solutions définitives

2.DISPOSITIF EXPERIMENTAL
3.VALIDATION DE L'EXPERIENCE MODELE
- 3.1.Couple, Vitesse et Accélération
- 3.2.Dilatation radiale de l'axe
- 3.3.Reproductibilité des essais
- 3.4.Etude paramétrique
  - 3.4.1.Influence de la dilatation radiale
  - 3.4.2.Influence de la vitesse au contact
  - 3.4.3.Influence de l'inversion du sens de rotation
  - 3.4.4.Influence du « nettoyage » de la couche de troisième corps

4.SYNTHESE TRIBOLOGIQUE
- 4.1.Comportement sans troisième corps « visible »
- 4.2.Comportement avec troisième corps « visible »
- 4.3.Cas particulier : naissance du troisième corps « visible »

5.CONCLUSION

PARTIE 2 - GT2 MODELISATION A L'ECHELLE DES PREMIER CORPS

1.DEFINITION DU MODELE NUMERIQUE DES PREMIER CORPS
- 1.1.Cahier des charges pour la modélisation des premier corps
- 1.2.Géométrie et conditions aux limites

2.ANALYSE TRANSITOIRE
- 2.1.Cadre numérique
- 2.2.Analyse de convergence
- 2.3.Mesure des coefficients d'amortissement
- 2.4.Instabilités de crissement

3.ANALYSE MODALE
- 3.1.Dynamique du système

4.COMPARAISON ET VALIDATIONS DES MODELES
- 4.1.Comparaison des modeles numériques
- 4.2.Validation expérimentale

5.CONCLUSION

Sommaire

PARTIE 3 - GT3 - MODELISATION A L'ECHELLE DES INTERFACES

1.CADRE NUMERIQUE
2.RHEOLOGIE DES TROISIEME CORPS SOLIDES
- 2.1.Modèles numériques
- 2.2.Coefficient de frottement macroscopique
- 2.3.Profils de vitesse
  - 2.3.1.Cohésion faible
  - 2.3.2.Cohésion intermédiaire
  - 2.3.3.Cohésion forte
  - 2.3.4.Synthèse
- 2.4.Profils de contrainte
  - 2.4.1.Profils de contrainte de compression
  - 2.4.2.Profils de contrainte de cisaillement
- 2.5.Conclusion

PARTIE 4 - GT4 - ECHELLE MOLECULAIRE

1.PREPROCESSING
2.DEFINITION DU PROBLEME
3.ESSAIS MECANIQUES NORMAUX
- 3.1.Définition du modèle
- 3.2.Résultats pour différents températures
- 3.3.Aspects énergétiques
- 3.4.Comportement des massifs
- 3.5.Paramètres d'espace et de temps
- 3.6.Bilan

4.COMPORTEMENT SOUS SOLLICITATIONS TANGENTIELLES
- 4.1.Mise en place du modèle numérique
- 4.2.Définition des surfaces
- 4.3.Mesures numériques
- 4.4.Résultats
  - 4.4.1.Effet de l'aire de contact réelle
  - 4.4.2.Effet du chargement normal
  - 4.4.3.Effet de la température
  - 4.4.4.Effet de la vitesse tangentielle imposée
- 4.5.Bilan

Sommaire

PARTIE 5 - GT5 - CHANGEMENT D'ECHELLE

1.METHODOLOGIE
2.DIALOGUE NUMERIQUE
- 2.1.Introduction
- 2.2.Principe
- 2.3.Choix des modèles
  - 2.3.1.Généralités
  - 2.3.2.Echelle globale
  - 2.3.3.Echelle locale
- 2.1.Résultats
  - 2.1.1.Frottement limite
  - 2.1.2.Modèle discret, usure et frottement
- 2.2.Conclusion

3.COUPLAGE DISCRET/CONTINU
- 3.1.Introduction
- 3.2.Cadre numérique
  - 3.2.1.Formulation globale
  - 3.2.2.Formulation locale
- 3.3.Modèle numérique
- 3.4.Résultats
  - 3.4.1.Macro-particule et régime d'instabilités
  - 3.4.2.Influence de la taille des macro-particules
  - 3.4.3.Compétition entre deux macro-particules / confrontation expérimentale
- 3.5.Conclusion

PARTIE 6 - BILAN

1.CONCLUSIONS

ANNEXE 1

Introduction

Contenu du projet

1. CONTEXTE

La compréhension et la résolution d'un problème de frottement et d'usure impliquant deux corps en contact font intervenir différentes échelles spatiales et temporelles. En effet, selon la vision que l'on porte au problème, différentes échelles spatiales peuvent être considérées:

- l'échelle du mécanisme, qualifiant l'échelle du système imposant les conditions de contact entre les deux corps,
- l'échelle des corps en contact,
- l'échelle de l'interface de contact,
- l'échelle des particules et/ou complexes de surfaces vivant au sein de l'interface,
- l'échelle moléculaire permettant de représenter la matière.

Libre alors au modélisateur (de vocation expérimentale, théorique ou numérique) de choisir les échelles auxquelles il souhaite se placer pour faire face au problème considéré. Le plus souvent une seule échelle spatiale est retenue car les analyses faites aux différentes échelles engendrent souvent de nouveaux problèmes (problème de mesure, de validité des modèles) qui rendent encore plus difficile le problème initial à résoudre. Pour ce qui est des échelles temporelles, elles portent essentiellement sur la compétition entre les cinétiques des actions mécaniques qui produisent localement des surfaces réactives au sens physicochimique et donc susceptible de réagir avec le milieu ambiant (oxydation, contamination…).

Si la tribologie regorge de travaux focalisés sur les différentes échelles, on en retrouve très peu basés sur des démarches multi-échelles « complètes » capables d'intégrer toutes les échelles d'un problème de frottement. On entend par « complète » une démarche intégrant les différentes échelles évoquées précédemment.

D'un point de vue expérimental, il est possible dans certains cas, d'effectuer cette démarche et de dialoguer ainsi entre les différentes échelles. Pour ces cas, les critères permettant de faire les changements d'échelles sont, pour la grande majorité, seulement qualitatifs et non pas quantitatifs, et donc, dépendant de l'expérience, de l'expérimentateur et de ses moyens d'investigations.

D'un point de vue numérique, les approches multi-échelles « complètes » s'appliquent d'avantage au calcul de structure réduit à un simple corps (sous-entendu sans contact donc sans tribologie), ce qui représente déjà un problème complexe. Lorsqu'un problème de contact est considéré, il est donc fréquent de trouver des modèles qui traitent des interactions binaires entre échelles mais peu ou pas, à notre connaissance, qui considèrent un modèle ou une démarche « complète ».

Or, pour répondre au besoin des approches expérimentales, il est nécessaire de pouvoir établir une démarche numérique parallèle cohérente, pour aider à la compréhension finale du problème de frottement ainsi qu'à la détermination des différents critères de

contrôle des changements d'échelles utilisés expérimentalement. Par conséquent ce projet créera la démarche numérique de dialogue entre échelles afin de compléter les investigations expérimentales. Ceci permettra ensuite de créer un outil numérique de modélisation prédictif du frottement et de l'usure.

2. PROGRAMME SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Le programme de travail du projet s'est articulé autour de 5 groupes de travail (GT) dont les différents actions seront résumées dans des parties dédiées. Ainsi la partie 1 est dédiée au GT0 et donc, à la gestion de projet, la mise en place du cahier des charges. La partie 2 dédiée au GT1, présente la mise en place des expériences modèles (conception, tests et analyses) afin de pouvoir comparer le plus sereinement possible résultats numériques et expérimentaux. Les parties 3, 4 et 5 sont respectivement dédiées aux GT2, 3 et 4 et traitent des modélisations éléments finis faites à l'échelle des premiers corps ainsi qu'à la confrontation avec les expériences (échelle B) pour la partie 3, des modélisations des interfaces en utilisant une approche discrète (échelle C) pour la partie 4 et des modélisation par dynamique moléculaire (échelle D) pour la partie 5. Enfin, la partie 6 dédié au GT5, traite la partie changement d'échelle que cela soit entre les échelles Macro et Méso (dialogue B-C) qu'entre les échelles Méso et Micro (dialogue C-D).

Les objectifs et les différentes tâches internes aux différents groupes de travail sont rappelés en introduction de chaque partie. Les détails et points techniques ainsi que les difficultés éventuelles sont également exposées le cas échéant. Le groupe de travail dédié à la gestion du projet n'aura pas de partie dédiée. Les documents intermédiaires ainsi que le présent document font partie des livrables associés à ce groupe de travail.

PARTIE 1

GT1 - Expériences modèles

INTRODUCTION

L'objectif de ce groupe de travail est de mettre en place un dispositif expérimental dont l'objectif est de valider les modélisations effectuées aux échelles B (corps en contact), C (interface) et partiellement D (moléculaire).

Rappel des différentes tâches
Tache 1.1 : Développement. Conception du dispositif expérimental: plans, choix des capteurs, choix des matériaux modèles étudiés, pré-étude de dimensionnement. La phase de développement étant une phase « à risque », des allers-retours entre l'équipe de conception et l'équipe technique seront réalisés afin d'avoir un cahier des charges idéal pour la phase de réalisation. **Tache 1.2 :Réalisation**. Réalisation du dispositif expérimental en accord avec le cahier des charges D1.1. Notons qu'un retard peut-être possible si un verrou technique n'a pas été soulevé lors de la phase de développement. **Tache 1.3 : Validations**. Une fois la machine réalisée, une campagne d'essais, dite de validation, permettra de vérifier l'adéquation entre le comportement prévu de la machine et son comportement réel : cetteétape assurera la qualité des essais effectués par la suite. **Tache 1.4 : Essais et Analyses**. Fort de ces validations, une campagne d'essais sera menée. Différents paramètres seront étudiés, la pression hydrostatique P_h, le couple moteur, l'épaisseur du troisième corps modèle,… Grâce au couplage entre analyse modale par accélérométrie, analyse des contraintes par photoélasticimétrie dynamique, analyse chimique par spectrométrie de masse et visualisation des écoulements dans le contact par acquisition vidéo haute définition, le lien entre les différentes échelles du dispositif expérimental et celles des différents modèles numériques pourra naturellement être fait.

1. CAHIER DES CHARGES DE L'EXPERIENCE MODELE

1.1 Objectifs du dispositif expérimental

Un dispositif expérimental avec contact frottant est le lieu d'un couplage naturel entre échelles tribologiques. Chaque expérience numérique à chacune de ces échelles peut donc trouver naturellement des points de comparaison avec un tel dispositif expérimental. Pour mettre en oeuvre ce dispositif expérimental, il est nécessaire de tenir compte des besoins et restrictions tant numériques qu'expérimentales de chacune des échel-

les tribologiques étudiées. Les éléments suivant constituent ici le cahier des charges du dispositif expérimental nécessaire à sa conception et à son usage.

1.2 Restriction pour chacun des GT actifs

Au travers de deux réunions communes avec le GT2 (avril 2009) et les GT3&4 (mai 2009), des restrictions du dispositif expérimental ont été mises en évidence et sont présentées ci-après. De plus, les contraintes expérimentales d'usage nécessaires à l'implantation de ce dispositif expérimental au sein du laboratoire sont aussi rappelées.

1.2.1 Contraintes expérimentales d'usage (non rattachées aux GT2 à GT4)

1.2.1.1 Espace

- Surface d'implantation d'environ 3m x 3m.
- Support fixe pour le dispositif expérimental.
- Support mobile pour les matériels d'acquisition.
- Stockage basse hygrométrie des éprouvettes neuves et usées.
- Stockage des accessoires relatifs au dispositif expérimental.
- Occultation réversible des flux lumineux environnants.

1.2.1.2 Energie

- Alimentation électrique classique sur la base d'un courant alternatif de 220V/50Hz monophasée avec une puissance disponible d'environ 6kW.
- Alimentation électrique filtrée sur la base d'un courant alternatif 220V/50Hz monophasé avec une puissance disponible d'environ 1kW, ceci pour protéger et stabiliser l'alimentation des capteurs ainsi que de leur chaîne d'acquisition.

1.2.1.3 Atmosphère

- Hygrométrie et température mesurée, voire contrôlée selon faisabilité et coût· Possibilité d'apport de gaz en bouteille tel que de l'azote ou de l'oxygène.

1.2.1.4 Sécurité des personnes

- Caractérisation du dispositif : protection contre les projections de fluide hydraulique, isolation des connecteurs électriques et protection des éléments mécaniques en mouvement,…
- Contrôle de la qualité de l'air : saturation en gaz externe (taux d'azote,…).
- Protection anti-bruit : les instabilités de contact ont souvent pour conséquence l'émission de bruit supérieur à 90dB.

1.2.1.5 Coût

- Respect du budget défini initialement : réalisation des pièces « simple » à l'INSA et sous-traitance des usinages « spéciaux » tels que la rectification ou le polissage à l'extérieur.

1.2.2 Contraintes liées à la modélisation à l'échelle des premiers corps (GT2)

1.2.2.1 Besoins

- Vitesse instantanée périphérique de l'axe (m/s)

- Dilatation radiale initiale de l'axe (µm)
- Propriétés géométriques (i.e. dimensions (m) et fixations) et mécaniques (i.e. module d'élasticité (MPa), coef. de Poisson, densité (kg/m^3), coefficient d'amortissement de Rayleigh) du disque, de l'axe et du dépôt initial sur les interfaces de contact
- Différence de contraintes principales : globales sur l'ensemble du disque et locales au plus proche du contact (MPa)
- Accélérations du disque (m/s)

1.2.2.2 Restrictions

- Dispositif expérimental permettant de reproduire et visualiser des instabilités dynamiques de contact de type crissement à des fréquences de quelques kHz

1.2.3 Contraintes liées à la modélisation à l'échelle des interfaces (GT3)

1.2.3.1 Besoins

- Vitesse instantanée périphérique de l'axe (m/s)
- Dilatation radiale initiale de l'axe (µm)
- Propriétés mécaniques du disque, de l'axe et du dépôt initial sur les interface de contact : module d'élasticité (MPa), coefficient de Poisson, densité (kg/m^3), coefficient d'amortissement de Rayleigh
- Morphologie du dépôt, i.e. dimension des agglomérats formés (nm)
- «Visualisation» des écoulements de troisième corps dans le contact

1.2.3.2 Restrictions

- «Contrôler» le débit d'éjection du troisième corps du contact

1.2.4 Contraintes liées à la modélisation à l'échelle moléculaire (GT4)

1.2.4.1 Besoins

- Nature du matériau utilisé pour le dépôt
- Morphologie du dépôt, i.e. dimension des agglomérats formés (nm)
- Contrôle du type de troisième corps produit au cours du l'essai

1.2.4.2 Restrictions

- Le matériau aux interfaces doit être modélisable en Dynamique Moléculaire dans des box d'environ 10-20nm. Le substrat polymère, nécessaire à la visualisation des contraintes par transmission, ne doit donc pas être impliqué dans les interactions locales du contact : la couche de matériau déposé doit donc garder son intégrité le plus longtemps possible au cours de l'essai.

1.3 Choix et test des solutions définitives

Au vu des premiers résultats obtenus par modélisation élément fini dynamique en 2D et des restrictions décrites précédemment, un cahier des charges initial a été réalisé et constitue le Livrable D1.1 – version 1 du 25 juin 2009. Une première version du disposi-

tif expérimental a ainsi été livré en septembre 2009 et constitue le Livrable D1.2 du projet sous sa forme initiale.

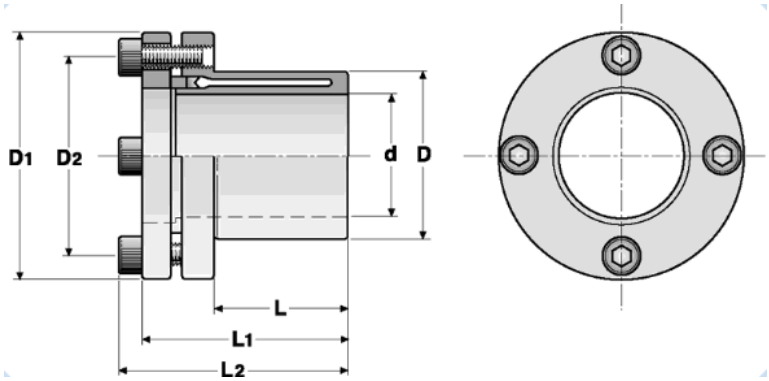
Bien que très positives (reproduction d'instabilités dynamiques de contact, production de troisième corps et observations du lien entre les deux), certaines tendances observées sur les résultats des premiers essais réalisés avec ce dispositif initial n'ont pas donné entière satisfaction. Ces essais ont été réalisés entre le dernier trimestre 2009 (T0+9mois) et le premier trimestre 2010 (T0+15mois). Après une phase d'identification sur l'origine des problèmes rencontrés qui seront détaillés ci-après, une phase de re-conception de certains éléments du dispositif a été nécessaire (de T0+15mois à T0+18mois). Les modifications du dispositif ont été réalisées. Ci-après sont rappelés les éléments constituant le cahier des charges initial, extraits du livrable D1.1 – version 1, les problèmes identifiés et solutions finales proposées.

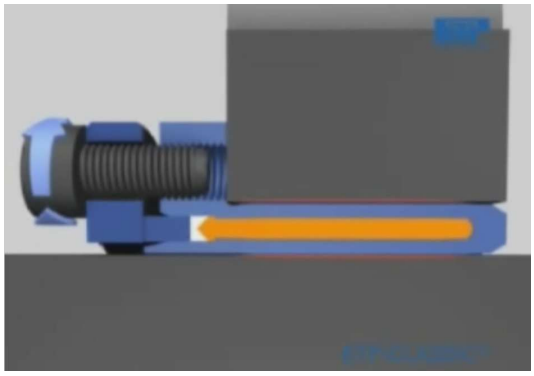
1.3.1 Matériau et structure des 1er corps

1.3.1.1 1er corps rigide : axe/manchon

1.3.1.1.1 Solution initiale (CdC D1.1 – version 1)

Un manchon hydraulique en acier sera utilisé pour assurer le frettage. Celui-ci permet, d'une part, de créer une dilatation axisymétrique de l'axe et, d'autre part, de conserver l'hypothèse de surface rigide utilisée pour l'axe dans le modèle élément fini du GT2.





(a)

(b)

Fig. 1.1 : (a) Manchon SKF ETP-30 & (b) Capteur Vibrometer TQ 401

A la vue des premiers calculs, la dilatation au diamètre de l'axe nécessaire à la naissance des instabilités dynamiques de contact est d'environ 20-30µm. Pour assurer cette dilatation axisymétrique de l'axe, le choix technologique s'est alors porté sur le « manchon » hydraulique SKF ETP-30 (cf. Fig. 1.1a) qui peut assurer une dilatation au diamètre jusqu'à 150µm pour un manchon de diamètre extérieur 41mm. Ce manchon doit subir quelques modifications (i.e. suppression de l'épaulement) avant d'être utilisé sur le dispositif expérimental afin de permettre la visualisation du contact.

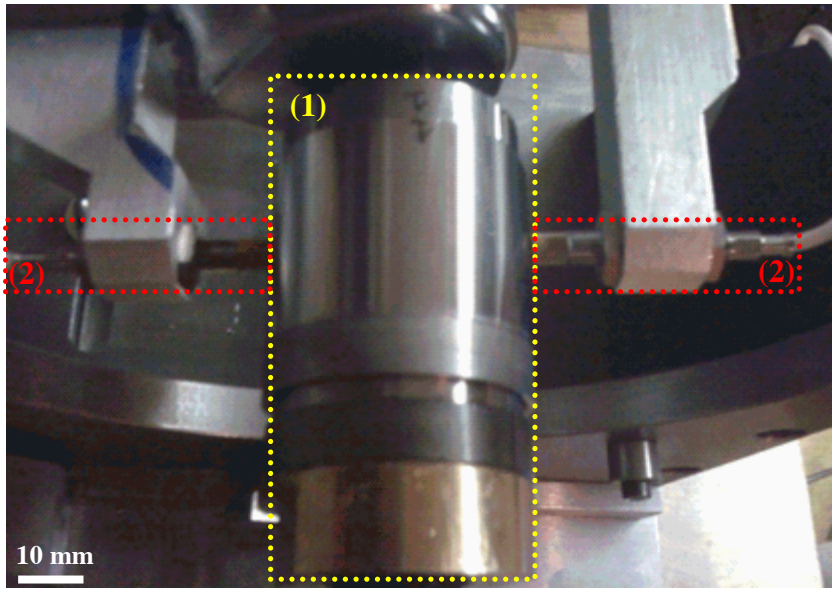


Fig. 1.2 : Manchon « modifié » SKF ETP-30 (1) & Capteur Vibrometer TQ 401 (2) montés sur le dispositif expérimental

Afin de contrôler la dilatation du manchon (et donc de l'axe tournant), deux capteurs sont positionnés de part et d'autre de la surface de contact, celle qui se dilatera. Afin de préserver l'état tribologique de la surface de contact et compte tenu du ferromagnétisme de la surface dilatée, les capteurs choisis sont sans contact à courant de Foucault (cf. Fig. 1.2). Le choix final c'est porté sur le Vibrometer TQ-401 dont la gamme de mesure s'étend de 0 à 2mm avec une résolution de 8mV/µm. Le dispositif initial réalisé est présenté sur la figure 2.2.

1.3.1.1.2 Problème identifié

Le dispositif initialement proposé pour réaliser la mise en charge axisymétrique de l'alésage du disque répondait quasiment parfaitement aux besoins du projet. Cependant, au vu de la structure même du manchon SKF ETP-30, l'expansion radiale, bien que relativement axisymétrique, présentait une conicité axiale qui ne permettait pas de mettre en charge de façon homogène le contact.

1.3.1.1.3 Solution finale mise en oeuvre

Afin de palier de palier ce problème, un dispositif original de mise en charge (appelé « nouveau manchon ») a été développé dans le cadre de ce projet. La figure 1.3 présente : (a) le manchon SKF ETP-30 modifié en vue d'ensemble monté sur son axe, (b) le nou-

veau manchon en vu d'ensemble monté sur son axe ainsi qu'en coupe (cf. Fig. 1.4a). L'intégration sur le dispositif réel est présenté sur la figure 1.4b.

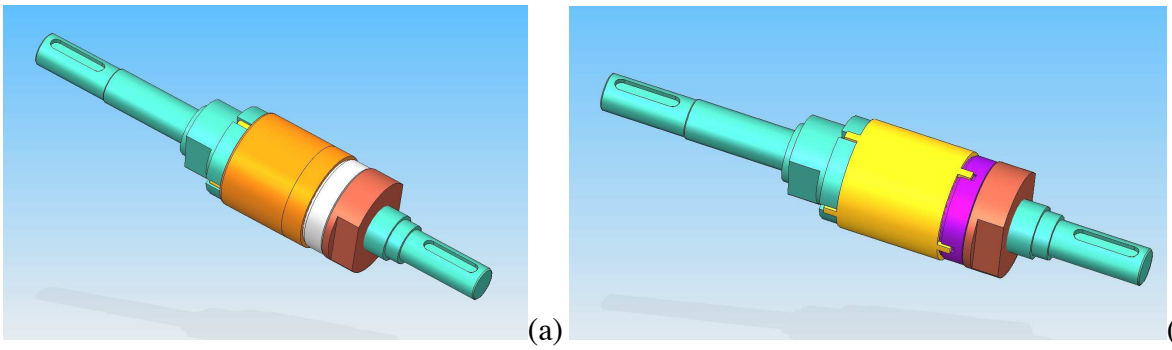


Fig. 1.3 : (a) Manchon SKF ETP-30 et (b) Nouveau manchon

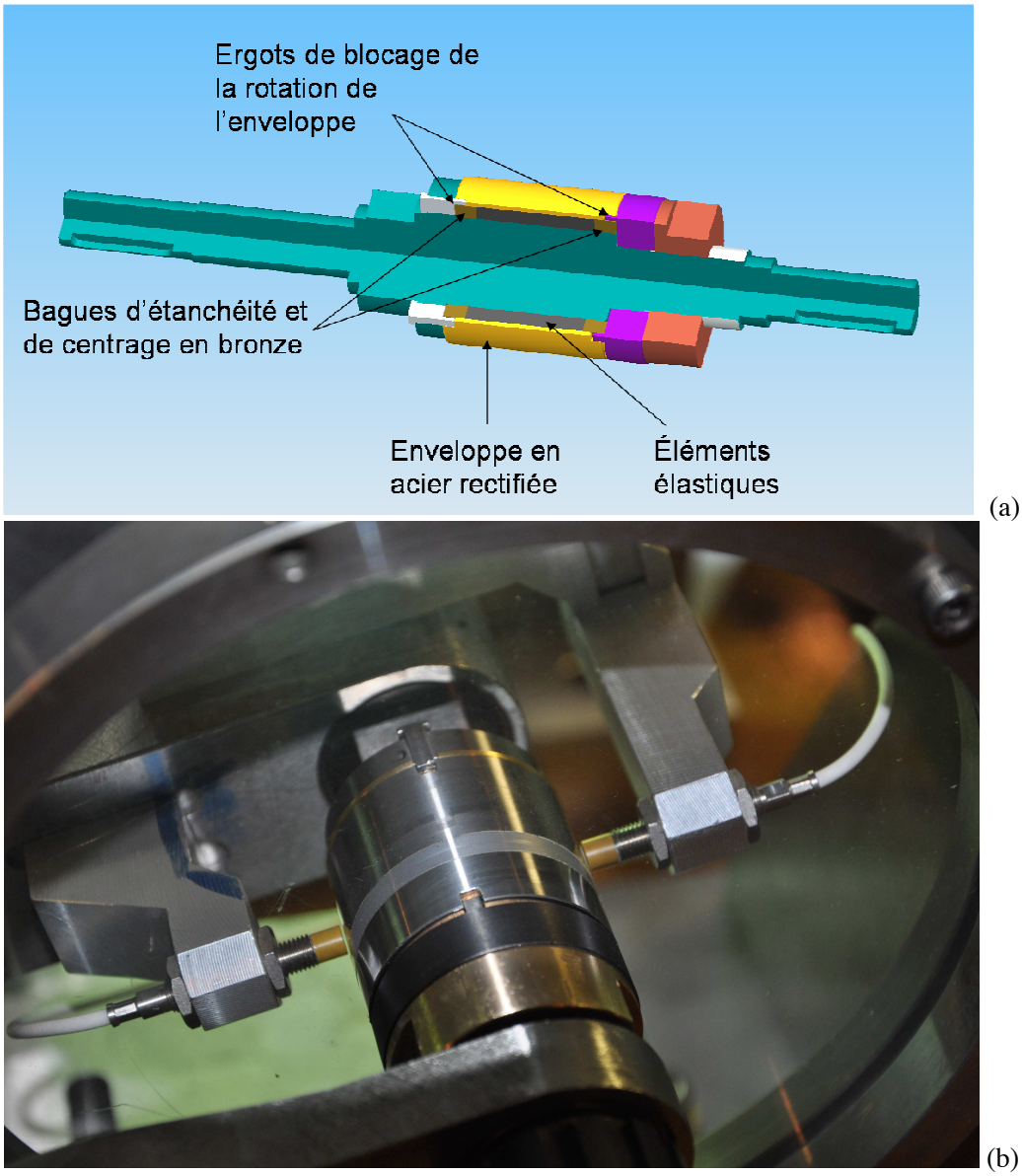


Fig. 1.4 : (a) Vue en coupe du nouveau manchon monté sur l'axe principal de rotation et (b) de son intégration réelle sur le dispositif expérimental

Les premiers essais de validation montrent que le nouveau manchon se dilate sans conicité axiale et radiale dans la gamme souhaité, c'est-à-dire jusqu'à 50µm. Le défaut de circularité de ce nouveau manchon est actuellement en cours d'évaluation mais devrait ne pas dépasser 10 à 15% de la dilatation appliquée ce qui, pour un système mécanique de cette taille, est remarquable.

1.3.1.2 1er corps déformable : disque en polymère

1.3.1.2.1 Solution initiale (CdC D1.1 – version 1)

Afin de mettre en évidence l'évolution dynamique des contraintes dans le 1er corps déformable (disque), ce dernier va être réalisé dans un matériau biréfringent. La propriété d'un tel matériau est de perturber une lumière polarisée qui le traverse proportionnellement à son état de contrainte local : c'est la photoélasticimétrie.

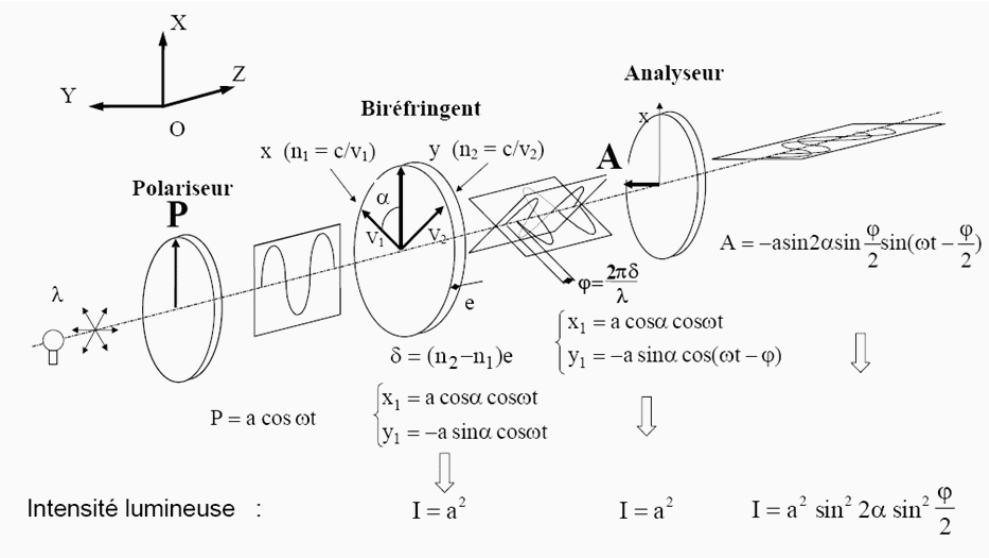


Fig. 1.5 : principe de la photoélasticimétrie pour l'analyse des contraintes

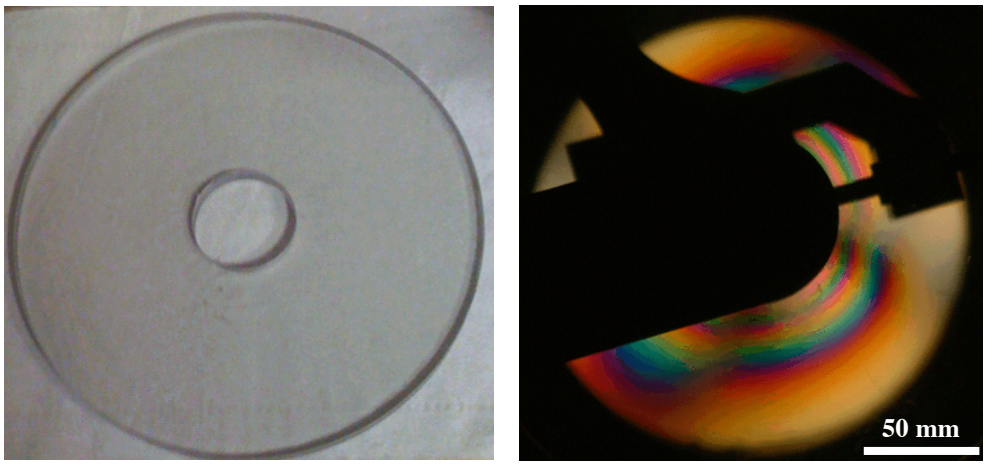


Fig.2. 6 : disque en polycarbonate sans dépôt (à gauche) et Essai de mise en charge statique du disque avec visualisation des contraintes par photoélasticimétrie (à droite)

Les isochromes (échelles de teintes de Newton) ainsi créées sont l'expression directe de la différence de contrainte principales locales dans le solide. Deux matériaux biréfringents sont actuellement en cours de test : le polycarbonate et l'époxy. Le choix définitif sera fait ultérieurement en fonction de la qualification du procédé de dépôt qui sera décrit ultérieurement.

Dors et déjà, les essais fait en collaborations avec le GT2 ont permis de dimensionner le disque : le diamètre interne (zone de contact) est de 41mm, le diamètre externe (zone d'appui) est de 185mm et l'épaisseur est de 10mm.

1.3.1.2.2 Problème identifié

Afin de palier aux problèmes d'usinage, le matériau initialement testé (sans dépôt, cf. section 1.3.1.3) était de l'époxy dont le protocole de moulage a été développé au laboratoire. Les premiers essais n'ont pas permis de reproduire des instabilités dynamiques de contact de type crissement tel que requis par le GT2. Ce matériau a donc été définitivement abandonné.

1.3.1.2.3 Solution finale mise en œuvre

Matériau du disque : polycarbonate

Les disques finalement utilisés sont usinés dans des plaques de polycarbonate qui, au vu des premiers essais, permettent de reproduire des instabilités dynamiques de contact de type crissement en adéquation avec les besoins du GT2 ainsi que des particules de troisièmes corps en adéquation avec les besoins du GT3 (cf. Fig 1.7).

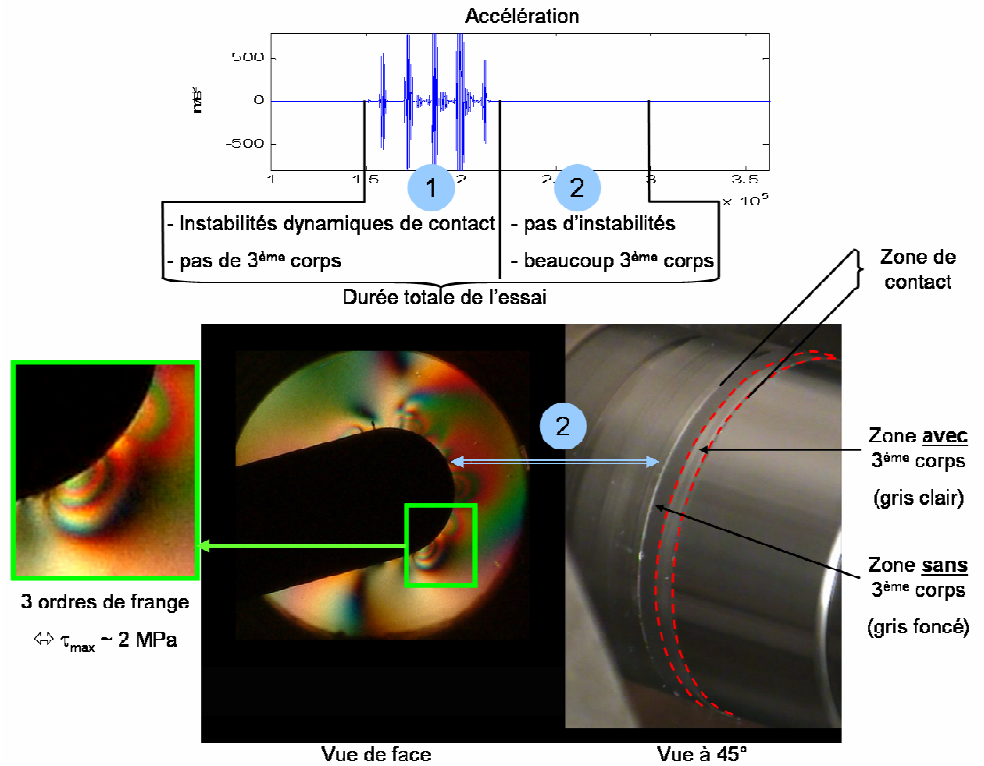


Fig. 1 7 : Résultat de premiers essais réalisés avec le polycarbonate : lien entre GT2 (instabilités dynamiques de contact) et GT3 (évolution du troisième corps dans le contact)

Afin de palier la dispersion des propriétés optiques du polycarbonate « courant » (non spécifié optique mais d'un coût peu élevé) constatée lors des premiers essais, le choix du matériau définitif s'est porté sur le PSM-1 de Vishay. Ce dernier est qualifié pour les applications optiques telles que la photoélasticimétrie. Le coût d'un disque (dimensions finales: 180mm x 41mm x 9,6mm), utilisable pour un seul essai, est d'environ 180€ T.T.C., hors usinage.

Les propriétés sont les suivantes : module de Young de 2500MPa, densité de 1202kg/m^3, coefficient de Poisson de 0,38. La constante de Brewster C, permettant le calcul des contraintes dans le disque, est de 2.76 Bar/Frange/Pouce.

Fixation du disque : couronne

En accord avec le GT2, le dispositif de fixation du disque en polycarbonate a été redéfini afin de faciliter la modélisation de cette condition limite dans le modèle du GT2. La raideur de la couronne permettant la fixation a été grandement accrue tant par la modification du matériau la constituant que par sa géométrie. De plus, le nombre de points d'ancrage de la couronne sur le bâti a été doublé et leur répartition régularisée. Ceci permettra de modéliser cette fixation sous la forme d'un encastrement régulier du disque sur le bâti mais aussi de ne pas perturber l'axisymétrique du système ce qui facilitera la propagation, dans le disque, des ondes issues des instabilités dynamiques de contact.

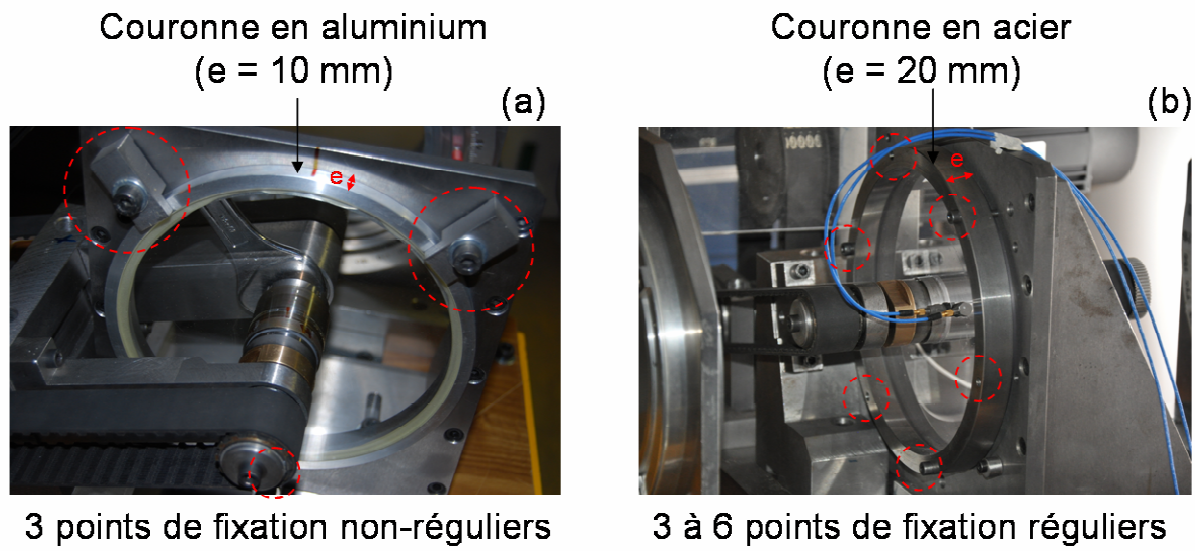


Fig. 1.8 : (a) solution initiale et (b) solution finale de fixation de la couronne

1.3.1.3 troisième corps - dépôt initial sur les interfaces des 1er corps

1.3.1.3.1 Solution initiale (CdC D1.1 – version 1)

Afin de répondre aux besoins de la modélisation à l'échelle D (GT4), un dépôt de matériau modèle doit être déposé sur les interfaces de contact de chacun des corps, i.e. axe/manchon et disque. Le matériau choisi est du cuivre pour plusieurs raisons. La première, sa structure est simple et facilement modélisable en dynamique moléculaire. La seconde, le contact cuivre-cuivre permet d'atteindre des coefficients de frottements élevés (> 0.3), nécessaires pour former des instabilités dynamique de contact (cf. simulations du GT2). La troisième, le dépôt de cuivre est réalisable et abordable pour des épaisseurs importantes, c'est- à-dire quelques µm. Pour permettre la modélisation à l'échelle

C du GT3, l'épaisseur du dépôt de cuivre doit être au moins égale à 5µm sur chacune des surfaces de contact.

Le dépôt du cuivre sur l'axe/manchon et sur le disque peut être réalisé par PVD (Physic Vapor Deposition – cf. Fig. 1.9), c'est-à-dire par projection d'ion cuivre à grande vitesse sur les surfaces de contact. Ce procédé va être testé dans un premier temps sur des petites éprouvettes simples afin de caractériser, d'une part, la morphologie du dépôt nécessaire pour les échelles C et D et, d'autre part, sa tenue mécanique en frottement (essais sur tribomètre PeDeBa).

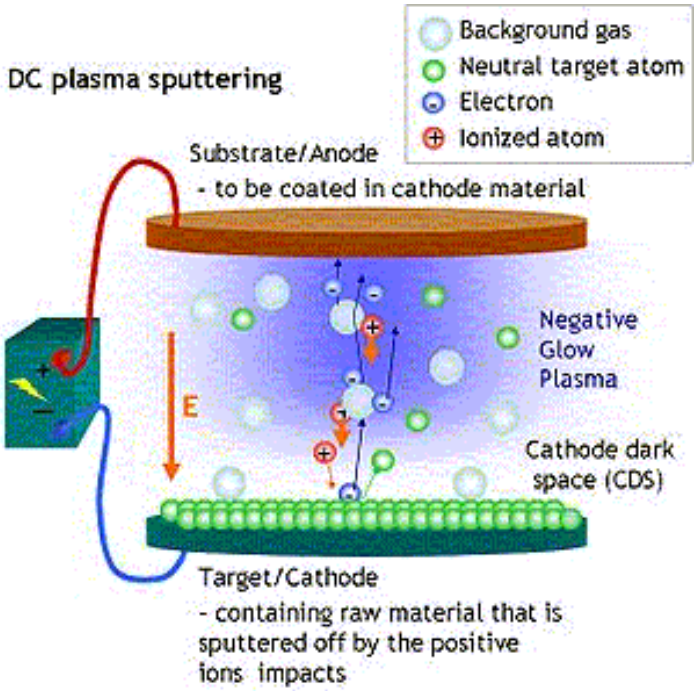


Fig.2 9 : Principe du dépôt PVD, l'anode sera ici le manchon en acier ou le disque en polycarbonate ou époxy, et cathode sera en cuivre.

1.3.1.3.2 Problème identifié

Les interactions avec HEF concernant la possibilité technique de dépôt d'une couche mince de Cuivre (ou autre matériau modélisable par le GT4) d'une épaisseur de 1 à 5µm sur l'alésage de 41mm du disque de polycarbonate par technique de type PVD (ou autre technique pour laquelle le dépôt adhère fortement au substrat) ont conclu à l'impossibilité de garantir la tenue mécanique de ce dépôt. La proposition de « tentative » de mise au point du dépôt par HEF était d'un coût difficilement acceptable : environ 8k€ H.T. pour 4 pré-tests sur éprouvette plane sans aucune garantie de résultat. En effet, le polycarbonate ainsi que les autres polymères biréfringents connus ne sont pas des substrats adéquats pour assurer une tenue mécanique raisonnable des dépôts tels que ceux envisagés pour répondre aux besoins du GT4.

1.3.1.3.3 Solution finale mise en œuvre

En accord avec les différents GT lors de la réunion à mi-parcours du 10 juin 2010, il a été décidé de repousser à une date ultérieure, non définissable actuellement, la mise en oeuvre des essais sur le dispositif expérimental modèle avec dépôt de matériau modélisable par le GT4.

In fine, le disque en polycarbonate frottera directement sur le manchon en acier. Les résultats obtenus par le GT1 seront directement comparable aux modélisations des GT2 (modèle éléments finis) et GT3 (modèle éléments discrets) mais pas au GT4 (dynamique moléculaire) qui reste dans l'impossibilité technique de modéliser des molécules macroscopiques de polymère telles que celles constituant le polycarbonate (cf. Fig. 1.10).

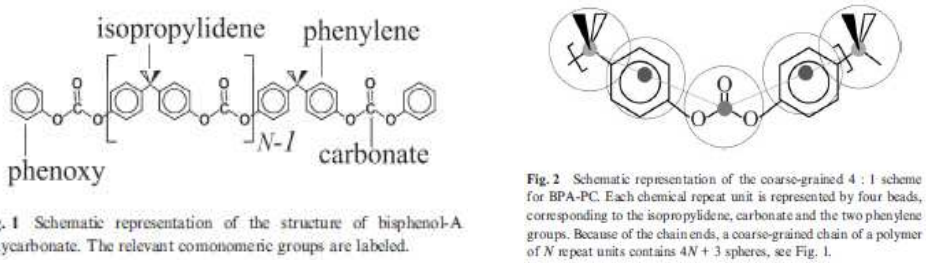


Fig. 1 Schematic representation of the structure of bisphenol-A polycarbonate. The relevant comonomeric groups are labeled.

Fig. 2 Schematic representation of the coarse-grained 4 : 1 scheme for BPA-PC. Each chemical repeat unit is represented by four beads, corresponding to the isopropylidene, carbonate and the two phenylene groups. Because of the chain ends, a coarse-grained chain of a polymer of N repeat units contains $4N + 3$ spheres, see Fig. 1.

Fig. 1.10 : Représentation des chaînes de base du polycarbonate, réelle (Fig. 1) et homogénéisée par une méthode coarse grain (Fig. 2).

1.3.2 Instrumentation et visualisation

1.3.2.1 Mesure de vitesse

1.3.2.1.1 Solution initiale (CdC D1.1 – version 1)

Afin d'assurer la mise en rotation de l'axe/manchon, un moteur BRUSHLESS à codeur optique intégré va être utilisé. La mesure de vitesse de rotation de l'axe correspond théoriquement à celle mesurée au niveau du codeur optique du moteur. Cependant, cette mesure reste loin de l'axe et est donc tributaire de la réaction de la chaîne cinématique au cours de l'essai. Un deuxième dispositif de mesure de vitesse va donc être mis en place. Une roue incrémentale au 1/60ème de tour va être montée sur l'axe et un détecteur à courant de Foucault sera mis en vis-à-vis afin de mesurer la vitesse de passage des crans et donc la vitesse quasi-instantanée de l'axe/manchon (cf. Fig.1.11).

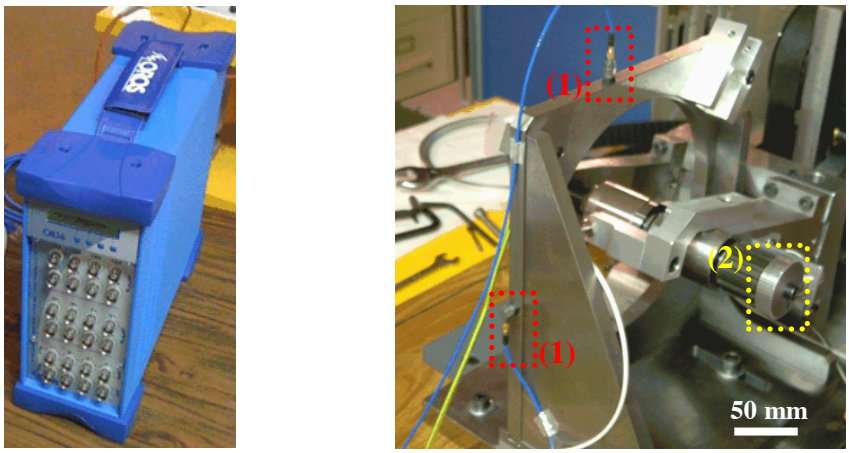


Fig. 1.11 : dispositif d'acquisition et de traitement des signaux OROS-36 (gauche) et mesure d'accélération PCB C15/C16 (1) et de vitesse (2) (droite) montés sur le dispositif expérimental

En accord avec les premiers résultats de simulation du GT2, la gamme de vitesse de rotation est réduite de 0.1m/s jusqu'à 2m/s et le couple moteur inférieur à 10Nm. Le choix du moteur et de sa chaîne de régulation est en cours.

1.3.2.1.2 Problème identifié

Aucun problème majeur n'a été identifié lors des tests réalisés sur la mesure de vitesse. Cependant, l'évolution du couple moteur, dont la limite choisie est de 24Nm (facteur de sécurité de 2,4), a montré un accroissement atteignant les limites de la chaîne de transmission initiale. Ceci est particulièrement vrai lorsque des instabilités dynamiques naissent dans le contact. La différence de couple observée entre modèle et réalité est principalement due à des effets d'adhésion du polymère sur l'acier qui ne sont pas pris en compte dans les simulations éléments finis du GT2.

1.3.2.1.3 Solution finale mise en œuvre

La solution finalement retenue pour la mesure de vitesse est celle proposée dans le CdC D1.1 – version 1. Afin de palier aux limites du couple moteur observées sur le dispositif initial, un modification des rapports de transmission entre le moteur et l'axe intégrant le manchon a été mise en œuvre. Le nouveau couple théoriquement transmissible au contact a été multiplié par un facteur de 2,3 soit près de 50Nm.

1.3.2.2 Mesure d'accélération

1.3.2.2.1 Cahier des charges : Livrable D1.1 – version 1

Les instabilités dynamiques de contact peuvent être appréhendée par des mesures d'accélération au niveau des 1er corps. Au vu des premières simulations du GT2, les fréquences de crissement mises en jeu sont inférieures à 15kHz. Pour retrouver les modes du disque excités au cours de l'essai, des mesures d'accélérations au moins deux points de la structure sont nécessaires.

Les capteurs utilisés ici seront des accéléromètres piézoélectriques mono-axiaux de la marque PCB type C15/16. Leur sensibilité est de 10mV/g et leur gamme de fréquence de 1.5Hz à 18kHz. Ces accéléromètres ICP seront connectés au dispositif général d'acquisition et d'analyse des signaux OROS-36, acquisition 16 voies, 24bits et 40kHz.

1.3.2.2.2 Problème identifié

Aucun problème n'a été identifié lors des tests réalisés sur les mesures d'accélérations. Les premières mesures ont dors et déjà servi de base au GT2 pour évaluer la capacité du modèle éléments finis à reproduire des instabilités dynamiques de contact similaires à celles observables sur le dispositif expérimental du GT1. Les résultats de cette première interaction numérique – expérimentale sont décrits dans le «Rapport de validation du modèle de premiers corps – GT2 » livré en juillet 2010.

1.3.2.2.3 Solution finale mise en œuvre

La solution finalement retenue est celle proposée dans le CdC D1.1 – version 1.

1.3.2.3 Visualisation

1.3.2.3.1 Cahier des charges : Livrable D1.1 – version 1

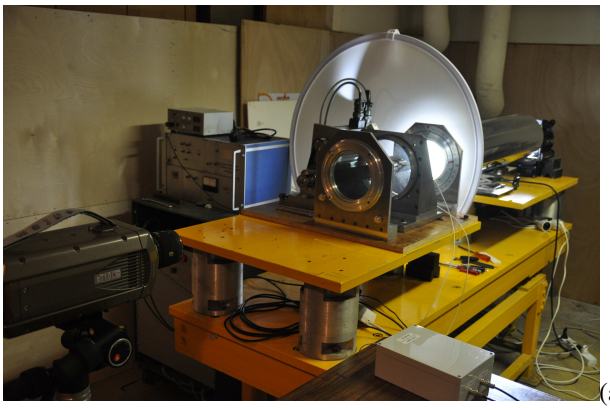
Les fréquences des instabilités mises en évidence par les premiers calculs du GT2 nécessitent la mise en œuvre d'une visualisation haute vitesse de l'évolution des contraintes dans le contact. En respectant les principes de base de l'échantillonnage, connaissant la fréquence maximum des instabilités inférieures à 15kHz, la vitesse de visualisation doit être au moins égale à 40000 images par secondes. Cette visualisation haute vitesse doit de plus s'accompagner d'une bonne résolution pour dissocier les iso-chromes et tenter de visualiser les écoulements de troisième corps dans le contact. La résolution envisageable à cette vitesse d'acquisition est de 512 x 256 pixels.

1.3.2.3.2 Problème identifié

Après évaluation des différentes caméras (au mieux 8000 images pour une résolution de 32x16 pixels) a disposition au laboratoire ou dans l'environnement scientifique direct, il a semblé difficilement envisageable d'utiliser ce matériel pour l'ANR DiNEET. Le coût prohibitif de la location de telles caméras (1700€/jour HT, hors assurance et opérateur), leur manque de disponibilité et de flexibilité rend cette voie d'accès à ce matériel difficilement envisageable.

1.3.2.3.3 Solution finale mise en œuvre

Au vu des besoins de différents chercheurs du laboratoire et sous l'impulsion de membre du projet ANR DiNEET, une caméra ultra-rapide a été acquise par le laboratoire. La gestion tant des aspects techniques que financiers de cette acquisition ont été gérés par le responsable du GT1. Le cahier des charges d'achat a été ainsi défini pour satisfaire aux besoins de activités scientifiques de l'ensemble des chercheurs intéressés, incluant ceux de l'ANR DiNEET. Le matériel acquis permet de satisfaire au cahier des charges défini dans le Livrable D1.1 – version 1.


(a)

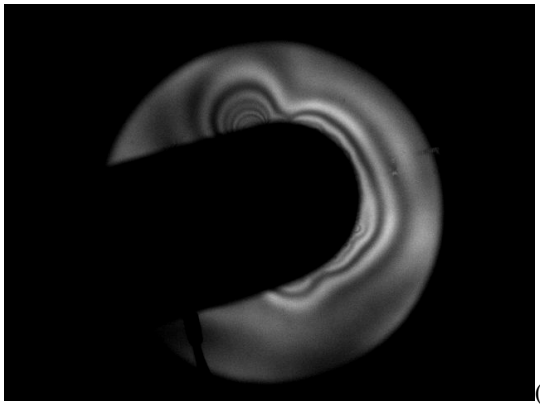

(b)

Fig. 1.12 : (a) dispositif de visualisation et (b) isochromes acquises sur le dispositif expérimental à 20 000 images/secondes

La caméra est un modèle Phantom V710 de Vision Research permettant d'acquérir, dans les conditions de l'ANR, 20 000 images par secondes pour une résolution de 640x480 pixels en 12Bits de niveaux de gris pendant 2,7secondes (16Go de données).

Afin d'acquérir avec précision les franges observées, un filtre sélecteur de longueur d'onde de 546nm a été mis devant l'objectif de la caméra. Ainsi, les isochromes, lignes noires sur les images acquises par la caméra rapide, sont ainsi directement corrélées à une valeur précise de τ_{max}.

Afin de compléter l'acquisition des contraintes dans le disque au cours de l'essai, une caméra haute résolution mais basse vitesse (ex : caméscope full HD) a été positionné à 45° du contact afin de suivre l'évolution de la formation de la couche de troisième corps dans le contact ainsi que l'émission sonore du dispositif. Un exemple de visualisation avec cette caméra est présenté sur la figure 1.12.

1.3.2.4 Mesure des gaz émis

1.3.2.4.1 Cahier des charges : Livrable D1.1 – version 1

Les points de comparaison entre échelle D et dispositif expérimental sont complexes à mettre en oeuvre. Une tentative de mesure des gaz consommés au cours du frottement par spectrométrie de masse (cf. Thèse M.Gouider – LaMCoS - 2004) est en cours d'évaluation. En effet s'il n'existe pas de consommation d'oxygène, alors seul du cuivre existera dans le contact ; à contrario, s'il y a consommation d'oxygène c'est qu'il y a formation d'un des oxydes de cuivre.

Un spectromètre de masse avec module de quantification par gaz de référence a été gracieusement offert au projet DiNEET par la centrale de Creys Malville d'EDF en collaboration avec Endel et Areva. Cet appareil va être testé puis remis en service (délais non quantifiable) pour être monté sur le dispositif expérimental.

1.3.2.4.2 Problème identifié

Bien que dans le cadre de ce projet un spectromètre de masse ai pu être gracieusement acquis par le GT1 (cf. CdC initial), la mise en œuvre de cette mesure ne peut être réalisée tant que le verrou d'interactions entre GT1 et GT4 ne sera pas levé (cf. section 1.3.1.3).

1.3.2.4.3 Solution finale mise en œuvre

La mise en œuvre de ce point particulier, qui constituait un risque majeur initialement identifié dans le projet, est donc repoussée à une date actuellement non déterminable.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'assemblage des derniers éléments du dispositif ayant été finalisé, le dispositif expérimental présenté ci-après sous sa version finale a été livré fin juillet 2010 (cf. Fig. 1.13 à 1.16).. Les tests de validation feront l'objet de la section suivante.

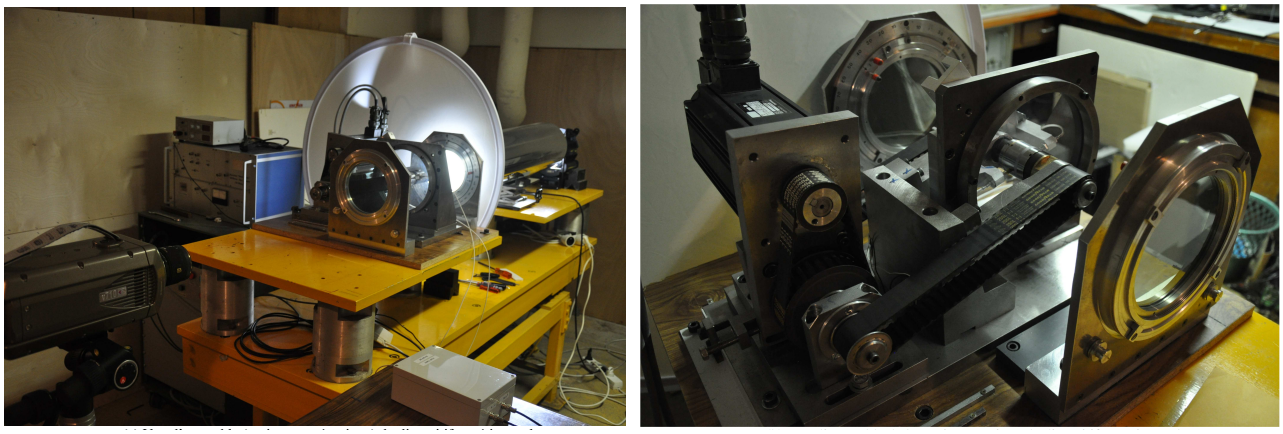


Fig. 1.13 : (à gauche) Vue d'ensemble (optique + mécanique) du dispositif expérimental et (à droite) vue d'ensemble de la partie mécanique du dispositif expérimental

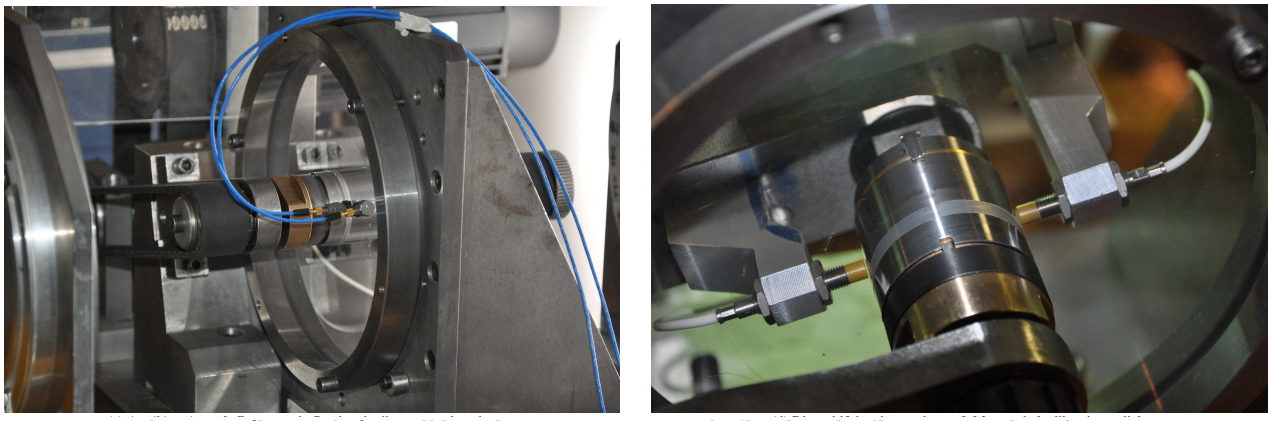


Fig. 1.14 : (à gauche) accéléromètres et couronne de fixation du disque en polycarbonate et (à droite) dispositif de mise en charge et mesure de la dilatation radiale

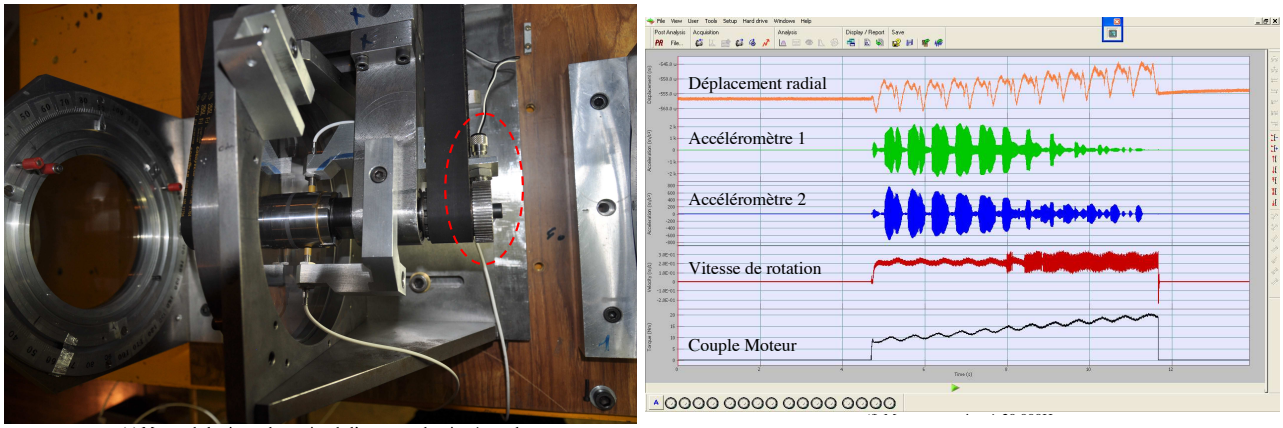


Fig. 1.15: (gauche) mesure de la vitesse de rotation de l'axe par codeur incrémental et (droite) mesures acquises à 20 000Hz

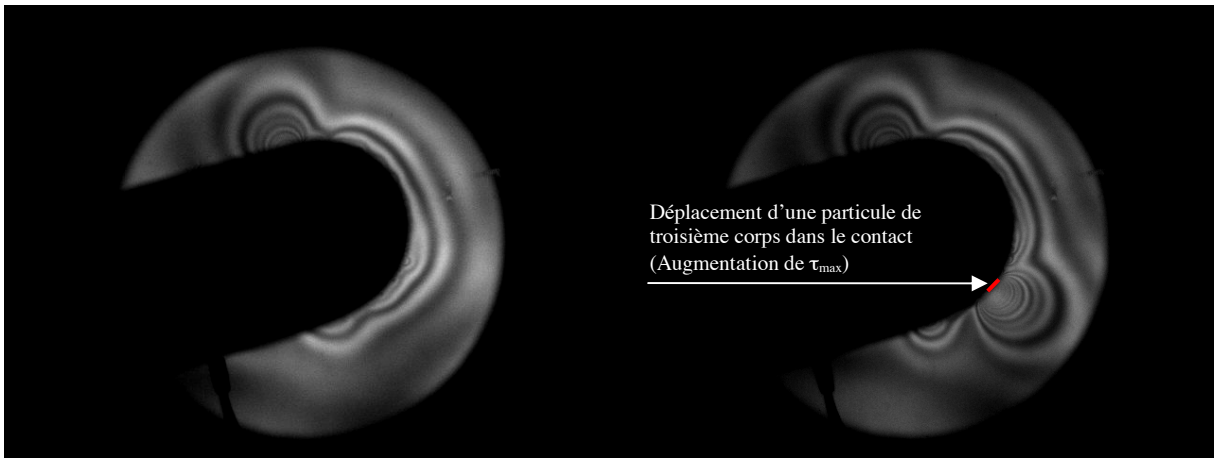


Fig.1.16: visualisation obtenue à 20 000 images/sec

3. VALIDATION DE L'EXPERIENCE MODELE

3.1 Couple, Vitesse et Accélération

Le couple moteur, indiquant la capacité du contact à résister tangentiellement, est mesuré directement sur le moteur au travers de la variation de l'intensité demandée pour imposer une vitesse de rotation (asservissement en vitesse).

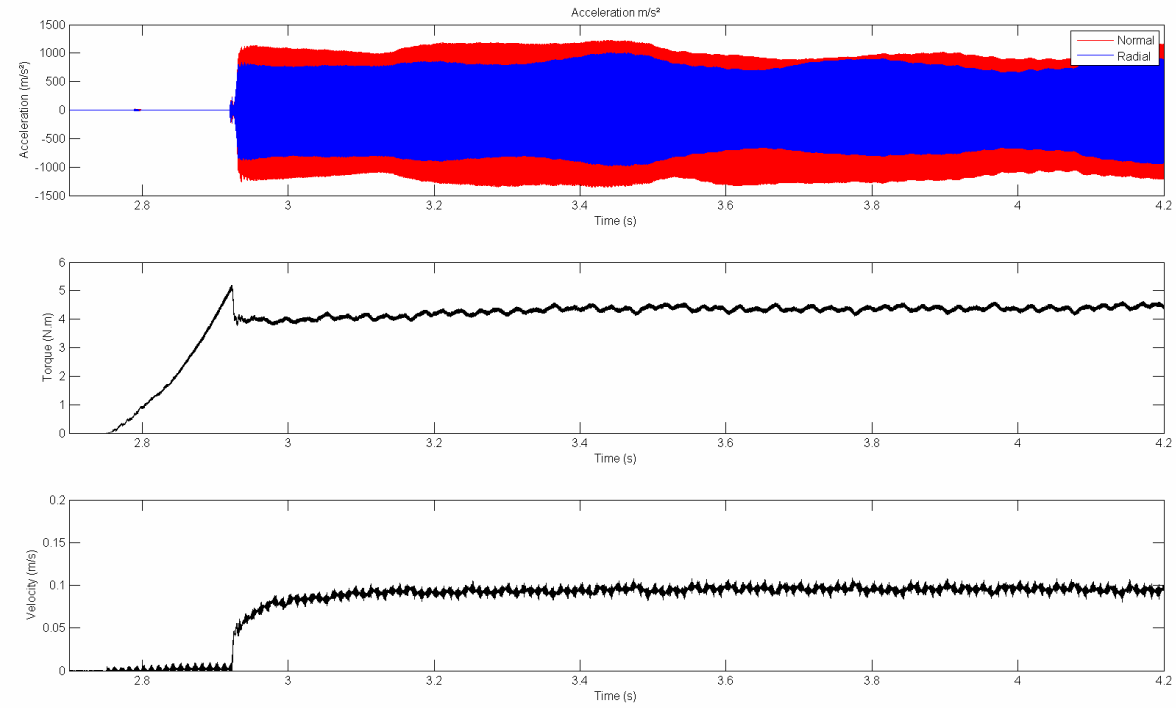


Fig.1.17 : résultat d'essai typiquement obtenu sur « PhotoTrib » en présence d'instabilités de contact : mesure d'accélérations, couple moteur et vitesse linéaire au contact

La vitesse de rotation de l'axe est mesurée indirectement par la vitesse de rotation du moteur (mesure par un codeur optique intégré au moteur) associée au rapport de réduction des poulies. Cette vitesse a été validée grâce à un « codeur incrémental » (cf. Fig. 1.18-gauche) monté directement sur l'axe. La Figure 1 montre bien que la vitesse de consigne est atteinte et stable pour une vitesse linéaire au contact imposée sur ces exemple

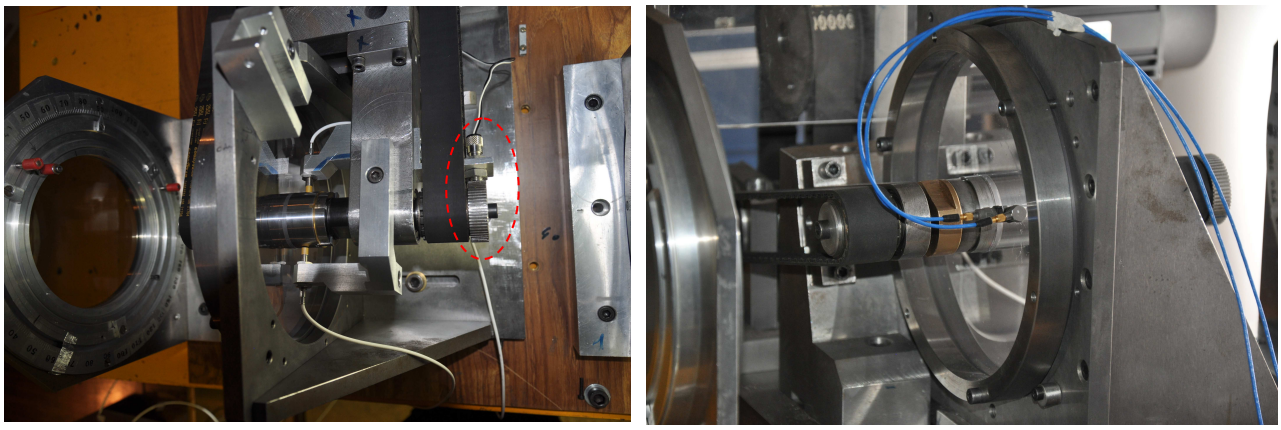


Fig. 1.18 : (à gauche) montage du codeur incrémental (en rouge) sur le banc d'essai « PhotoTrib » et (à droite) montage des accéléromètres (câbles bleus) sur le banc d'essai « PhotoTrib ».

à 0.1m/s.

Les accélérations sont mesurées par deux accéléromètres mono-axiaux (sensibilité 10mV/g) montés, l'un perpendiculairement au plan du disque et l'autre monté radialement dans le plan du disque (cf. Fig. 1.18-droite).

3.2 Dilatation radiale de l'axe

La dilatation radiale de l'axe permettant la mise en charge du disque en polycarbonate est mesurée par deux capteurs inductifs à courant de Foucault montés diamétralement opposés à l'axe (cf. Fig. 1.14 droite). Ce montage est réalisé de telle façon que seule la dilatation au diamètre de l'axe soit mesurée sans aucun autre effet parasite.

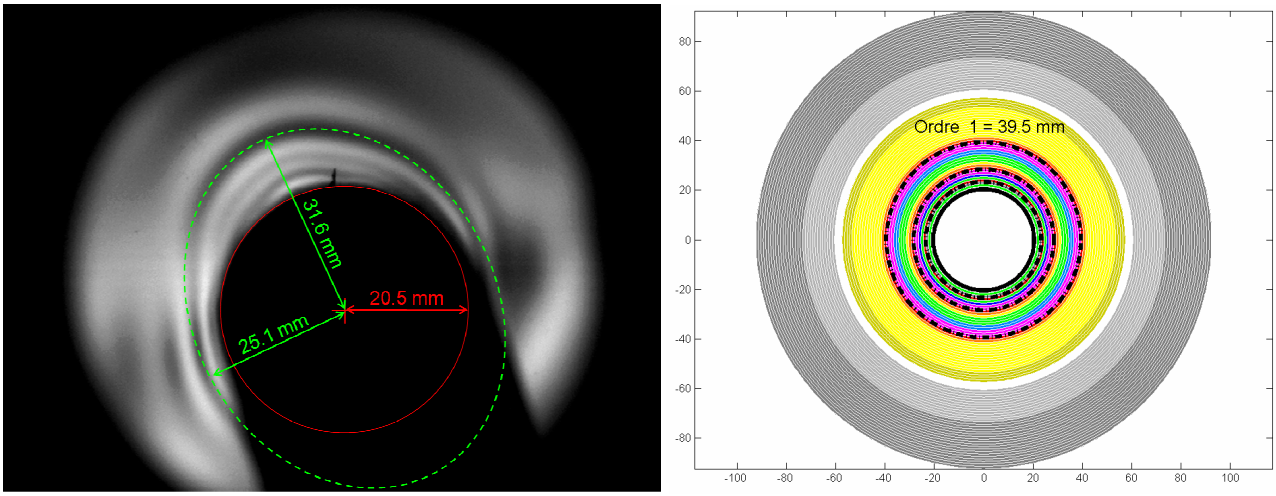


Fig. 1.19 : Image acquise sur « PhotoTrib » par caméra rapide à 20 000im/s et avec un filtre monochromatique de λ=546nm avec une dilatation mesurée par les capteurs à courant de Foucault de l'axe est de 30µm au diamètre, vitesse de rotation nulle. et (Droite) schéma de photoélasticité théorique du cas test.

Néanmoins, la dilatation de l'axe ne traduit pas directement la valeur de frettage de l'axe dans le disque attendu qu'il existe un jeu non nul nécessaire au montage du disque.

Afin de valider le dispositif de mise en charge, la position de la frange d'ordre 1, ordre le plus faible et donc le plus éloigné sur centre du disque, a été mesuré pour une dilatation mesurée avec les capteurs à courant de Foucault sur l'axe de 30µm au diamètre (cf. Fig. 1.19-gauche). La figure de photoélasticité théorique a été recalculée dans ce cas en couplant les équations classiques du Frettage avec celles liés à la photoélasticimétrie (cf. Fig. 1.19-droite). La position théorique de la frange d'ordre 1 en fonction de la dilatation de l'axe est représentée sur la figure 1.20.

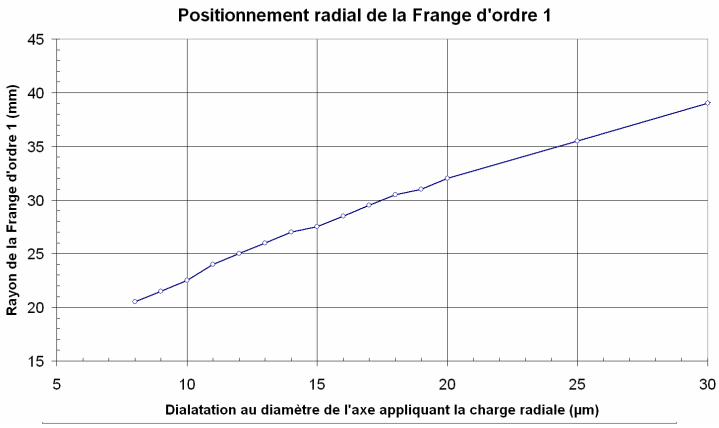


Fig. 1.20 : Positionnement radial théorique de la Frange d'ordre 1 avec λ=546nm.

La position radiale mesurée expérimentalement se situe entre deux valeurs : 25,1 mm et 31,6mm ; ceci équivaut respectivement à une dilatation locale du diamètre de l'axe de 13µm et de 20µm, c'est-à-dire une dilatation moyenne mesurée par photoélasticité de 16,5µm au diamètre. La valeur souhaitée de la dilatation de l'axe était de 30µm au diamètre, l'écart est donc de 14µm et la forme des frange est elliptique :

- l'écart est principalement dû au jeu nécessaire pour permettre le montage de l'axe dans l'alésage;
- la forme elliptique est due à la qualité d'usinage qui, sur un polymère, est ici d'une qualité remarquable et peut difficilement être améliorée : 7µm pour un diamètre de 41mm.

La valeur absolue de la dilatation mesurée ne correspond finalement pas à la dilatation de mise en charge souhaitée. Néanmoins, toutes les dilatations dans les essais ont été effectuées avec le même protocole : mesure entre l'axe non dilaté (déchargé) et l'axe dilaté. Ces valeurs de mise en charge par dilatation radiale de l'axe peuvent ainsi être interprétées d'un point de vu relatif.

3.3 Reproductibilité des essais

Pour chaque disque en polycarbonate, l'usinage, l'hygrométrie et le montage sont autant de paramètres qui ne sont pas parfaitement maîtrisables. Ainsi, même si les phénomènes tribologiques observés à l'échelle B i.e. formation de troisième corps et influence sur l'évolution des instabilités dynamiques de contact, sont similaires d'un disque à l'autre, les fréquences des instabilités dynamiques de contact peuvent néanmoins sensiblement différer.

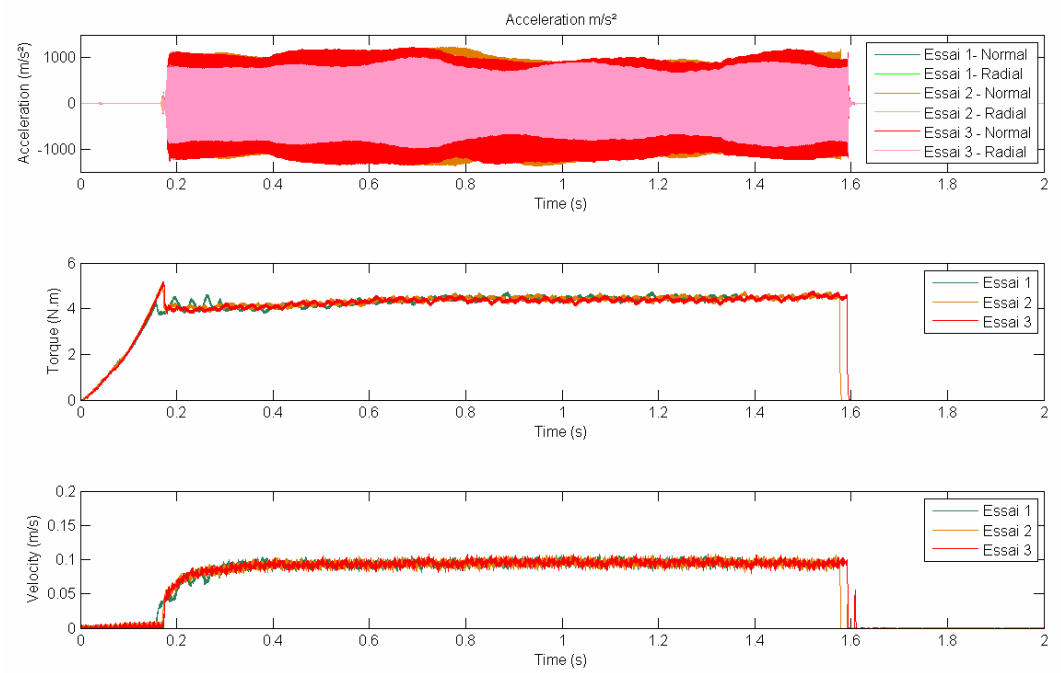


Fig. 1.21 : essai de reproductibilité (Δdiam=10µm, Vcontact=0.1m/s, sans troisième corps) avec visualisation des résultats temporels en termes d'accélérations, de couple et de vitesse

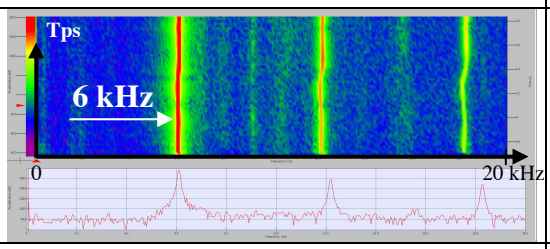
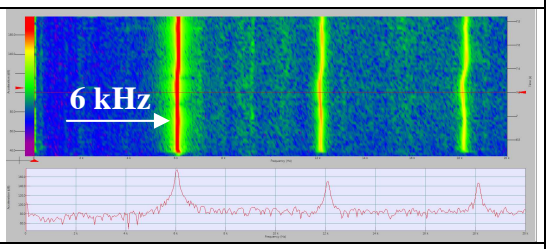
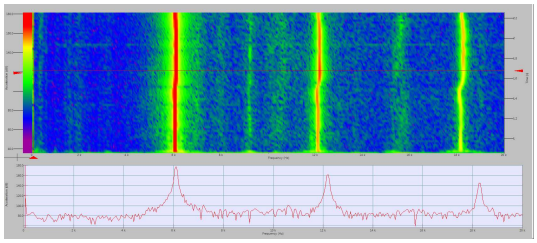
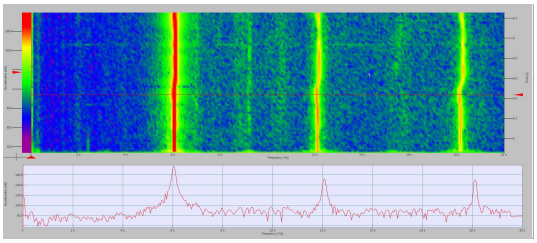
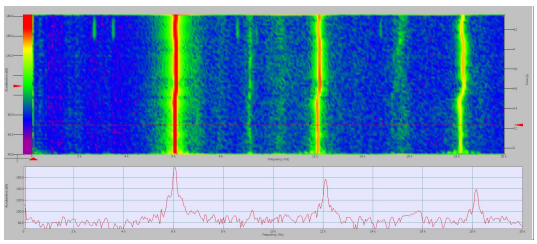
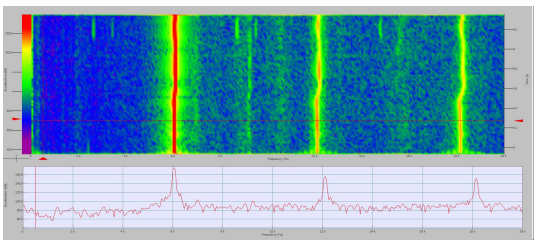
Type / N° essai	Accélération **normale** au plan du disque	Accélération **radiale** dans le plan du disque
1		
2		
3		

Fig.1.22 : essai de reproductibilité (Δdiam=10µm, Vcontact=0.1m/s, sans sans troisième corps) avec la visualisation des résultats fréquentiels en termes d'accélérations normale et radiale

Un exemple montrant la reproductibilité des essais sur un même disque est présenté sur la figure 1.21, d'un point de vu temporel, et sur la figure 1.22 d'un point de vu fréquentiel.

3.4 Etude paramétrique

La campagne d'essais compte 82 essais principaux (cf. annexe 1), hors essais de mise au point du dispositif «PhotoTrib», sur 5 disques en polycarbonate dont les caractéristiques sont les données dans le tableau suivant :

Matériau marque PCLIGHT	**Module d'élasticité** E = 2300MPa	**Coefficient de poisson** ν = 0,38	**Densité** ρ = 1200kg/m^3
Epaisseur 10mm	**Diamètre extérieur** 185mm (180mm de surface non encastrée)	**Diamètre intérieur** 41mm	**Constante de Brewster** C = 78 10^{-12}Pa^{-1}

Cette campagne d'essais a été réalisée afin, d'une part, de valider la reproductibilité des essais (cf. section 2) et d'autre part, d'étudier l'influence de différents paramètres sur le comportement dynamique et tribologique du contact fretté disque-axe.

3.4.1 Influence de la dilatation radiale

L'influence de la dilatation radiale sur l'existence ainsi que les caractéristiques fréquentielles des instabilités de contact a été évaluée. Pour cette étude paramétrique, les dilatations retenues sont de 10 et 30µm au diamètre afin de respecter la gamme de couple admissible par le moteur du dispositif « PhotoTrib ». La vitesse linéaire au contact retenue est de 0.1m/s ; cette condition permet d'effectuer des essais suffisamment longs sans formation importante de troisième corps et avec une régulation de la vitesse du moteur peu bruitée.

3.4.1.1 Influence de la dilatation radiale sans troisième corps

La figure 1.23 présente les résultats temporels des deux types d'essais sans troisième corps.

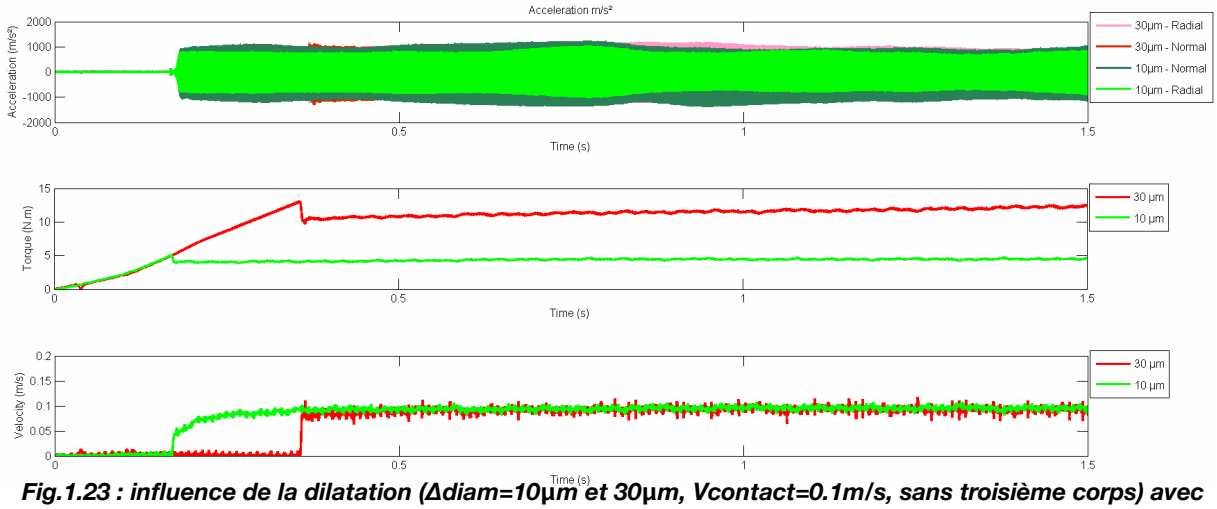


Fig.1.23 : influence de la dilatation (Δdiam=10µm et 30µm, Vcontact=0.1m/s, sans troisième corps) avec la visualisation des résultats temporels en terme d'accélérations, de couple et de vitesse

La vitesse de consigne est atteinte et reste constante tout le long de l'essai. Le couple moteur traduit la proportion du contact à résister tangentiellement et est donc lié di-

rectement au coefficient de frottement. Ceci est valable si la dilatation radiale de l'axe, i.e. l'effort normal au contact, est supposée constante tout le long de l'essai sans troisième corps. Au début de l'essai, le couple moteur est fortement croissant et sa valeur maximale est directement proportionnelle à la valeur de la dilatation. Ensuite, le couple moteur croît faiblement et linéairement tout le long de l'essai traduisant une augmentation du couple résistant au contact. Ceci est probablement du à une activation par frottement l'adhésion du polycarbonate sur l'acier constituant l'axe.

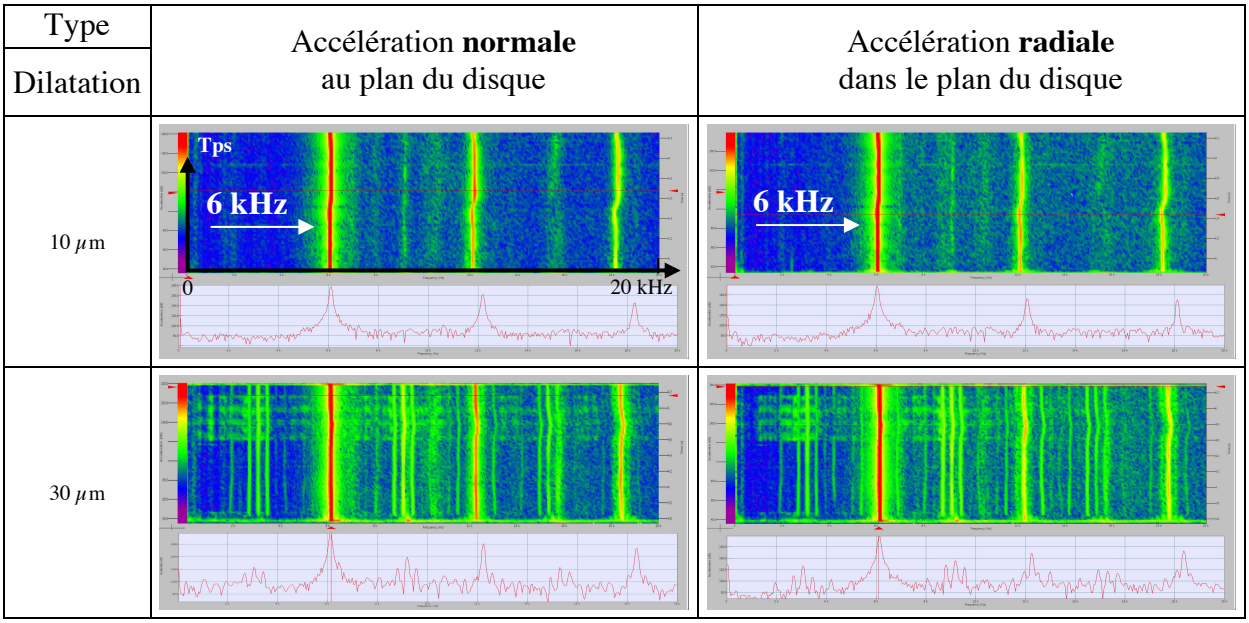


Figure 10 : Influence dilatation : Δdiam=10µm et 30µm, Vcontact=0.1m/s, sans troisième corps. Résultats fréquentiels : Accélérations normale et radiale

Pour chacune des conditions, des instabilités de contact d'une fréquence de 6kHz sont observées (cf. Fig. 1.24). La composante principale de cette accélération est à dominante normale, c'est-à-dire hors du plan du disque (cf. Fig. 1.23). L'amplitude des accélérations mesurées semble insensible à la variation de dilatation radiale dans la gamme étudiée.

3.4.1.2 Influence de la dilatation radiale avec troisième corps

La figure 1.25 présente les résultats temporels des deux types d'essais avec troisième corps. La vitesse de consigne est atteinte et reste constante tout le long de l'essai. Les principales caractéristiques notées pour les essais sans troisième corps restent valables.

Néanmoins, les instabilités de contacts sont désormais sous forme de « pulses » et avec une fréquence de 7.5kHz (cf. Fig. 1.26). dont la composante principale est radiale, c'est-à-dire dans le plan du disque. La fréquence plus élevée et la différence de mode de disques excité sont la conséquence du changement de disque entre les deux séries d'essais. Ce dernier induit une variation faible mais suffisante de conditions aux limites (raideur de l'encastrement, tolérance usinage,...) pour modifier le mode de disque excité.

Conclusion : Dans la gamme étudiée, les instabilités de contact sont, à cette échelle d'observation, insensibles à une variation de la dilatation radiale de l'axe, c'est-à-dire de la force normale au contact, que ce soit en présence ou non de troisième corps. Néanmoins, en présence de troisième corps, l'excitation devient pulsée.

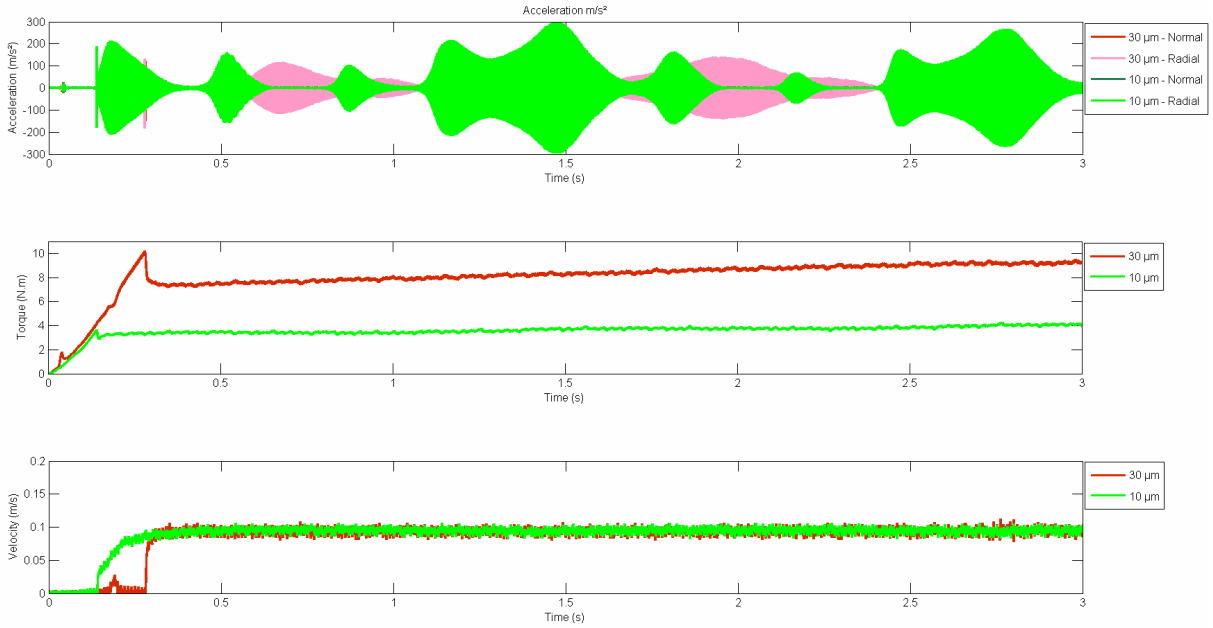


Fig. 1.25 : influence de dilatation (Δ_{diam}=10µm et 30µm, $V_{contact}$=0.1m/s) avec troisième corps et visualisation des résultats temporels en termes d'accélérations, de couple et de vitesse

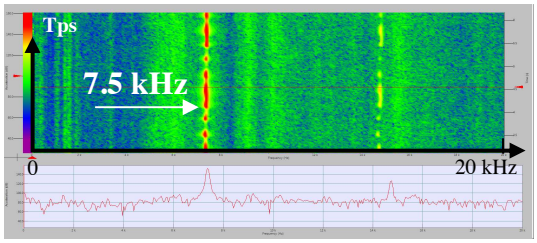
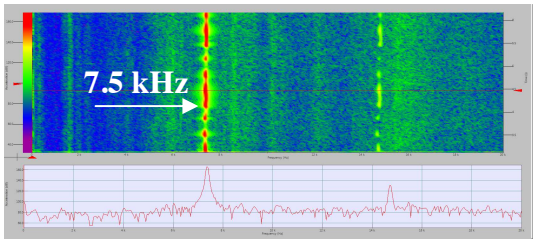
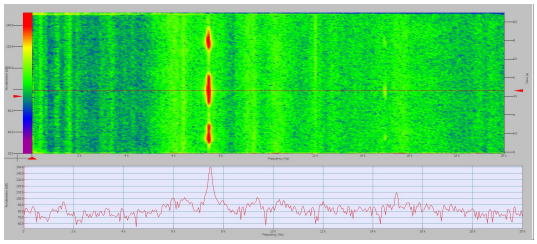
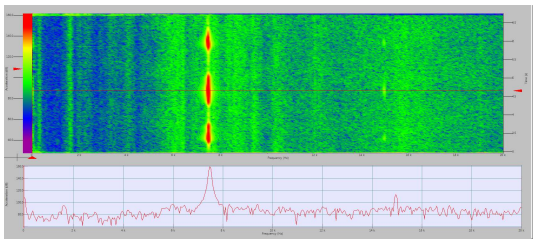
Type Dilatation	Accélération **normale** au plan du disque	Accélération **radiale** dans le plan du disque
10 μm		
30 μm		

Figure 1.26 : Influence dilatation : Δdiam=10µm et 30µm, Vcontact=0.1m/s, avec troisième corps. Résultats fréquentiels : Accélérations normale et radiale

3.4.2 Influence de la vitesse au contact

L'influence de la vitesse au contact sur l'existence, ainsi que les caractéristiques fréquentielles des instabilités de contact a été évaluée. Pour cette étude paramétrique, les vitesses au contact retenues sont :

- sans présence de troisième corps : 0.01 et 0.1m/s;
- avec présence de troisième corps : 0.01, 0.1 et 0.5m/s.

Le dispositif « PhotoTrib » permet de plus amples variations de la vitesse au contact, cependant la gamme retenue permet de réaliser des essais, d'une part, sans troisième corps et, d'autre part, sans détruire le disque trop rapidement par échauffement du polycarbonate. La dilatation retenue de l'axe est de 10µm au diamètre pour l'essai sans troisième corps et de 0µm au diamètre pour l'essai avec troisième corps. Cette différence est due au fait que, sans dilatation et sans troisième corps, les instabilités dynamiques de contact n'existent pas et, avec dilatation et présence abondante de troisième corps, le couple moteur est au-delà des limites admissibles par le dispositif « PhotoTrib ».

3.4.2.1 Influence de la vitesse au contact sans troisième corps

La Figure 1.27 présente les résultats temporels des deux types d'essais à 0.01 et 0.1m/s sans troisième corps.

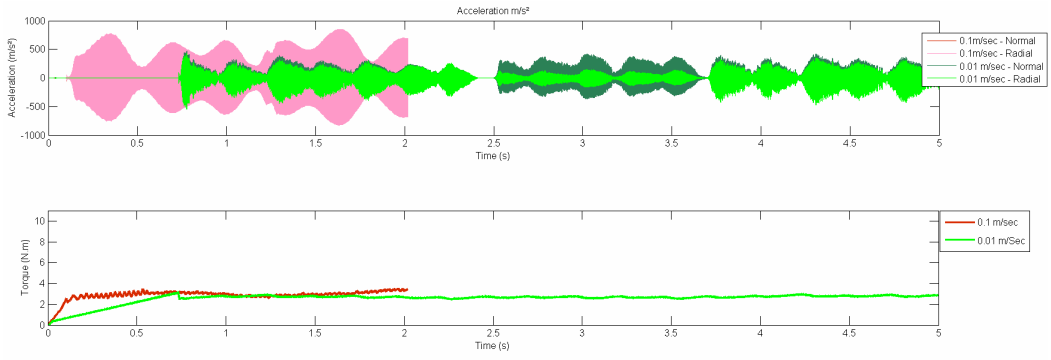


Fig. 1.27 : influence de la vitesse (Δ_{diam}=10µm, $V_{contact}$=0.01m/s et 0.1m/s) sans troisième corps. avec visualisation des résultats temporels en terme d'accélérations, de couple et de vitesse

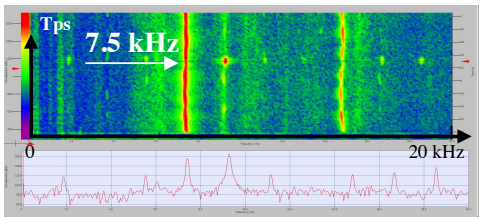
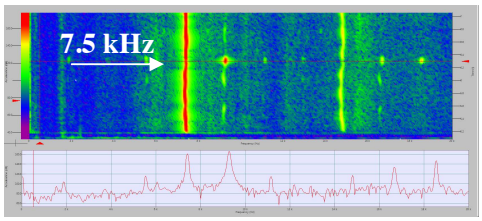
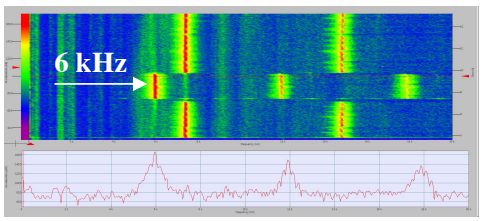
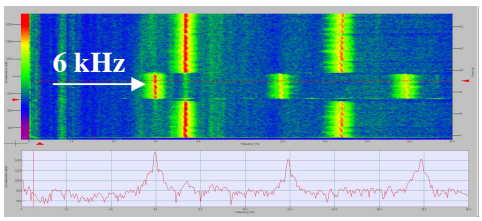
Type / Vitesse	Accélération **normale** au plan du disque	Accélération **radiale** dans le plan du disque
0.1 m/sec		
0.01 m/sec		

Fig. 1.28 : Influence vitesse : Δdiam=10µm, Vcontact=0.01m/s et 0.1m/s, sans troisième corps. Résultats fréquentiels : Accélérations normale et radiale

Sur ces deux essais, l'enregistrement de la vitesse n'a pas fonctionné et ne peut donc pas être présenté (voir section 3.2.2 pour des vitesses équivalentes). Le couple moteur est faible et insensible à la variation de vitesse. Seul le temps initial pour atteindre le

couple maximum avant la mise en mouvement de l'axe est logiquement plus long pour la vitesse la plus faible de 0.01m/s.

Les deux types d'essais sont le lieu d'instabilités de contact principalement dans le plan du disque. Néanmoins une alternance entre un mode dans le plan du disque à 7.5kHz et un mode hors du plan du disque à 6kHz est observée pour la vitesse de 0.01m/s (cf. Fig. 1.28). Cette alternance apparaît à basse vitesse mais cette configuration correspond à la limite basse de rotation du moteur qui maintient difficilement la vitesse constante et peu bruitée. Le lien direct entre alternance de mode et vitesse faible n'est probablement qu'une conséquence du comportement du moteur.

3.4.2.2 Influence de la vitesse au contact avec troisième corps

La figure 1.29 présente les résultats temporels des trois types d'essais avec troisième corps. Pour les essais à 0.01m/s et 0.1m/s, la vitesse de consigne est atteinte et reste constante. Pour l'essai à 0.5m/s, la vitesse de consigne est atteinte à t = 0.08s mais l'essai a du être arrêté car la dégradation du disque était trop rapide.

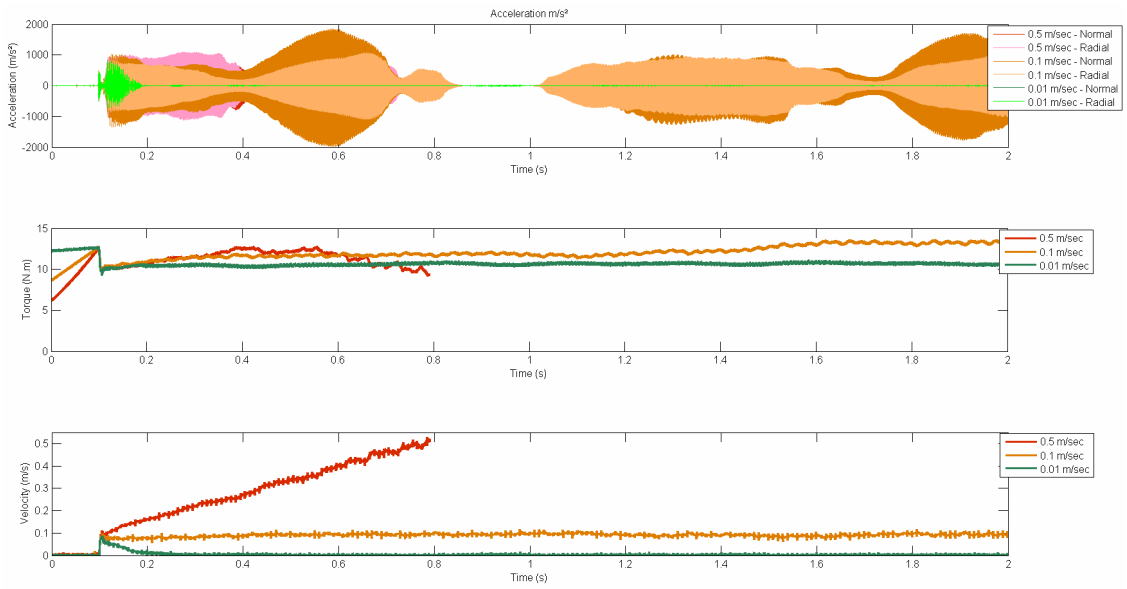


Fig. 1.29 : influence de la vitesse (Δ_{diam}= 0µm, $V_{contact}$=0.1m/s à 0.5m/s) en présence de troisième corps et visualisation des résultats temporels en terme d'accélérations, de couple et de vitesse

Le couple moteur est peu affecté par la variation de vitesse, il est sensiblement plus constant pour les essais à basse vitesse. Cependant ces derniers ne présentent pas de crissement (cf. Fig. 1.30). Pour les essais à 0.1 et 0.5m/s, le crissement reste mono-fréquentiel à 6kHz sous forme de « pulses » et dont la composante principale est radiale, c'est-à-dire dans le plan du disque.

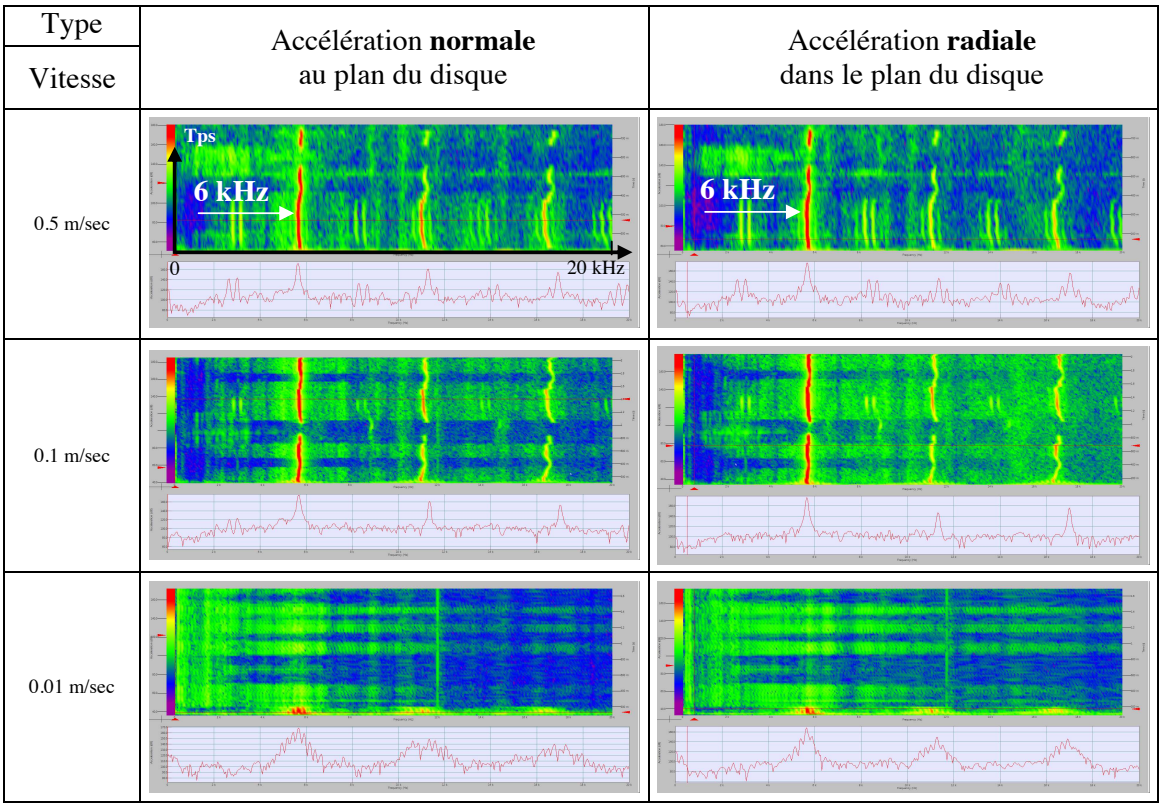


Fig. 1.30 : Influence vitesse : Δdiam= 0µm, Vcontact=0.1m/s à 0.5m/s, avec troisième corps. Résultats fréquentiels : Accélérations normale et radiale

Conclusion : Les instabilités de contact nécessitent une vitesse suffisamment élevée pour apparaître. Dans la gamme étudiée de 0.1 à 0.5 m/s et à cette échelle d'observation, elles sont insensibles à une variation de vitesse que ce soit en présence ou non de troisième corps. Néanmoins, en présence de troisième corps, l'excitation devient pulsée.

3.4.3 Influence de l'inversion du sens de rotation

L'influence du sens de rotation sur l'existence, ainsi que les caractéristiques fréquentielles des instabilités de contact a été évaluée. Les paramètres d'essai retenus sont une dilatation au diamètre de 10µm, une vitesse de rotation de 0.01m/s et pas de présence de troisième corps. L'inversion de sens de rotation a été effectuée sur deux essais consécutifs.

Le temps nécessaire pour atteindre le couple moteur limite de mise en rotation est sensiblement plus long lorsque le sens de rotation est inversé (cf. Fig. 1.31). Par la suite, l'évolution du couple moteur identique dans les deux cas.

L'essai dans le sens trigonométrique est le même que celui présenté pour une vitesse de 0.01m/s à la section 3.2.1, le mode principal de cet essai est à 7.5kHz et dans le plan du disque (cf. Fig. 1.32). Lors de l'inversion du sens de rotation, le mode principal reste dans le plan du disque et avec une fréquence de 7.5kHz. Cependant, ces instabilités de contact n'étaient pas présentes en début d'essai et ne sont apparues qu'après environ 3 secondes d'essai. Les essais réalisés par la suite, dans le même sens inversé, ne présentent plus ce décalage temporel dans l'apparition des instabilités : il semble que le

contact ai besoin d' un certain «temps d' adaptation» avant de pouvoir à nouveau laisser des instabilités de contact se produire.

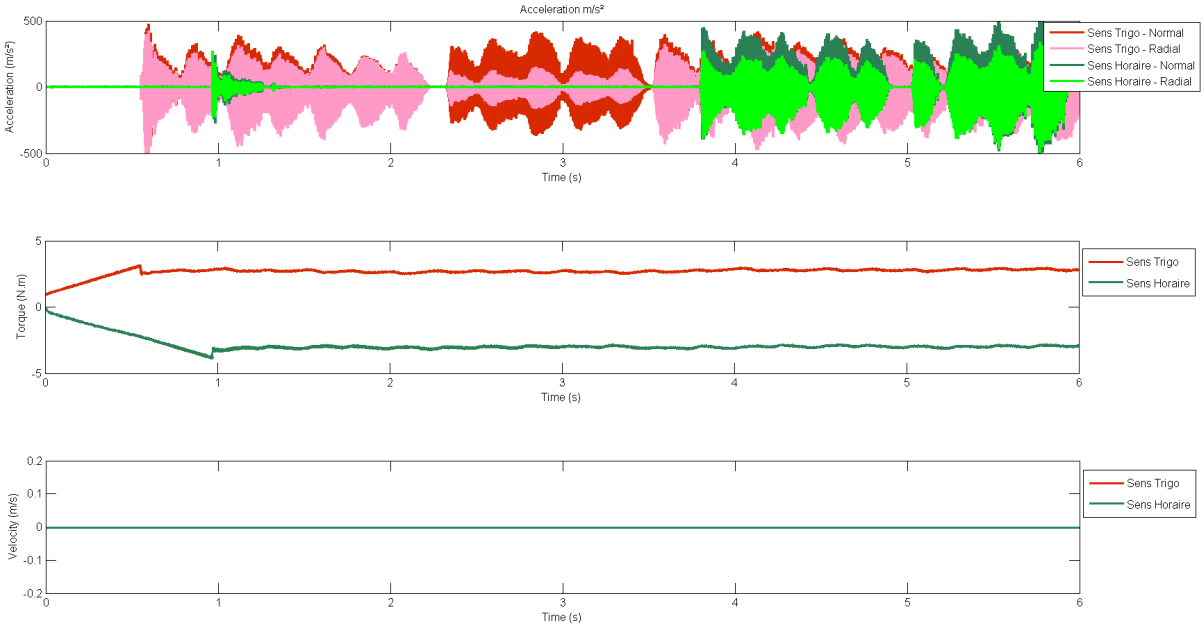


Fig. 1.31 : influence du sens de rotation (Δ_{diam}= 10µm, $V_{contact}$=0.1m/s) sans troisième corps et visualisation des résultats temporels en termes d'accélérations, de couple et de vitesse

Type / Sens	Accélération **normale** au plan du disque	Accélération **radiale** dans le plan du disque
Rotation sens trigonométrique		
Rotation sens horaire		

Fig. 1.32 : influence du sens de rotation (Δ_{diam}= 10µm, $V_{contact}$=0.1m/s) sans troisième corps. et visualisation des résultats fréquentiels en terme d'accélérations normale et radiale

Conclusion : L'inversion du sens de rotation ne modifie pas les instabilités de contact tant en forme qu'en fréquence. Cependant, un « temps d'adaptation » est requis, juste après l'inversion, avant que de les instabilités de contact ne réapparaissent.

3.4.4 Influence du « nettoyage » de la couche de troisième corps

L'influence du sens du « nettoyage » de la couche de troisième corps sur l'existence, ainsi que les caractéristiques fréquentielles des instabilités de contact a été évaluée. Les paramètres d'essai retenus sont une dilatation au diamètre de 10µm, une vitesse de rotation de 0.1m/s.

Le « nettoyage » de la couche de troisième corps a été réalisé par un nettoyage à l'éthanol de l'axe ainsi que de l'alésage du disque dans les même conditions que pour la préparation d'un disque « neuf », sorti d'usinage.

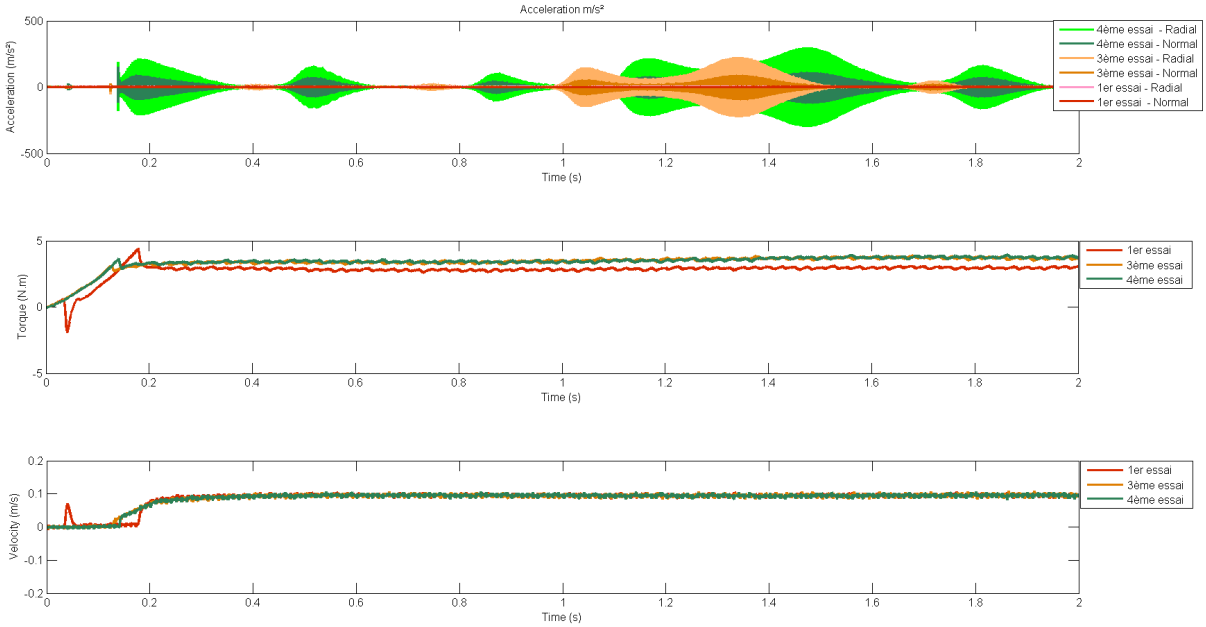


Fig. 1.33 : influence du « nettoyage (Δ_{diam}= 10µm, $V_{contact}$=0.1m/s) sans troisième corps et visualisation des résultats temporels en termes d'accélérations, de couple et de vitesse

Avant nettoyage (cf. Fig. 1.33), les instabilités de contact sont relativement constantes d'un point de vu fréquentiel avec un mode à 6kHz en dehors du plan du disque.

Après nettoyage (cf. Fig. 1.33 et 1.34), les deux premiers essais ne présentent pas d'instabilité de contact. La dilatation radiale a été augmentée de 0µm à 10µm a diamètre entre le 1er et le 2ème essai puis maintenue constante pour les troisième et 4ème essais. A partir du troisième essai, des instabilités de contact « pulsées » apparaissent de nouveau avec une fréquence de 7.5kHz correspondant à un mode dans le plan du disque. Cette tendance ce confirme au 4ème essai avec des instabilités plus soutenues. Après nettoyage la fréquence des instabilités est différente ; ceci s'explique par la sensibilité de cette fréquence à la variabilité de la condition limite d'encastrement du disque d'un montage à l'autre.

Le couple moteur ne présente pas de différence d'évolution notable entre les essais 2 à 4. Le couple de l'essai 1 est sensiblement plus faible du fait d'une dilatation radiale proche de 0µm

Conclusion : La « suppression » de la couche de troisième corps annihile la capacité du contact à produire des instabilités. Un « temps d'adaptation » est nécessaire au contact pour reproduire les conditions favorables, i.e. une couche de troisième corps d'épaisseur suffisante, à la réapparition de ces instabilités.

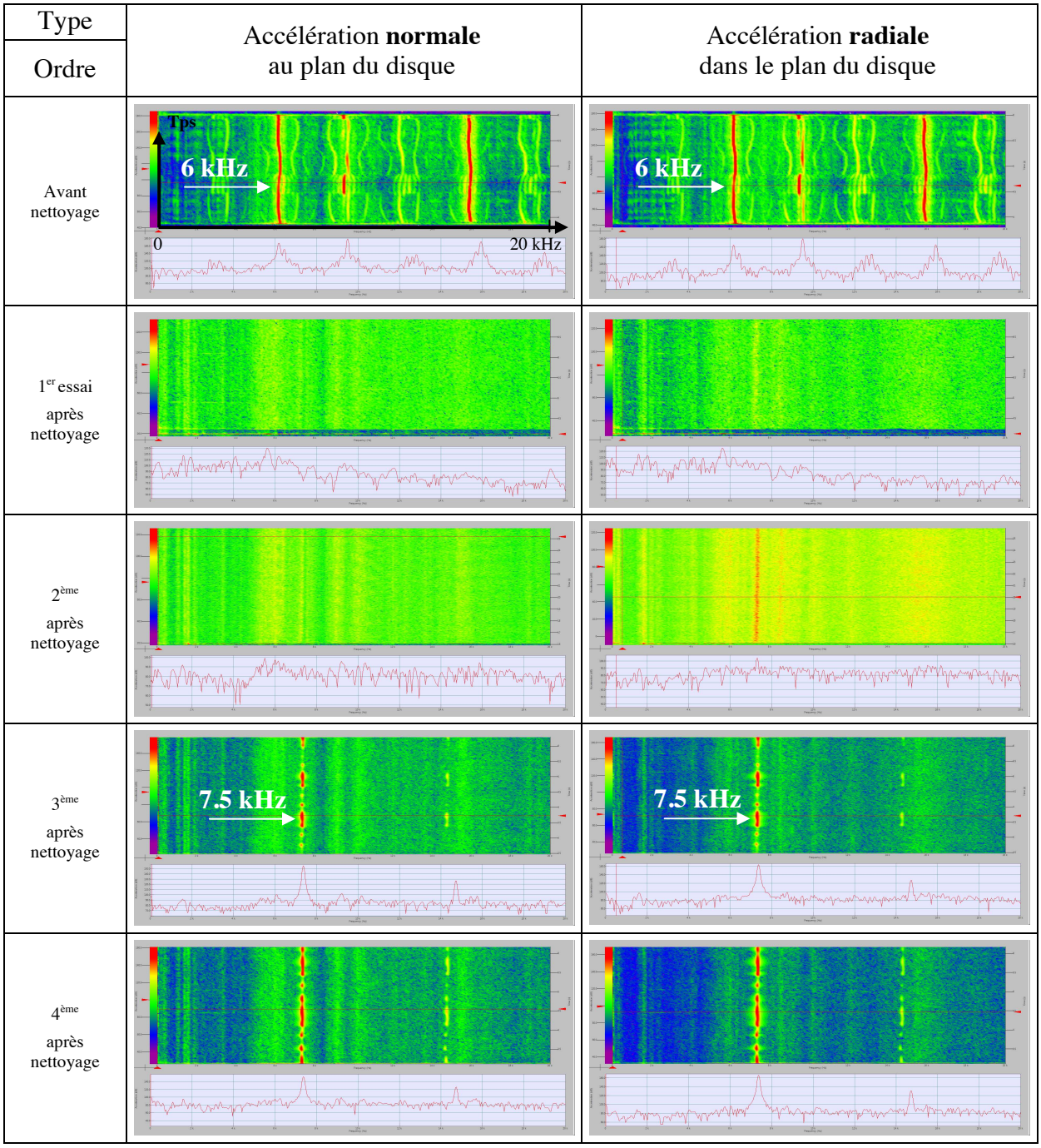


Fig. 1.34 : influence du « nettoyage » : Δdiam= 10µm, Vcontact=0.1m/s, sans troisième corps. Résultats fréquentiels : Accélérations normale et radiale

4 Synthèse tribologique

A la vue vu des résultats de la section 3.4, une étude a été menée afin de détailler l'influence du troisième corps sur les instabilités de contact en dissociant leur comportement des essais : sans troisième corps « visible », avec troisième corps « visible » et naissance du troisième corps « visible.

4.1 Comportement sans troisième corps « visible »

Les paramètres d'essai sont une dilatation au diamètre de 30µm, une vitesse de rotation de 0.1m/s. En sus des résultats temporels (cf. Fig. 1.35) et fréquentiels (cf. Fig. 1.36) sont présentés les résultats de la visualisation (cf. Fig. 1.37et 1.38) des contraintes de cisaillement maximales dans le plan du disque par photoélasticimétrie (cf. Fig. 1.39 et 1.41) ainsi qu'une visualisation du contact (cf. Fig. 1.38).

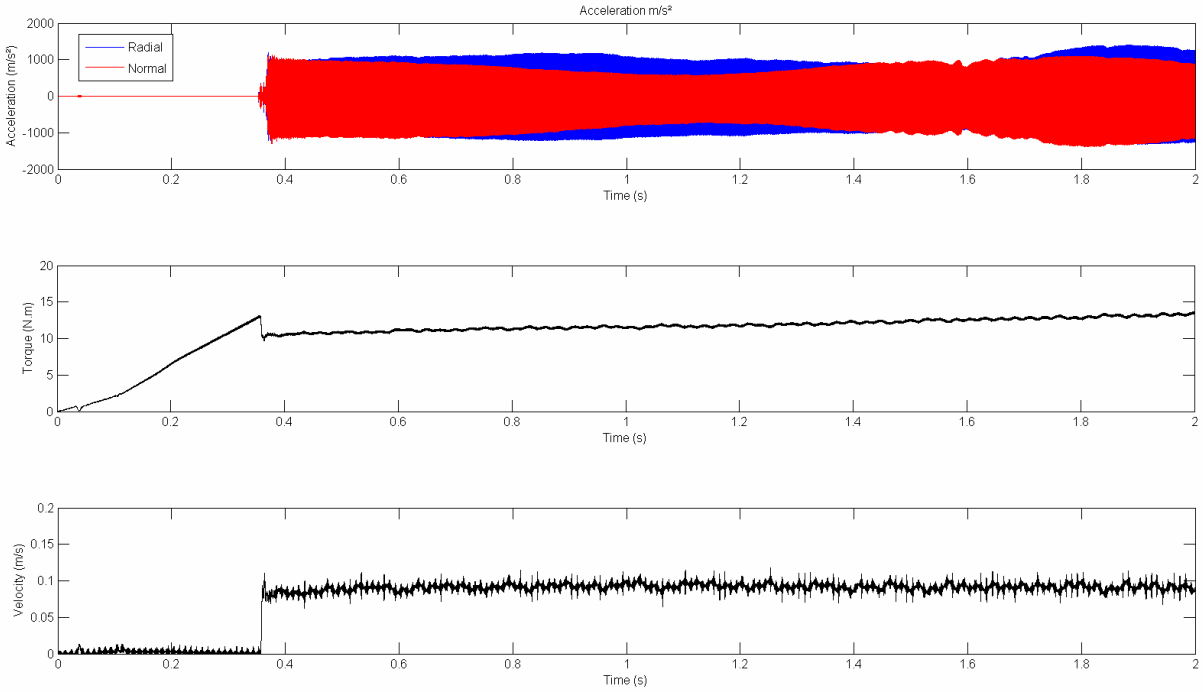


Fig. 1.35 : comportement sans troisième corps (Δ_{diam}= 30µm, $V_{contact}$=0.1m/s) et visualisation des résultats temporels en termes d'accélérations, de couple et de vitesse

Ces résultats sont mis en parallèles avec ceux de la modélisation par éléments finis en dynamique réalisée dans le GT1 (cf. Fig. 1.40) sans prise en compte d'une couche de troisième corps tel qu'observée sur le disque réel (cf. Fig. 1.42).

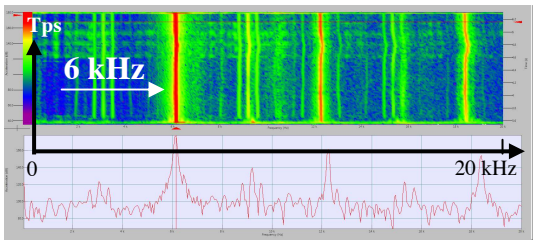
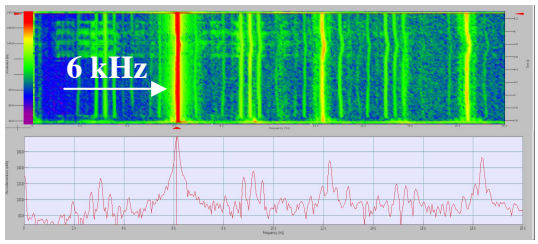
Type Sens	Accélération **normale** au plan du disque	Accélération **radiale** dans le plan du disque
Essais sans 3ème corps		

Fig. 1.36 : comportement sans troisième corps (Δ_{diam}= 30µm, $V_{contact}$=0.1m/s) et visualisation . des résultats fréquentiels en termes d'accélérations normale et radiale

Ces essais sont caractérisés par une excitation mono-fréquentielle de 6kHz (cf. Fig. 1.37) correspondant à un mode principalement dans le plan du disque attendu que l'am-

plitude des accélérations (cf. Fig. 1.36) mesurées par l'accéléromètre radial (en bleu) est supérieure à celle de l'accéléromètre normal au plan du disque (en rouge).

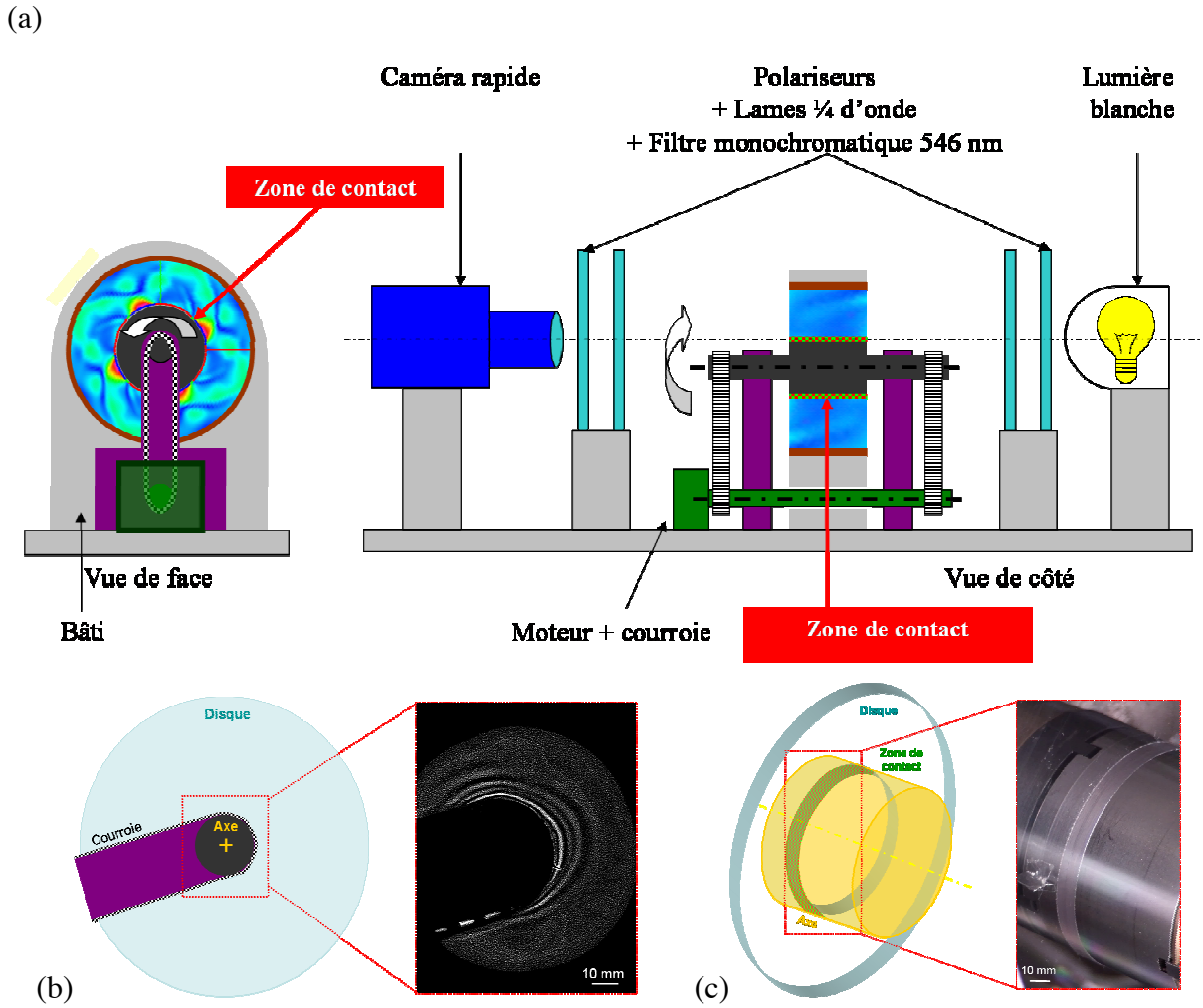


Fig. 1.37 : Principe de visualisation
(a) Vue d'ensemble du banc d'essai, du point de vue des caméras HD (b) et rapide (c)

La figure 1.38 montre l'évolution dans le domaine visible du contact. L'état visuel du contact ne change pas entre le l'état initial et l'état final : il n'y a pas de circulation « visible » de particule de troisième corps dans le contact à cette échelle d'observation. Ceci est confirmé par l'évolution de l'état des contraintes de cisaillement maximales dans le disque (cf. Fig. 1.39) qui reste identique entre le début et la fin d'essai.

D'un point de vu « qualitatif » (cf. Fig. 1.40), il existe une excellente adéquation entre la forme modale observée expérimentalement et celle reproduit numériquement. Néanmoins, la fréquence de 6kHz observée expérimentalement est beaucoup plus basse que celle reproduite numériquement, environ 9.5kHz (Cf. GT2), attendu que le modèle numérique « 2D » est beaucoup plus rigide que le dispositif expérimental.

La visualisation en caméra rapide à 20000images/secondes par photoélasticimétrie monochromatique du disque montre que les contraintes maximales dans le disque se déplacent radialement périodiquement. Ceci est montré par le déplacement radial d'envi-

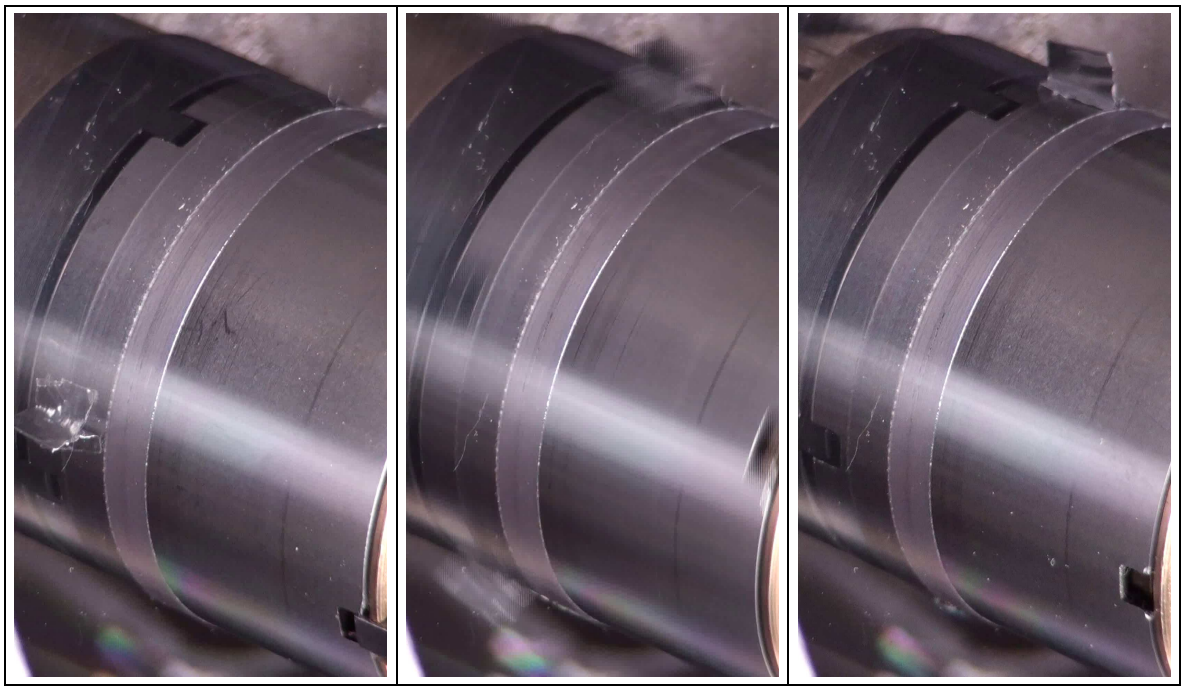


Fig. 1.38 : visualisation du « contact » par caméra HD à 25 images/s (a) état initial, (b) état intermédiaire, (c) état final

ron 1,5 mm de la frange de d'ordre 1 toutes les 3 à 4 images (ici, les images 38578 et 38580). Cette période est équivalente à une fréquence comprise entre 5kHz et 6.7kHz qui est en adéquation avec l'excitation modale mesurée par accélérométrie (cf. Fig. 1.36).

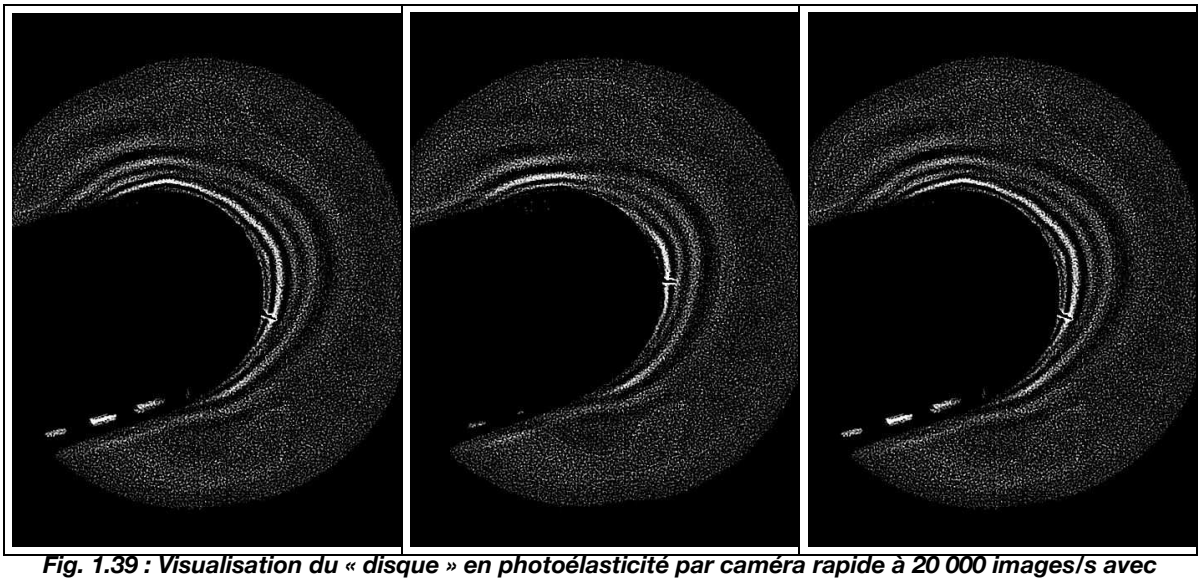


Fig. 1.39 : Visualisation du « disque » en photoélasticité par caméra rapide à 20 000 images/s avec un filtre monochromatique de λ=546 nm (a) état initial, (b) état intermédiaire, (c) état final

En fin d'essai, l'alésage du disque a été observé à la loupe binoculaire (Figure 28). Très peu de particules de troisièmes corps sont observées. Ces dernières sont de petite dimension (< 200µm) comparé à la dimension du contact (10mm de large sur un diamètre de 41mm).

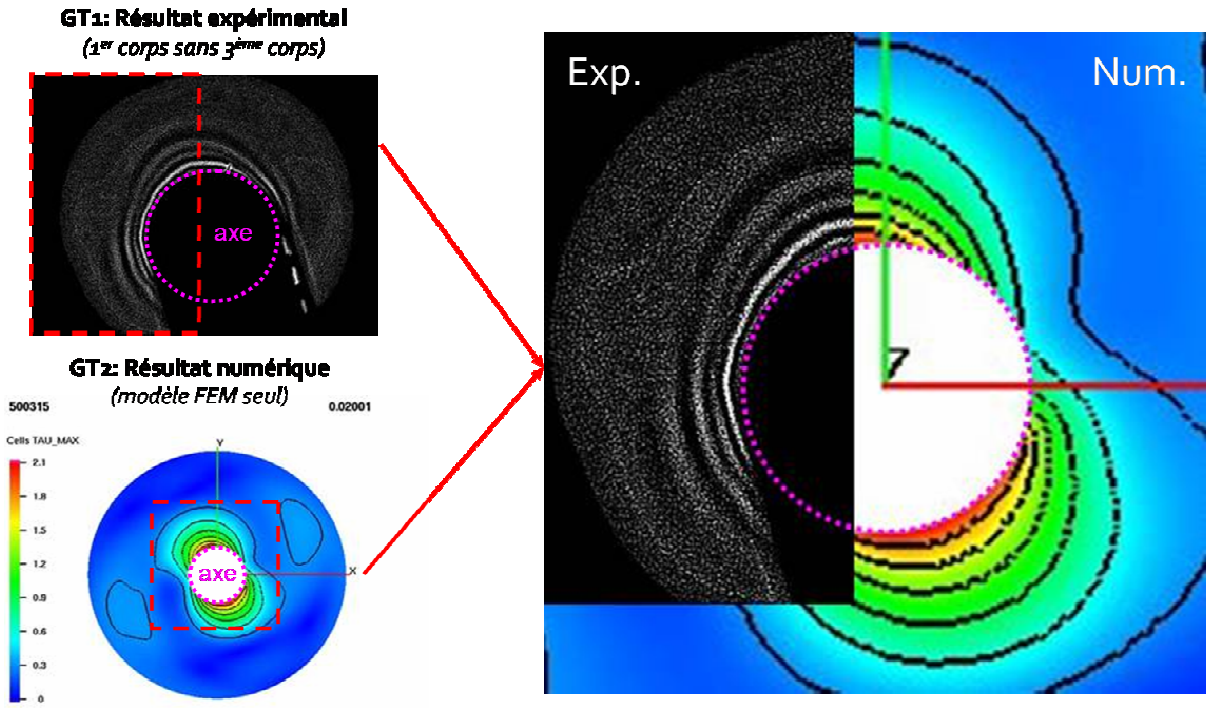


Fig. 1.40 : comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement (GT1) et par modélisation Eléments Finis sans troisième corps (GT2).

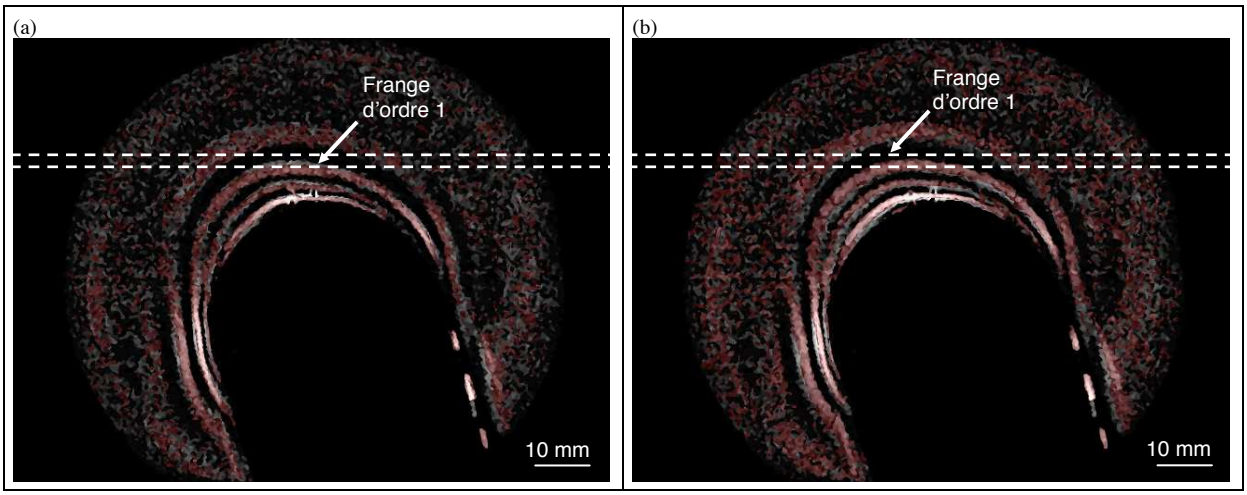


Fig. 1.41: superposition de l'état initial (gris clair) et de l'état des contraintes de cisaillement maximale en présence d'instabilités (rouge) visualisées par photoélasticimétrie : (a) minimum et (b) maximum d'amplitude de l'oscillation des contraintes.

Conclusion : Sans troisième corps « visible », les instabilités de contact reproduites numériquement par un modèle élément finis dynamique (GT 2) présentent une bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. Néanmoins, la rigidité du modèle numérique ne permet pas d'obtenir la même fréquence d'excitation.

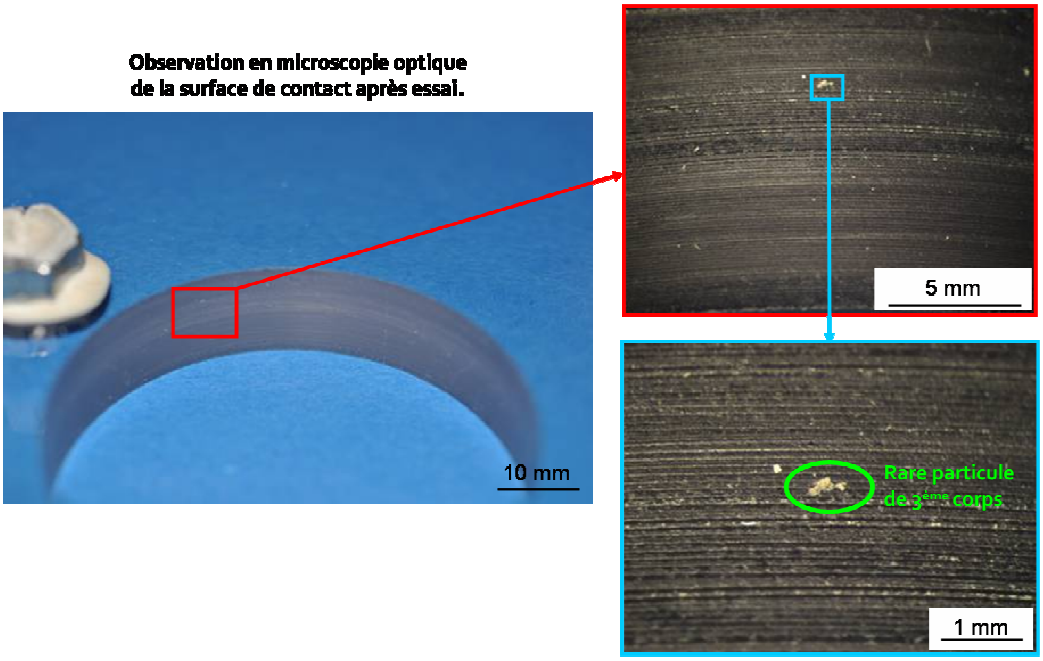


Fig.1.42 : observation en microscopie optique de la zone de contact après essai.

4.2 Comportement avec troisième corps « visible »

Les paramètres d'essai sont une dilatation au diamètre de 20µm, une vitesse de rotation de 0.2m/s. En sus des résultats temporels (cf. Fig. 1.43) et fréquentiels (cf. Fig. 1.44) sont présentés les résultats de la visualisation (cf. Fig. 1.37) des contraintes de cisaillement maximales dans le plan du disque par photoélasticimétrie (cf. Fig. 1.46) ainsi qu'une visualisation du contact dans le domaine visible (cf. Fig. 1.45).

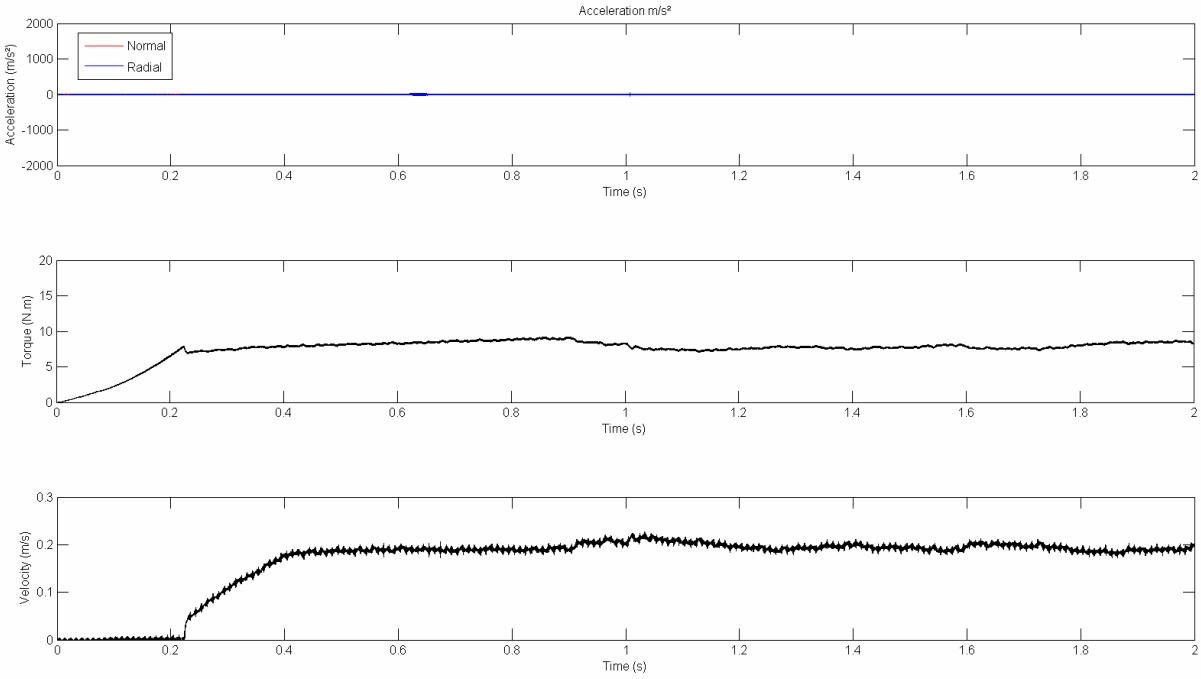


Figure 1.43 : comportement sans troisième corps (Δ_{diam}= 20µm, $V_{contact}$=0.2m/s) et visualisation des résultats temporels en termes d'accélérations, de couple et de vitesse

Ces résultats sont mis en parallèles avec ceux de la modélisation couplant éléments finis et éléments discrets réalisée par le GT1-GT2 (cf. Fig. 1.48). Cette dernière permet de prendre en compte des caractéristiques de la couche de troisième corps mesurées sur l'état final du disque (cf. Fig. 1.47).

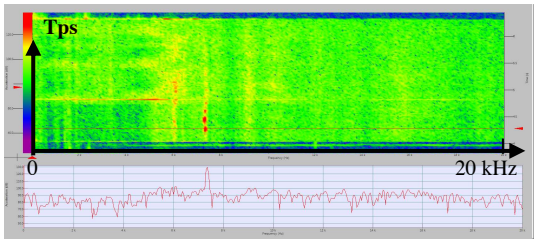
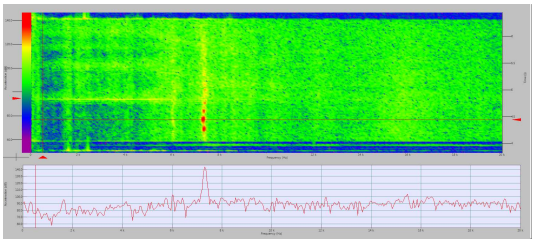
Type Sens	Accélération **normale** au plan du disque	Accélération **radiale** dans le plan du disque
Essais **avec** 3ème corps		

Fig. 1.44 : comportement sans troisième corps (Δ_{diam}= 20µm, $V_{contact}$=0.2m/s) et visualisation des résultats fréquentiels en termes d'accélérations normale et radiale

Tant dans le domaine temporel (amplitude très faible des accélérations (cf. Fig 1.43) que dans le domaine fréquentiel (pas de fréquence notable, cf. Fig. 1.44), il n'est pas observé d'indicateurs des instabilités de contact lorsqu'un nombre important de particules de troisième corps « visible » est présent dans le contact.

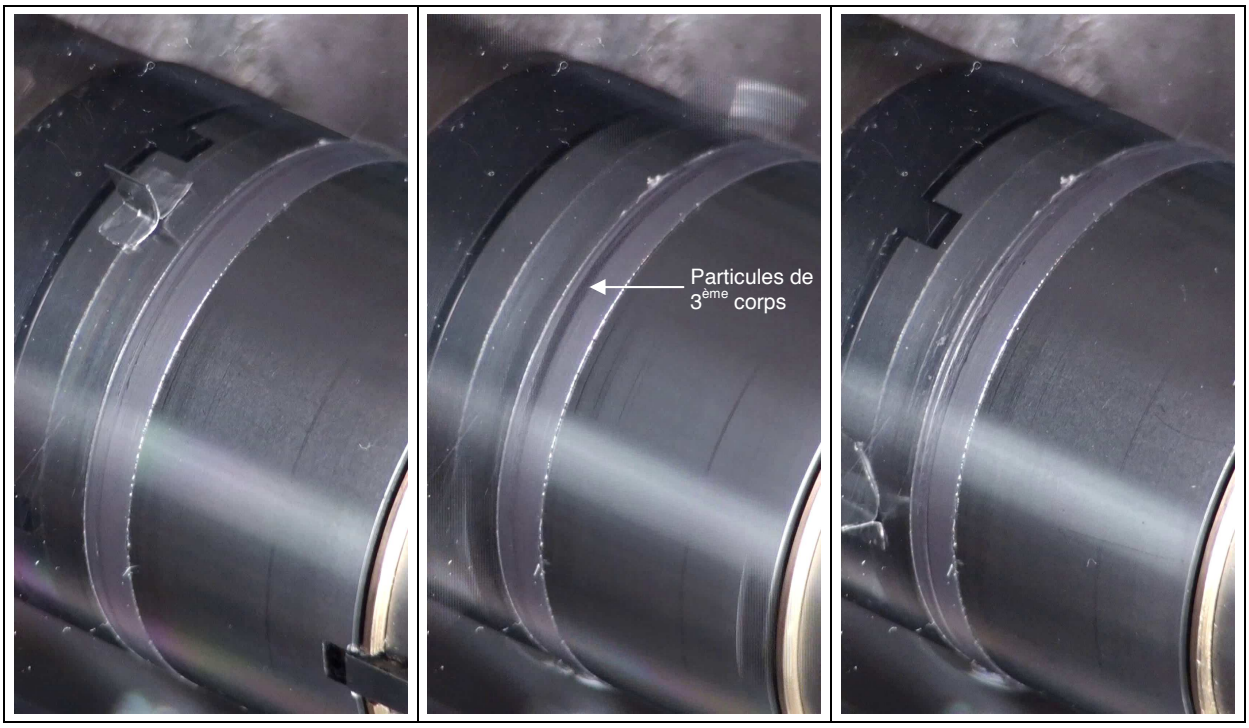


Fig. 1.45 : visualisation du « contact » par caméra HD à 25 images/sec (a) état initial, (b) état intermédiaire, (c) état final

Comme le montre la visualisation dans le domaine visible, des particules de troisième corps circulent dans le contact (état intermédiaire de la figure 1.45a). Le couple moteur (cf. Fig 1.43) n'est pas constant et varie en fonction de l'évolution de la couche de

troisième corps dans le contact : lorsqu'une particule de taille suffisante se crée (état intermédiaire de la figure 1.45a), le couple moteur augmente sensiblement.

De plus, la présence de ces particules a pour conséquence une augmentation très importante, quasiment d'un facteur 10, des contraintes de cisaillement maximales dans le disque à proximité du contact (cf. Fig 1.46) :

- état de contrainte initial (cf. Fig 1.46a) : ~0.6MPa (1er ordre de frange);
- état de contrainte final (cf. Fig 1.46c) : ~6MPa (10ème ordre de frange).

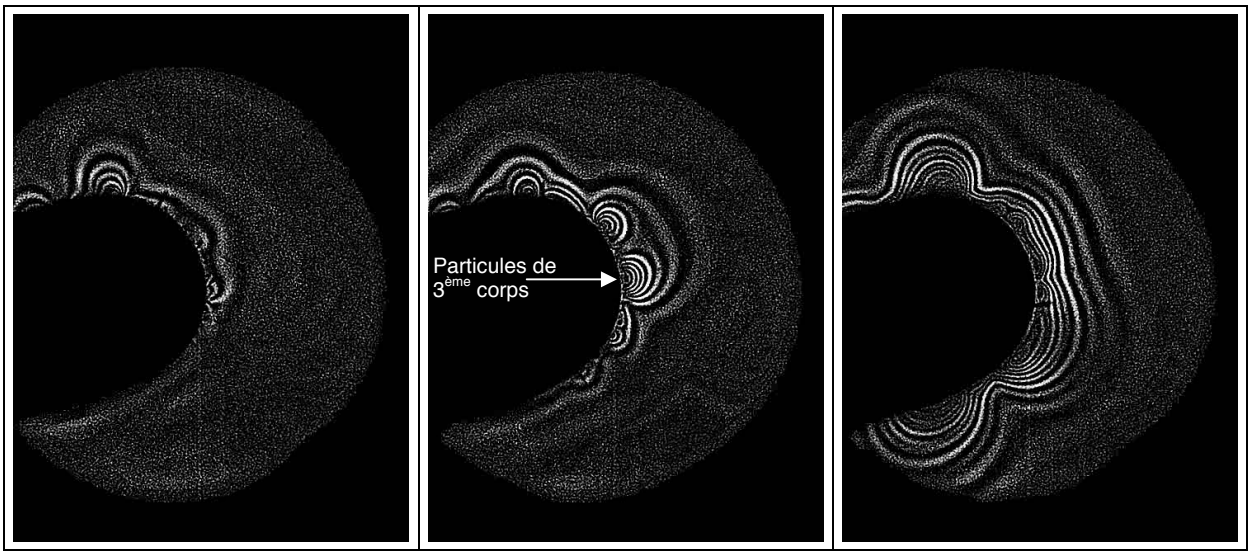


Fig. 1.46 : visualisation du « disque » en photoélasticimétrie par caméra rapide à 20 000 images/sec avec un filtre monochromatique de λ=546 nm (a) état initial, (b) état intermédiaire, (c) état final

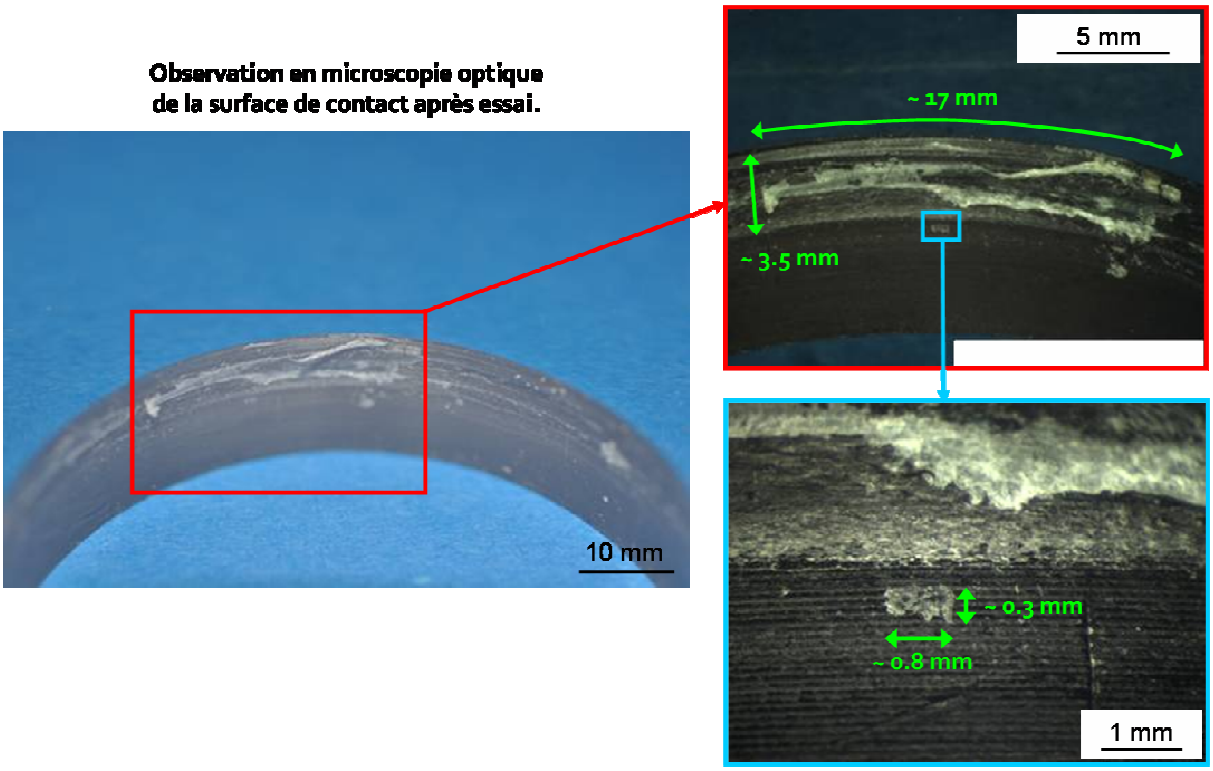


Fig. 1.47 : observation en microscopie optique de la zone de contact après essai.

En fin d'essai, l'alésage du disque a été observé à la loupe binoculaire (cf. Fig. 1.47).

Les particules de troisième corps observées sont de dimension variables. Deux catégories de particules sont observées : les particules de petite dimension et les particules de grande dimension.

Les particules de petite dimension sont d'une taille proche à celles observées sur la figure 1.42 : quelques centaines de µm. Les particules de grande dimension sont d'une taille non négligeable par rapport à la taille du contact : plusieurs mm de largeur et plusieurs dizaines de mm de longueur. Les particules de grande dimension sont la conséquence de l'agglomération des particules de plus petite dimension. Les dimensions des grosses particules de troisième corps, mesurées sur le même principe que présenté sur la de la figure 1.42, ont été introduites dans le modèle Eléments Finis - Eléments Discrets du GT2-GT3. Les résultats obtenus numériquement sont en adéquation avec les résultats expérimentaux (cf. Fig. 1.48).

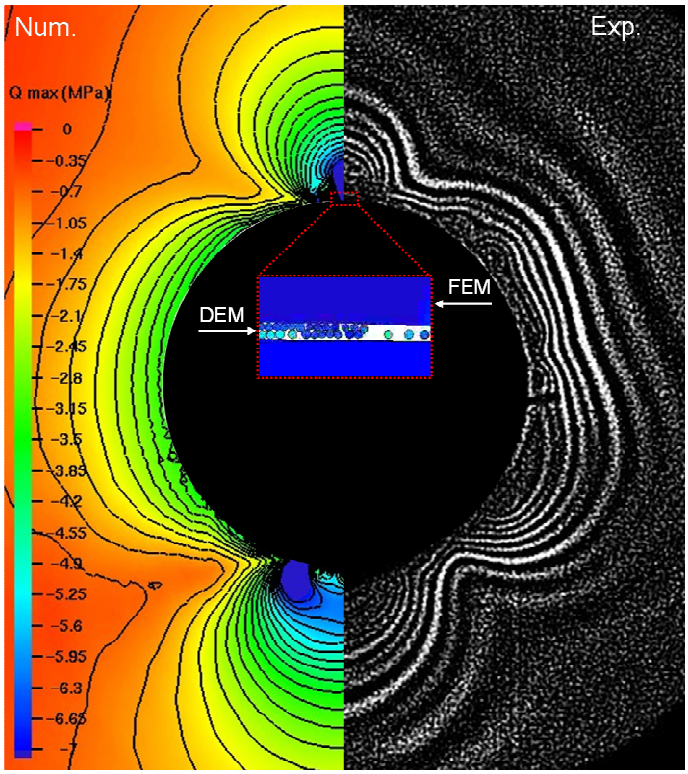


Fig. 1.48: Comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement (GT1) et modélisation couplée Eléments Finis - Eléments Discrets avec troisième corps (GT2 - GT3).

Conclusion : Lorsqu'une quantité importante de particules de troisième corps « visibles » est présente dans le contact, aucune instabilité n'est observable. Les variations du couple résistant du contact (directement liées au couple moteur) sont la conséquence de la formation et de l'évolution des particules de troisième corps dans le contact. L'état de contrainte de cisaillement maximal du disque est lui aussi directement lié à la présence de particules de troisième corps dans le contact. Ces dernières viennent accroître localement et fortement (plus de 10 fois) les contraintes de cisaillement locales dans le disque à proximité du contact. Ces « sur-contraîntes » locales ont été reproduites numériquement en introduisant les dimensions des particules réelles dans un modèle numérique couplant éléments finis et éléments discrets (GT2-GT3).

4.3 Cas particulier : naissance du troisième corps « visible »

Les paragraphes 4.1 et 4.2 ont traité des cas particuliers de l'absence et de la présence notable de troisième corps dans le contact. Ce paragraphe a pour objectif de s'intéresser à la transition de entre l'état d'instabilité sans troisième corps et l'état sans instabilité avec troisième corps.

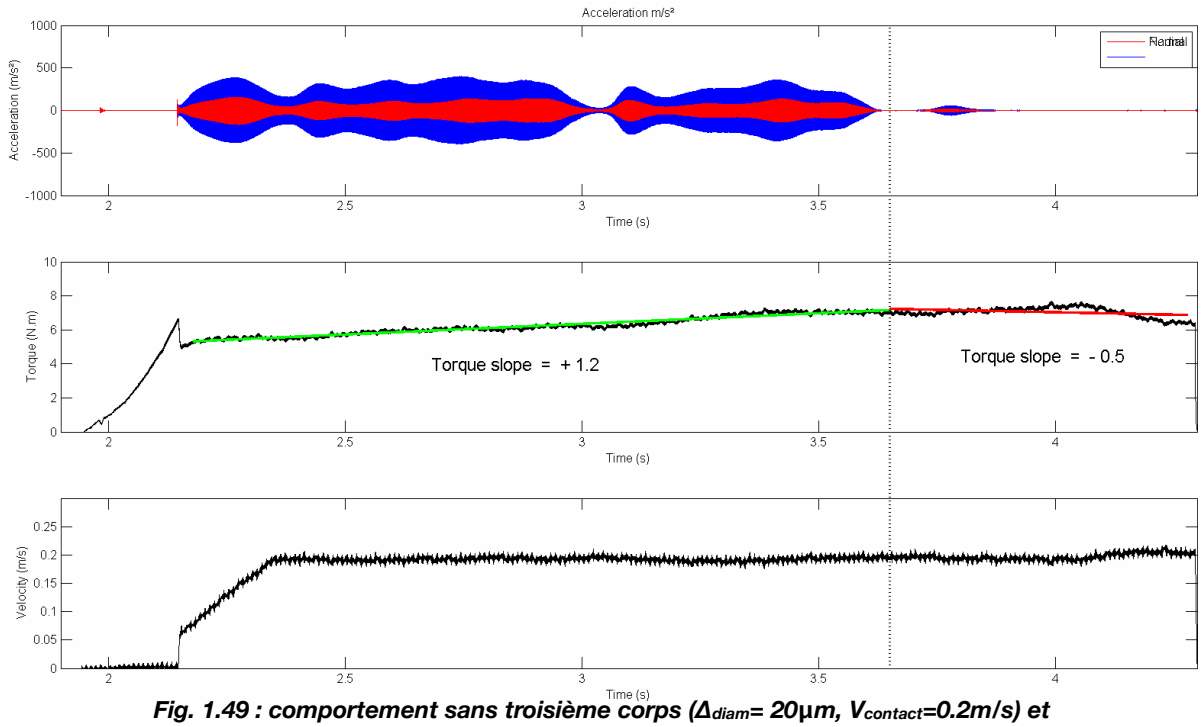


Fig. 1.49 : comportement sans troisième corps (Δ_{diam}= 20µm, $V_{contact}$=0.2m/s) et visualisation des résultats temporels en terme d'accélérations, de couple et de vitesse

Les paramètres d'essai sont une dilatation au diamètre de 20µm, une vitesse de rotation de 0.2m/s. En sus des résultats temporels (cf. Fig. 1.49) et fréquentiels (cf Fig. 1.50) sont présentés les résultats de la visualisation (cf. Fig. 1.37) des contraintes de cisaillement maximales dans le plan du disque par photoélasticimétrie (cf Fig. 1.52) ainsi qu'une visualisation du contact dans le domaine visible (cf Fig. 1.51).

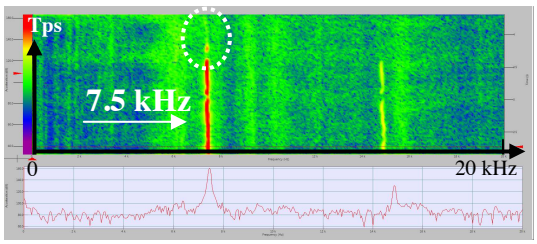
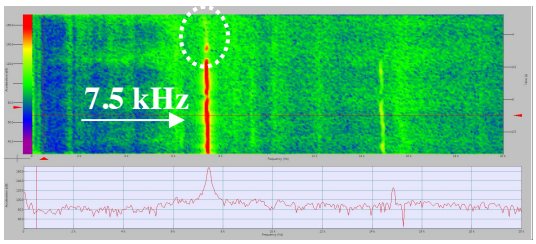
Type / Sens	Accélération **normale** au plan du disque	Accélération **radiale** dans le plan du disque
Essais sans 3ème corps		

Fig. 1.50 : comportement sans troisième corps (Δ_{diam}= 20µm, $V_{contact}$=0.2m/s) et visualisation des résultats fréquentiels en terme d'accélérations normale et radiale

L'évolution temporelle (cf. Fig. 1.49) et fréquentielle (cf. Fig. 1.50) des accélérations normale et radiale traduisent la présence d'instabilités de contact mono-fréquentielles à 7,5kHz dans le plan du disque. Le couple moteur est légèrement croissant avec un coefficient directeur de+1.2Nm/s. Après 1,5 seconde d'essai, les instabilités disparaissent et le couple moteur décroit légèrement avec un coefficient directeur de -0.5N.m.

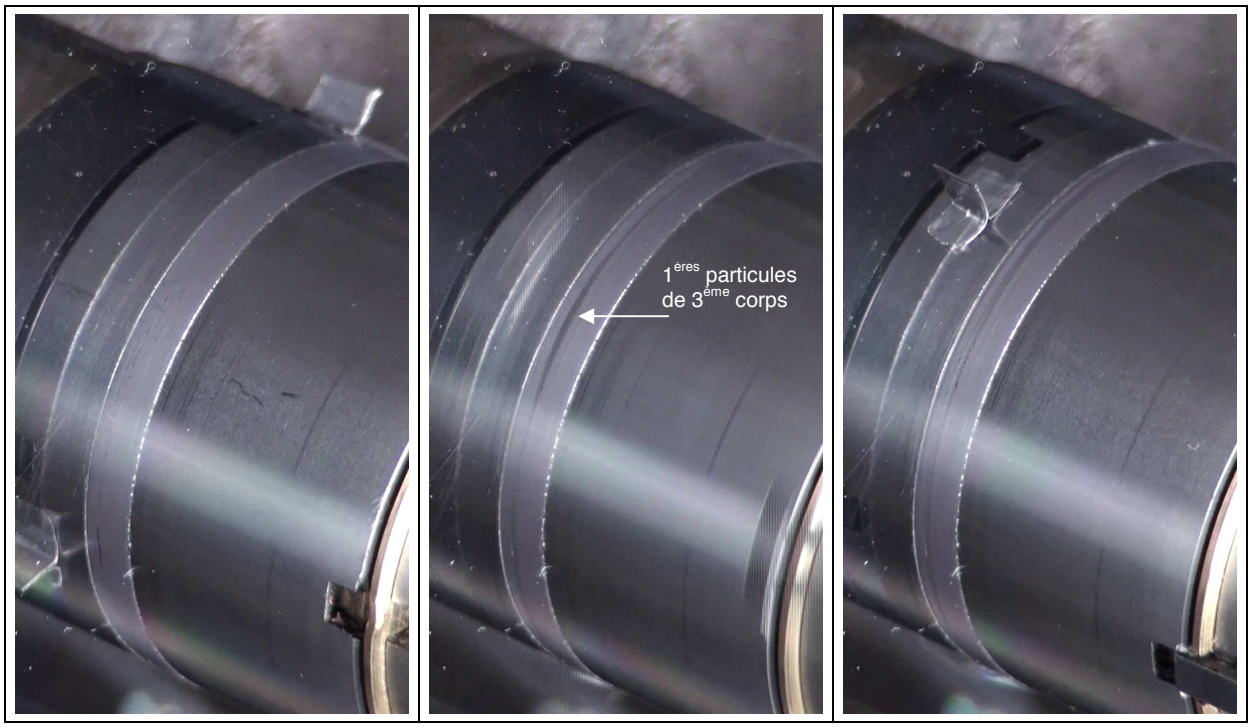


Fig. 1.51 : Visualisation du « contact » par caméra HD à 25 images/sec (a) état initial, (b) état intermédiaire, (c) état final

Cette transition de comportement correspond à l'état intermédiaire de la figure 1.51b, c'est-à- dire à la naissance de la 1ère grosse particule de troisième corps de grande dimension dans le contact. L'état de contrainte de cisaillement maximal dans le

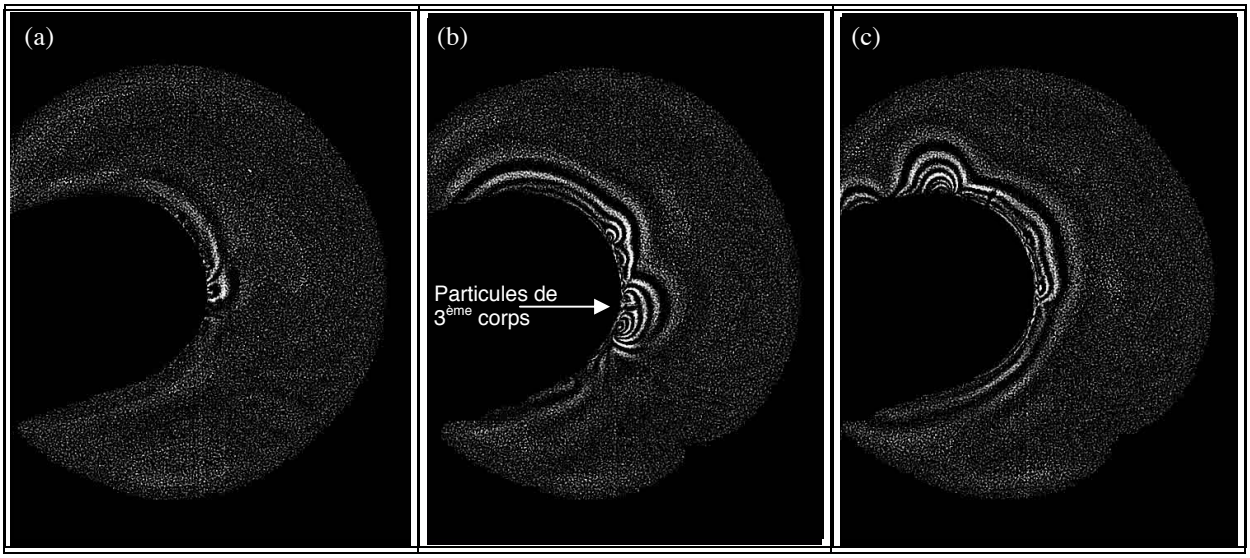


Fig. 1.52 : visualisation du « disque » en photoélasticité par caméra rapide à 20 000 images/sec avec un filtre monochromatique de λ=546 nm (a) état initial, (b) état intermédiaire, (c) état final

disque correspondant à cette transition est présenté sur la figure 1.52. Localement, l'état de contrainte de cisaillement maximal est multiplié par un facteur 2,5 par rapport à l'état initial.

Le dispositif « PhotoTrib » étant asservi en vitesse, l'évolution du couple moteur traduit donc l'évolution du couple résistant à l'échelle du contact. Cette mesure n'est bien entendu pas quantitative mais permet de traduire les tendances fortes de l'essai de ce point de vue.

Au cours de cet essai, le lien entre instabilité de contact et couple résistant au contact est mis en évidence :

- en présence d'instabilité de contact et sans troisième corps «visible», le couple résistant du contact augmente;
- en présence de troisième corps et sans instabilité de contact, le couple résistant du contact diminue.

Généralisation : la figure 1.53 présente une mise en vis-à-vis du coefficient directeur du couple résistant du contact pour l'ensemble des essais réalisés avec la présence ou non d'instabilités de contact. Le comportement du couple résistant mis en évidence dans le paragraphe précédent est généralisable à l'ensemble des essais. Ainsi celui-ci tend à réduire sa croissance voire diminuer lorsqu'il n'y a pas d'instabilité de contact alors qu'il croît plus rapidement en présence de celles-ci.

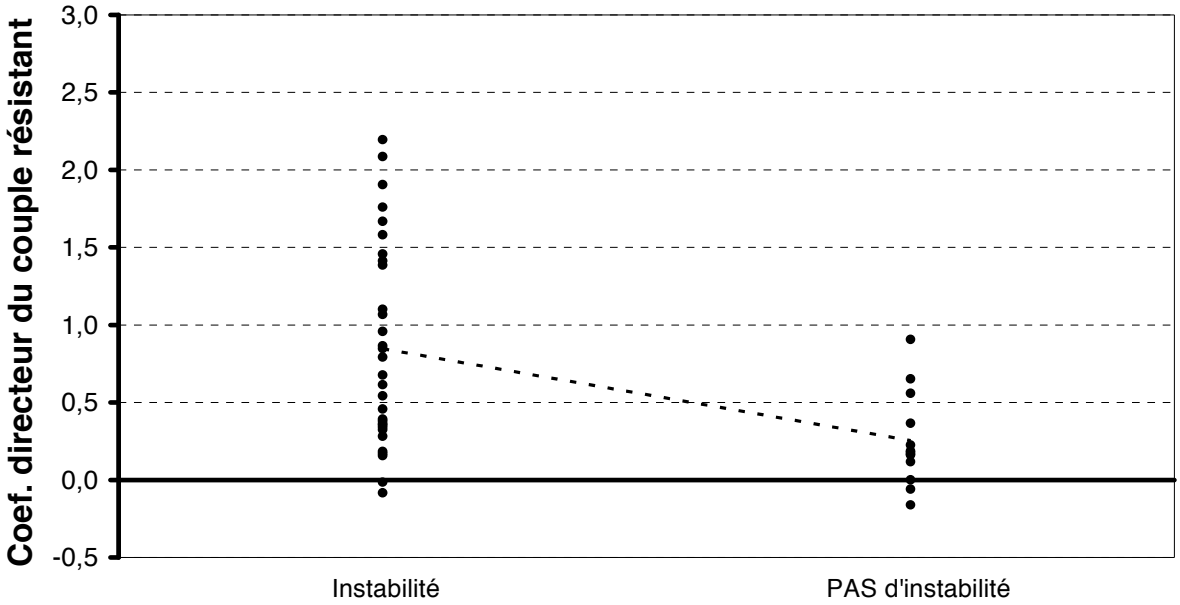


Fig. 1.53 : Coefficient directeur du couple résistant vs. Instabilité de contact (Tous essais et disques confondus)

Conclusion : Une compétition au sein du contact existe entre la formation et l'évolution tant des particules de troisième corps que des instabilités de contact. L'évolution du couple résistant est directement liée à la présence des instabilités de contact.

5 Conclusion

Le dispositif expérimental « PhotoTrib » a été réalisé afin de reproduire tant des instabilités dynamiques de contact que les conditions de formation de particules de troisième corps. Ce dispositif a été validé même si chargement radial mesuré par les capteurs a courant de Foucault diffère sensiblement de la valeur de frettage originellement souhaitée.

Les 82 essais réalisés ont permis de réaliser tant une étude paramétrique sur la sensibilité des instabilités de contact à la dilatation radiale, la vitesse linéaire au contact,.... qu'une étude plus spécifique sur l'interaction entre les instabilités de contact et la couche de troisième corps.

L'étude paramétrique a permis de conclure que, dans la limite de variation des valeur étudiées, il n'existe par d'influence de la dilatation radiale ou de la vitesse linéaire au contact sur les caractéristiques des instabilités de contact tant en fréquence qu'en forme. L'inversion du sens de rotation entre deux essais impose un délai dans la réapparition d' instabilités de contact traduisant une nécessité du contact à « s'adapter ». De même, le nettoyage du troisième corps après un essai avec instabilités de contact impose un délai dans la réapparition des instabilités pour les essais suivants : il est donc nécessaire qu'il y ai une couche de troisième corps dans le contact, même non visible à l'échelle d'observation possible pur «PhotoTrib», afin que les instabilités se produisent.

L'étude plus spécifique sur l'interaction entre instabilités de contact et couche de troisième corps a permis de conclure que les instabilités de contact sans troisième corps « visible » ont pu être reproduite numériquement par le modèle éléments finis utilisé dans le GT2. Lorsque que de nombreuses particules de troisième corps sont « visibles » dans le contact, l'état de contrainte de cisaillement maximal du disque localement augmente fortement (plus de 10 fois) sous l'influence de ces particules. Cette augmentation a pu être reproduite numériquement en introduisant les dimensions des particules réelles dans un modèle couplant Eléments Finis et Eléments discrets développé en lien avec les GT2 et GT3.

Finalement, une compétition entre instabilités de contact et évolution de la couche de troisième corps a été mise en évidence. Outre le maintien ou non des instabilités de contact, cette évolution se traduit aussi sur la tendance haussière ou baissière du couple résistant au contact.

PARTIE 2

GT2 - Modélisation à l'échelle des premier corps

Introduction

L'objectif de se groupe de travail est, d'une part, de coordonner les simulations numériques effectuées à l'échelle des corps en contact (échelle B) et, d'autre part, de gérer le passage de données avec l'échelle de l'interface (échelle C).

Rappel des différentes tâches
Tache 2.1 : *Conception du modèle*. Conception du modèle éléments finis des premiers corps, représentatif du dispositif expérimental défini dans le GT1. L'interaction avec le GT 1 sera nécessaire pour définir à la fois le modèle et en même temps, optimiser le design du dispositif expérimental. Cette interaction sera mené plusieurs fois pendant la durée de la tâche pour une adéquation la pus correcte possible entre les modèles numériques et expérimentaux. **Tache 2.2 : *Analyse préliminaire de validation.*** Analyse dynamique en fréquence et simulations temporelles préliminaires pour valider le modèle et étudier le comportement vibratoire des premiers corps en contact glissant. Analyse du comportement des contraintes locales au contact. La gamme des sollicitations locales (force normale et vitesse relative au contact) sera précisée afin de fournir les conditions limites utilisée à l'échelle C. **Tache 2.3** : ***Analyse paramétrique 1***. Une fois le modèle validé, une analyse paramétrique permettra l'étude des facteurs d'influence sur les résultats obtenus et la comparaison avec les simulations expérimentales. **Tache 2.4** : ***Analyse paramétrique 2***. Une seconde analyse paramétrique sera entamée utilisant des coefficients de frottement obtenu à l'aide de simulations effectuées à l'échelle C. Des comparaisons seront effectuées avec la première analyse et avec l'étude expérimentale.

1 Définition du modèle numérique des premiers corps

La première étape du GT2 est la conception d'un modèle éléments finis représentant les premiers corps utilisés dans le dispositif expérimental défini dans le GT1. L'interaction avec le GT1 est donc nécessaire pour définir à la fois le modèle et pour optimiser le design du dispositif expérimental.

1.1 Cahier des charges pour la modélisation des premiers corps

Le travail de conception du modèle est structuré en deux parties menées en parallèle .

Un modèle numérique non-linéaire est développé afin de reproduire numériquement des vibrations de crissement au travers d'une analyse transitoire. Une approche de dynamique semi-explicite est utilisée: elle propose un traitement du contact frottant à partir de la méthode des multiplicateurs de Lagrange et y associe une formulation explicite de la dynamique (code de calcul PLAST2). Les non-régularités du contact sont donc prises en compte et la simulation numérique dans le domaine temporel permet d'analyser les vibrations du système et le comportement local des contraintes de contact en régime stable ou instable (difficile à mesurer expérimentalement).

En parallèle, un modèle numérique linéaire basé sur la méthode des éléments finis est développé avec la plateforme commerciale ANSYS pour mener une analyse modale du système. Les fréquences et les déformées de crissement (régime instable) sont ainsi liée aux modes du système.

1.2 Géométrie et conditions aux limites

La géométrie et les matériaux des modèles aux éléments finis ont étés acquis à partir du dispositif expérimental développé dans le GT1 et sont synthétisés ci-après. Un disque de rayon intérieur de 180 mm et de rayon extérieur de 41 mm est mis en contact avec un disque d'acier de 41 mm de rayon extérieur. Les propriétés mécaniques du matériau utilisé (Polycarbonate PSM1 - VISHAY) sont les suivantes : un module d'Young de 2500 MPa une masse volumique de 1202 Kg/m^3 et un coefficient de Poisson de 0,38.

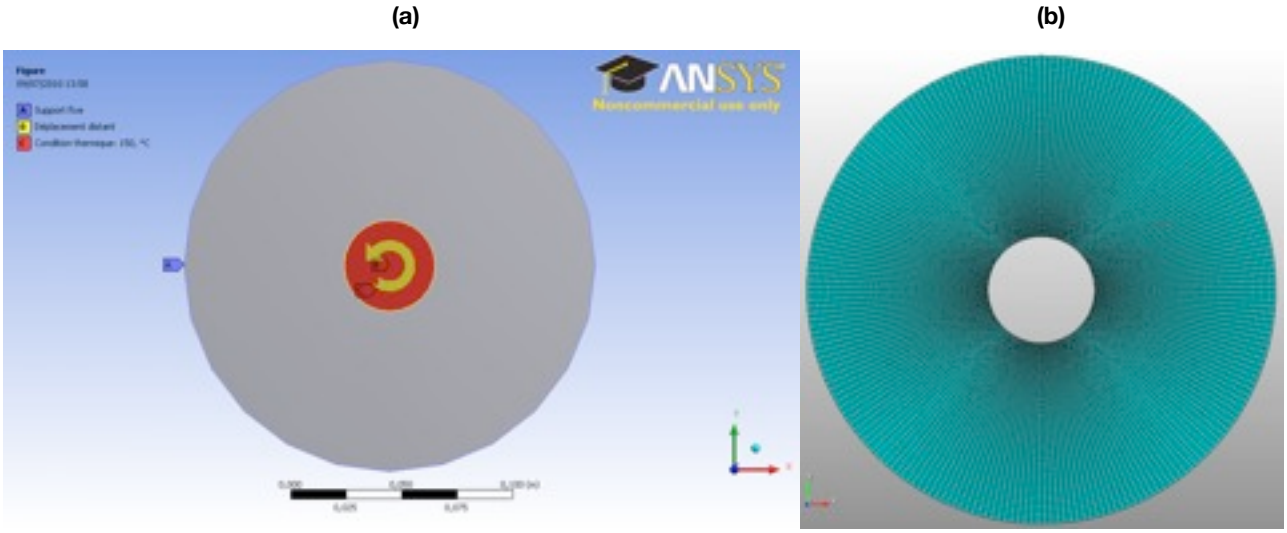


Fig. 2.1 : (a) modèle numérique en 2 dimensions des 1er corps et (b) modèle FEM pour l'analyse transitoire (15400éléments) pour une taille des éléments au contact de 0,5855mm.

Plusieurs interactions entre le GT1 et le GT2 ont permis d'arriver à la définition d'un mécanisme de serrage expérimental (voir GT1) qui puisse être facilement modélisé dans les modèles numériques. Le dispositif de serrage permet un serrage rigide et axi-symétrique du disque en polycarbonate. Concernant les conditions aux limites du modèle numérique, les degrés de liberté des nœuds du rayon extérieur du disque en polycarbonate sont ainsi bloqués; le cylindre intérieur est mis en rotation tandis que le rayon du manchon subit une une expansion de 25 µm. Ainsi, la charge radiale obtenue expérimentale-

ment avec la dilatation du cylindre en acier, est reproduite numériquement pour obtenir la même pression de contact.

2 Analyse transitoire

2.1 Cadre numérique

Pour effectuer une analyse transitoire pertinente une approche de dynamique semi-explicite est utilisée. Le caractère seme-explicite repose sur la combinaison d'une intégration temporelle explicite (bien adaptée pour l'étude de phénomènes physiques rapide) et d'un traitement implicite du contact basé sur une approche par multiplicateurs de Lagrange. La méthode est implémentée dans le code éléments finis PLASTD

Cette méthode permet l'évaluation des efforts normaux et tangents au contact avec possibilité d'adhérence, glissement ou décollement localement. La méthode des multiplicateurs de Lagrange est construite en utilisant les équations du mouvement déterminés à partir du principe du travail virtuel au pas de temps t_n (= ndt), complétée par les conditions cinématiques au contact au temps t_{n+1}(= t_n+dt):

$$\mathbb{M}\ddot{\mathbf{u}}(t_n) + \mathbb{C}\dot{\mathbf{u}}(t_n) + \mathbf{F}^{int}(t_n) + \mathbb{G}^T(t_{n+1})\lambda(t_n) = \mathbf{F}^{ext}(t_n)$$
$$\mathbb{G}(t_{n+1}).(\mathbf{X}(t_n) + \mathbf{u}(t_{n+1}) - \mathbf{u}(t_n)) \leq 0$$

où **λ** est le vecteur des forces de contact agissant sur les noeuds de la surface de contact, **G** la matrice des conditions cinématiques de contact, **X** le vecteur des coordonnées au temps, **M** et **C** respectivement les matrices de masse et d'amortissement, $\mathbf{F}^{ext}$ et $\mathbf{F}^{int}$ les vecteurs de forces internes et externes, **u** et **ü** les vecteurs de vitesse et d'accélération.

La loi de frottement utilisée est une loi de type Coulomb sans régularisation de la contrainte tangentielle par rapport à la composante de vitesse relative tangentielle. Les structures déformables sont maillées avec des éléments cubes de huit nœuds avec trois degrés de liberté par nœud. A part pour les éléments de contact, le maillage des modèles linéaire et non-linéaire est identique.

2.2 Modèle

Le disque extérieur en polycarbonate est décrit par un maillage régulier (pavé) en direction radiale et circonférentielle. Le nombre d'éléments est égal à 15400 et la taille des éléments en contact avec le disque intérieur est de 0,5855 mm. Pour limiter les temps de calcul en régime transitoire et à cause de la grande différence de rigidité des deux matériaux, le cylindre intérieur est modélisé par une surface rigide.

A l'instant t_0=0, une rampe de dilatation radiale est appliquée au cylindre intérieur jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur prédéfinie. Cette dilatation conduit au contact entre le disque en polycarbonate et le manchon rigide et introduction une pression normale au contact entre les deux corps. La vitesse angulaire du disque intérieur, qui dans le dispositif expérimental est pilotée par un moteur électrique, est maintenue constante tout au long de la simulation. L'utilisation d'une rampe de dilatation permet de réduire la réponse dynamique du système lors du contact initial entre les deux disques. Les nœuds appartenant au rayon extérieur du disque en polycarbonate sont bloqués selon les axes x et y.

2.3 Analyse de convergence

Une analyse de convergence du modèle numérique a été effectuée à partir du maillage présenté sur la figure 3.1b. Même si la taille des éléments a été choisi très fine pour assurer la convergence, des premières simulations avec une discrétisation temporelle différente (plus petits que la valeur du temps critique) montrent une non convergence de la solution.

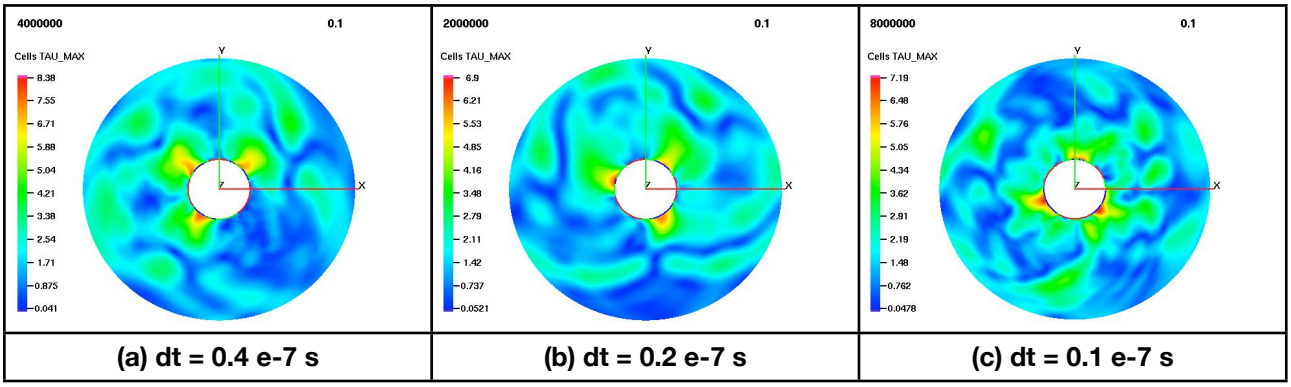


Fig. 2.2 : Contrainte de cisaillement maximale calculée pour 3 différents pas de temps.

La figure 2.2 montre la contrainte de cisaillement maximale calculée au même temps pour trois différentes valeurs du temps de discrétisation. Les valeurs et la distribution changent avec le temps de discrétisation.

Pour vérifier l'effet de la dimension des éléments et, en particulier, leur dimension au contact, différentes simulations avec différents maillages ont été effectuées. Le résultat sur la contrainte de cisaillement maximale est montré sur les figures 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 et 2.7.

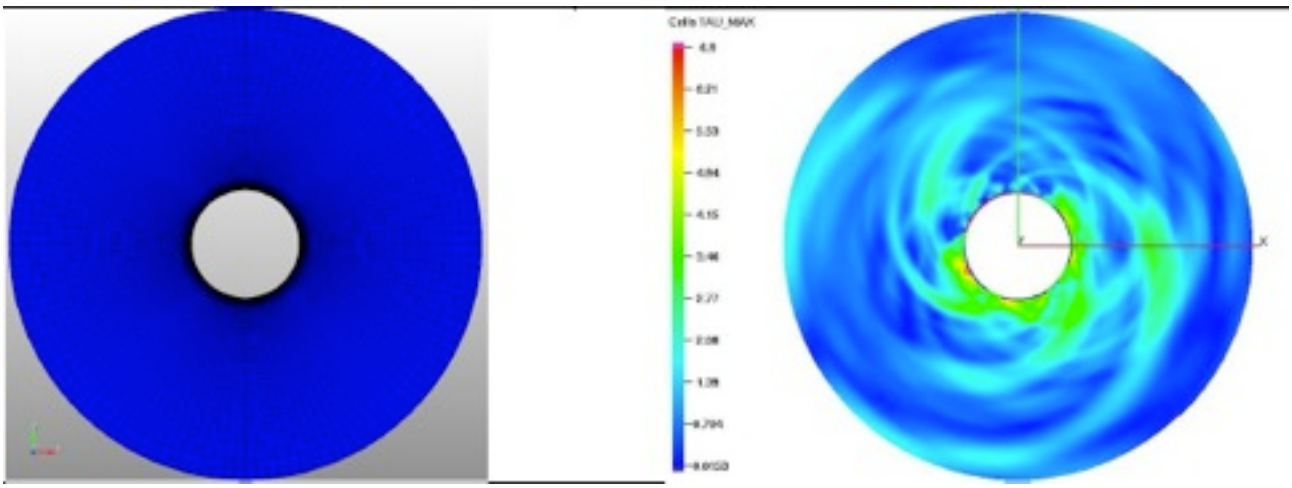


Fig. 2.3 : Maillage et contrainte de cisaillement maximale calculée avec un modèle à 10112éléments et 0.25mm de largeur des éléments au contact.

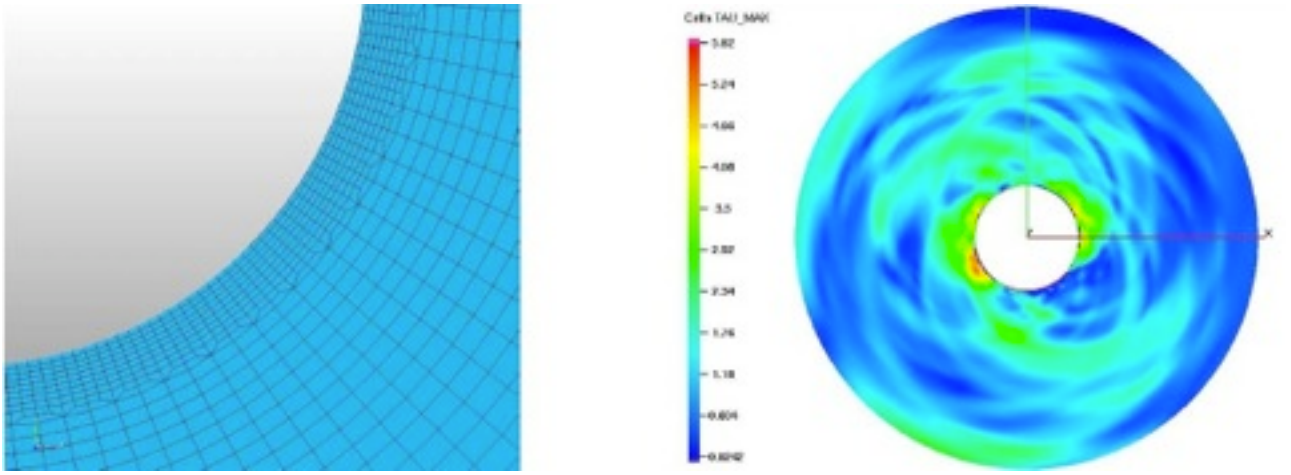


Fig. 2.4 : Maillage et contrainte de cisaillement maximale calculée avec un modèle à 5940éléments et 0.5855 mm de largeur des éléments au contact.

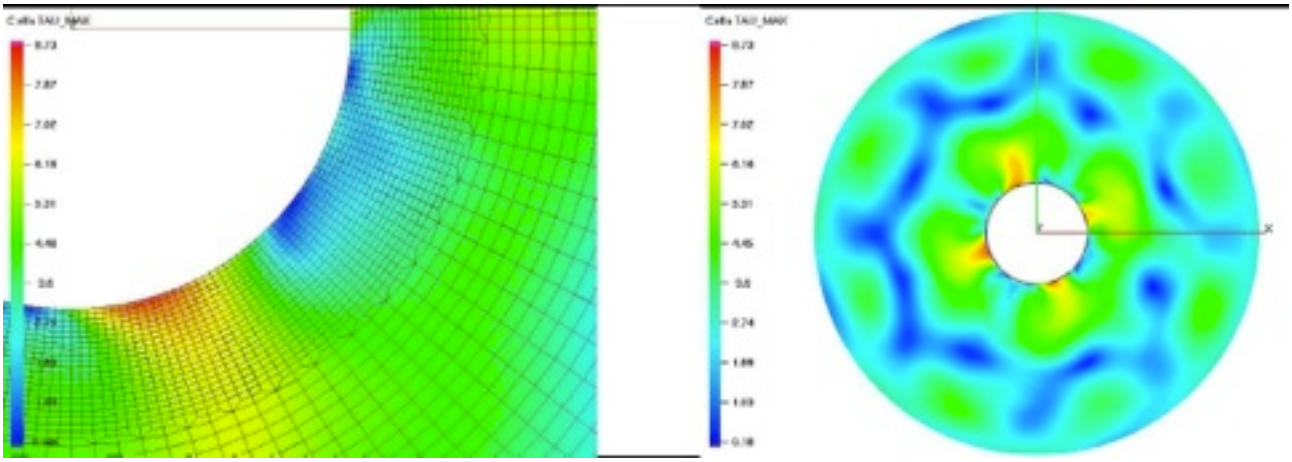


Fig. 2.5 : Maillage et contrainte de cisaillement maximale calculée avec un modèle à 5940éléments et 0.5855 mm de largeur des éléments au contact.

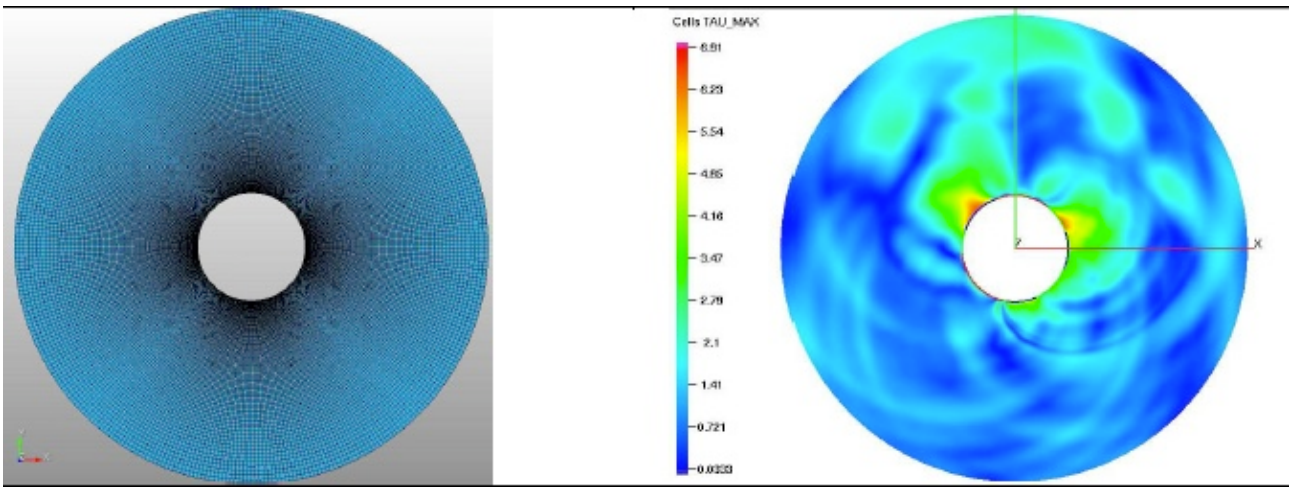


Fig. 2.6 Maillage et contrainte de cisaillement maximale calculée avec un modèle à 31500éléments et 0.37 mm de largeur des éléments au contact.

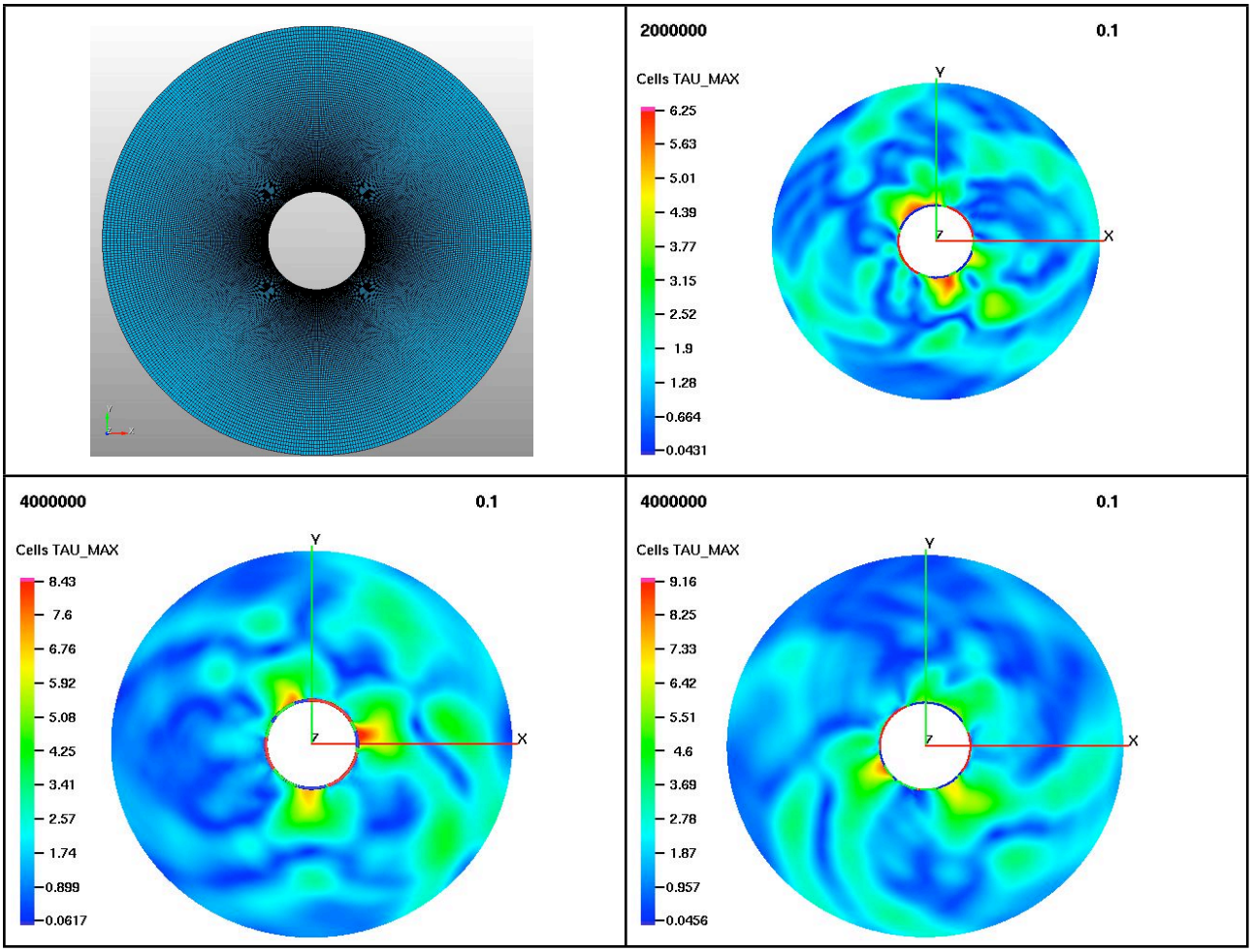
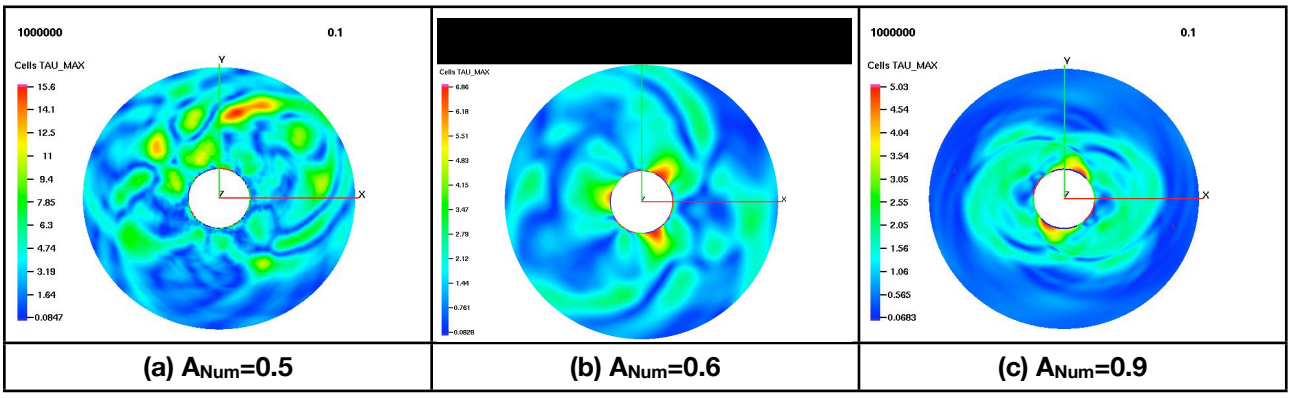


Fig. 2.7 : Maillage et contraintes de cisaillement maximales calculées avec un modèle à 50000éléments dont des éléments au contact de largeur 0.26 mm.pour 3 pas de temps différents ((a) 4e-7s, (b) 2e-7s et (c) 1e-7s)

La figure 2.7 montre aussi l'effet de la variation de la résolution temporelle sur la solution obtenue avec le modèle possédant le maillage le plus fin: le modèle ne converge pas avec les valeurs des paramètres utilisés.

Une analyse a alors été effectuée pour étudier l'influence de l'amortissement numérique et de l'amortissement structurelle sur la convergence de la solution. En effet, pendant la simulation numérique, de l'énergie est introduit dans le système par le disque rigide en rotation et des valeurs trop faibles de l'amortissement peuvent être à la base de la non-convergence de la simulation.



(a) A_{Num}=0.5	(b) A_{Num}=0.6	(c) A_{Num}=0.9

Fig. 2.8 : Contrainte de cisaillement maximale calculée pour 3 valeurs d'amortissement numérique (A_{Num}).

En premier lieu l'amortissement numérique pour l'intégration temporelle a été modifié. La figure 2.8 montre la contrainte de cisaillement maximale calculée pour trois différents valeurs de l'amortissement numérique.

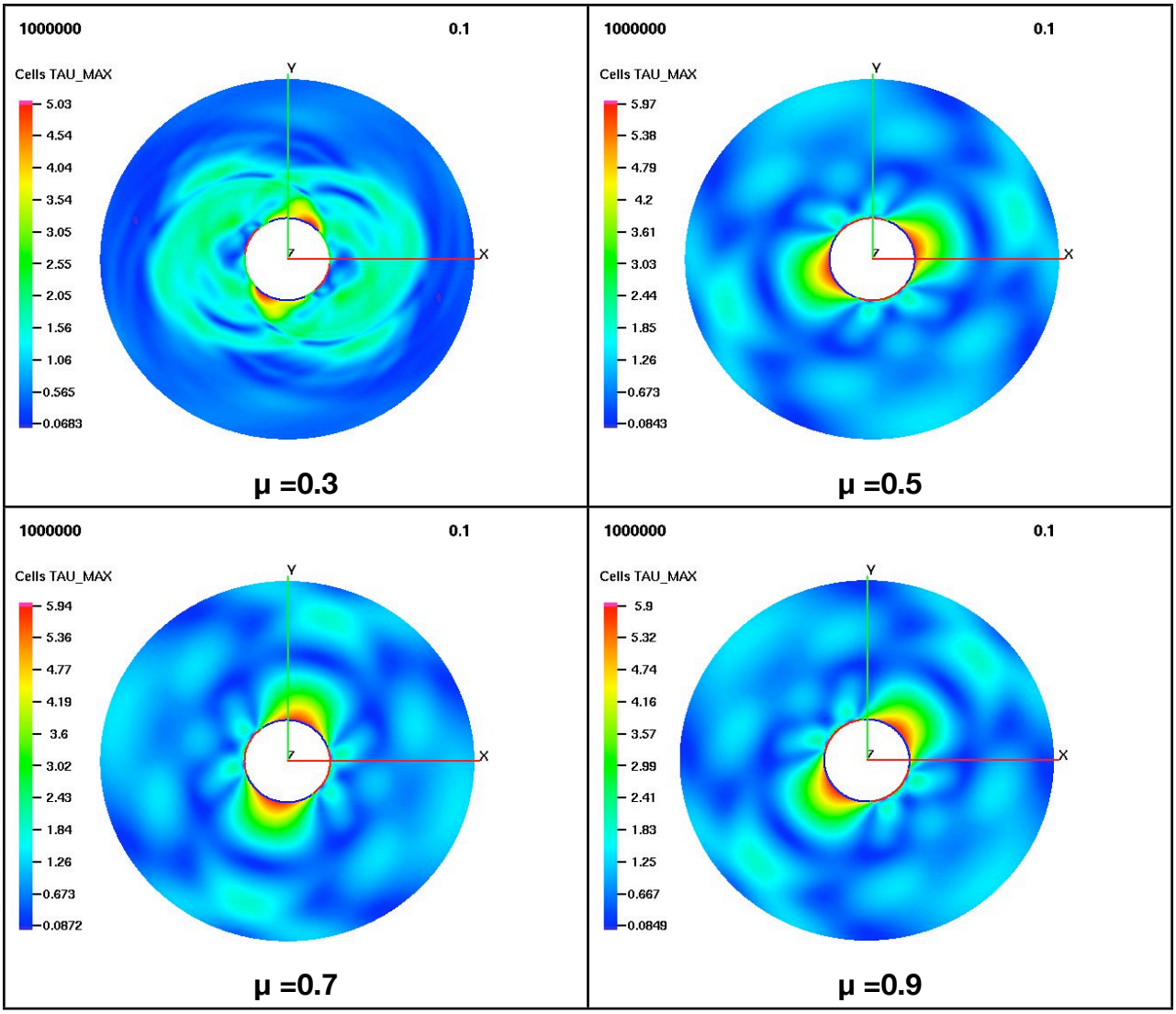
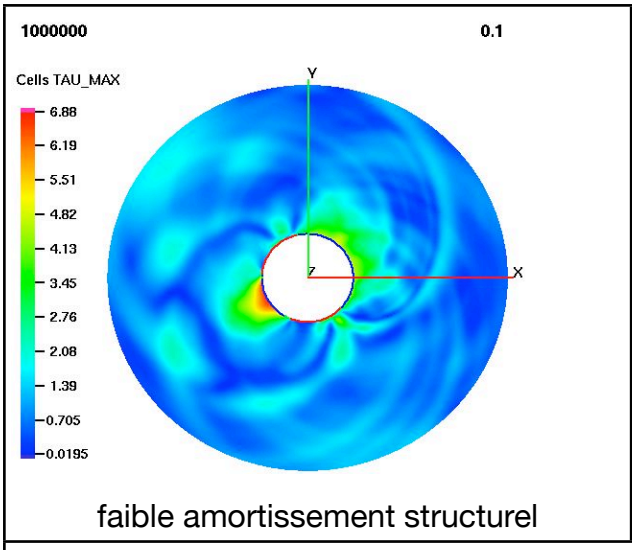


Fig. 2.9 : contraintes de cisaillement maximales calculées pour quatre valeurs différentes du coefficient de frottement (l'amortissement numérique est bloqué à 0.9).

L'amortissement modifie évidement les résultats de simulation pouvant même aller jusqu'à amortir les vibrations du système pour une valeur de 0.9. Si l'énergie introduite dans le système augmente, en augmentant le coefficient de frottement (figure 2.9), les oscillations du système ré-apparaissent et la convergence en maillage peut être obtenue.

Toutefois, même si l'amortissement numérique peut être utilisé pour obtenir la convergence, l'introduction d'un tel amortissement n'est pas acceptable pour la simulation de phénomènes dynamique où le rôle de l'amortissement est fondamental dans la détermination de la réponse du système. Une approche correcte nécessite la prise en compte de l'amortissement structurel du système, amortissement ayant un sens plus réel que le simple amortissement numérique. La figure 2.10 montre qu'une variation de l'amortissement structurelle peut stabiliser le système. Pour cela une analyse expérimentale de l'amortissement structurel est nécessaire pour introduire dans le modèle numérique l'amortissement structurel réel.



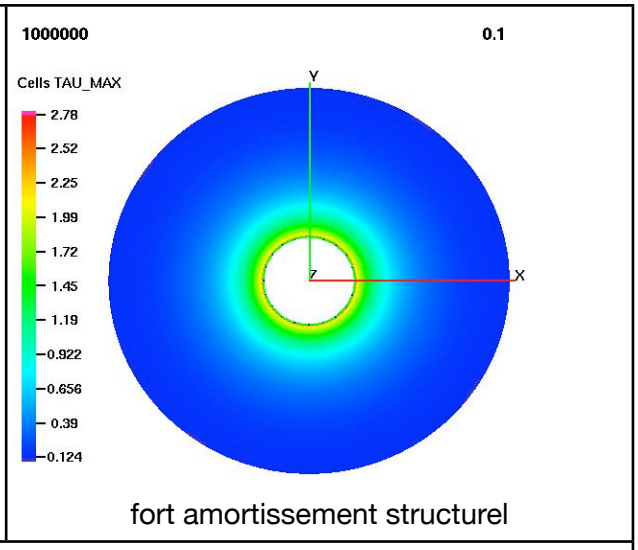


Fig. 2.10 : contrainte de cisaillement maximale calculée avec deux valeurs différentes de l'amortissement structurel ; une valeurélevée de l'amortissement stabilise complètement le système (droite).

2.3 Mesure des coefficients d'amortissement

L'amortissement structurel est un paramètre fondamental pour l'étude des instabilités dynamiques générées par les contacts frottant. Une valeur différente de l'amortissement peut complètement modifier la réponse dynamique du système, jusqu'à complètement éliminer les éventuelles instabilités. Une quantification fiable de l'amortissement est donc nécessaire. Pour introduire correctement l'amortissement structurel du matériel utilisé dans l'expérimentation, des tests en dynamique ont étés effectués sur le disque en polycarbonate. Le disque a été suspendu et excité avec un pot vibrant, et sa réponse dynamique a été mesurée avec un accéléromètre. La figure 3.11 montre la réponse en fréquence du disque.

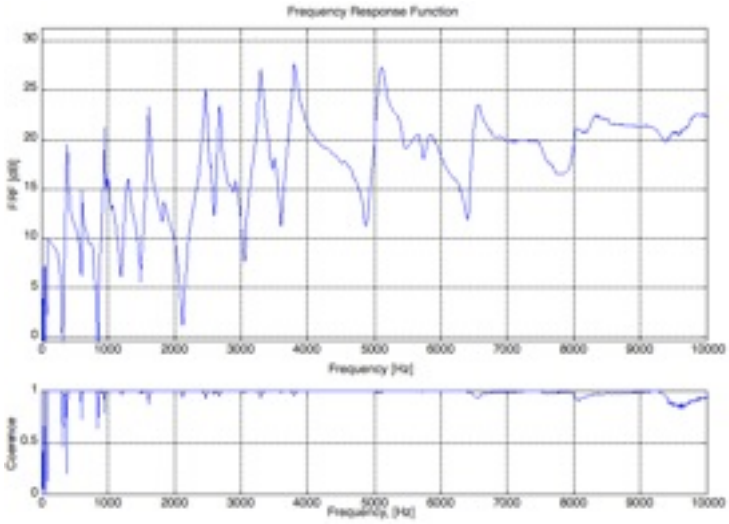


Figure 3.11: Réponse en fréquence du disque mesurée au point d'excitation.

Ensuite, le coefficient d'amortissement modale a été calculé pour chaque mode dans le rang de fréquence considéré, via la méthode « Half power». La figure 3.12–a et 3.12-b montrent respectivement le calcul de l'amortissement modale et le Kennedy-Pancu graph pour le mode à 3804 Hz.

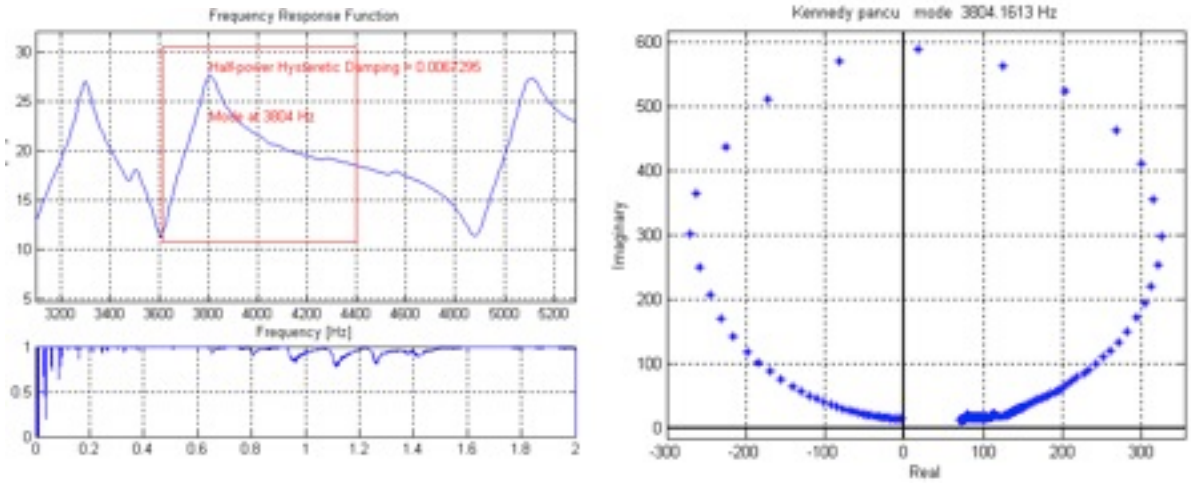


Fig. 3.12: a) amortissement modal et b) «Kennedy-Pancu graph» pour le mode à 3804 Hz.

Une fois les coefficients d'amortissement modaux calculés, l'amortissement doit être introduit dans le modèle aux éléments finis. Une des rares, mais néanmoins efficaces, méthodes pour la modélisation de l'amortissement est la loi de Rayleigh.

D'un point de vue équation de la dynamique, l'amortissement l'amortissement est représenté via la matrice **C**. Selon la loi de Rayleigh, cette matrice peut s'écrire :

$$\mathbb{C} = \alpha_R \mathbb{M} + \beta_R \mathbb{K}.$$

L'amortissement structural mesuré expérimentalement peut alors être écrit :

$$\zeta = \frac{1}{2}(\frac{\alpha_R}{\omega} + \beta_R.\omega)$$

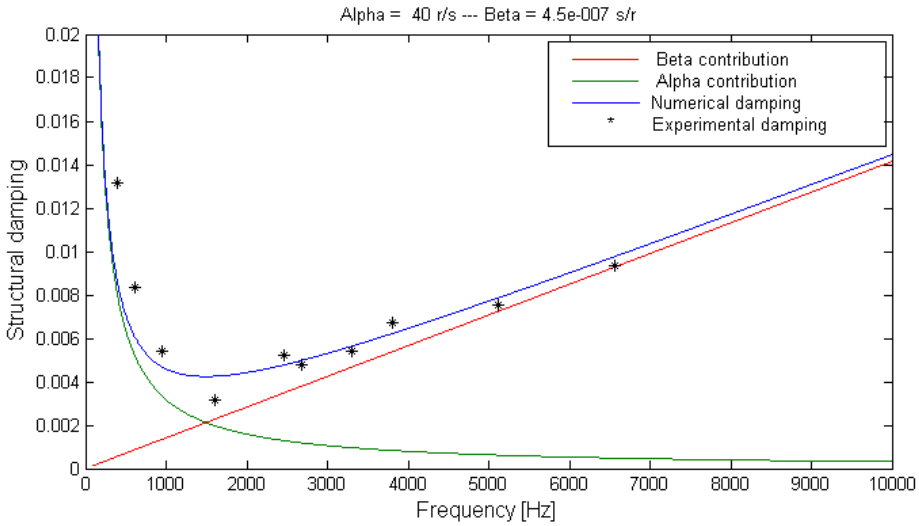


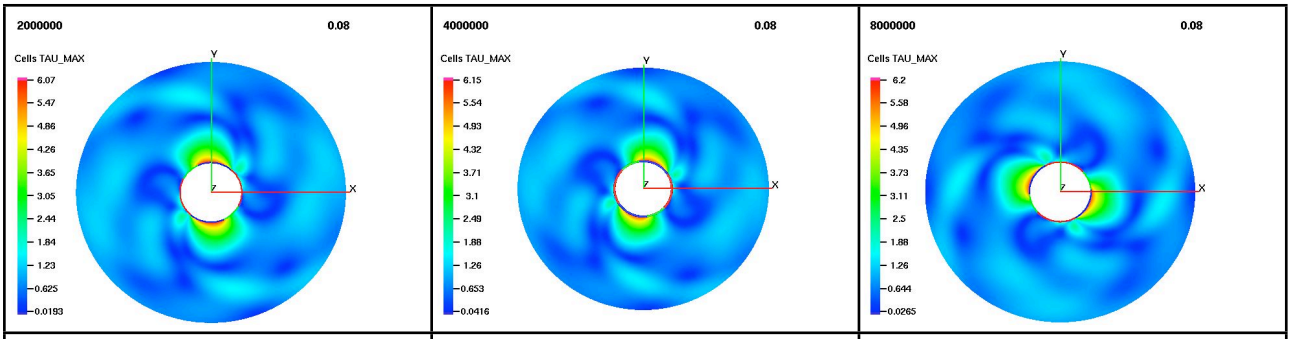
Fig. 3.13 : Amortissement modal calculé expérimentalement (étoiles), et amortissement numérique (courbe bleu) obtenu avec la loi de Rayleigh.

Les coefficients de Rayleigh, α_R et β_R, contribuent différemment à l'évolution de l'amortissement structurel en fonction de la fréquence (cf. Fig. 2.13). Si β_R contribue à l'amortissement global pour les hautes fréquences (courbe rouge sur la figure 2.13), α_R contribue à l'amortissement aux basses fréquences (courbe verte sur la figure 2.13). Pour déterminer les valeur de α_R et β_R à introduire dans le modèle, l'amortissement modal a été calculé à partir des mesures expérimentales pour chaque mode (étoiles noires sur la figure 2.13). Ensuite les valeurs de α_R et β_R ont été optimisés pour suivre l'allure en fréquence de l'amortissement structurel (α_R =40 r/s ; β_R = 4.5e-7 s/r). La courbe bleue représente l'amortissement numérique résultant.

2.4 Instabilités de crissement

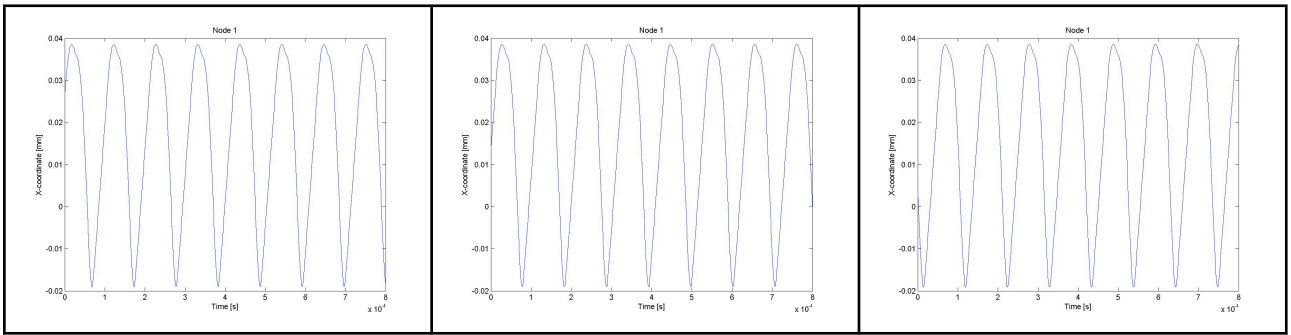
Une fois les coefficients de Rayleigh calculés afin d'introduire l'amortissement structurel mesuré expérimentalement, la simulation numérique à été effectuée pour trois maillages différents afin de vérifier la convergence du modèle numérique et analyser le comportement dynamique du système.

L'instabilité dynamique, caractérisée par la vibration harmonique du système, est reproduite. Les résultats de la contrainte de cisaillement maximale sont montrés sur la figure 2.14 ; le même niveau et la même distribution des contraintes, donnée par la déformée de vibration du disque, sont calculés.



(a) Ne = 9020 . ; L = 0.5855 mm	(b) Ne = 15400; L = 0.5855 mm	(c) Ne = 50000; L = 0.26 mm

Fig. 3.14: contraintes de cisaillement maximales calculées pour trois maillages différents avec un amortissement structurel calculé expérimentalement (L est la dimension des éléments au contact).



(a) Ne = 9020 . ; L = 0.5855 mm	(b) Ne = 15400; L = 0.5855 mm	(c) Ne = 50000; L = 0.26 mm

Fig. 3.15:évolution de la coordonnée suivant X d'un nœud du maillage pour trois maillages différents avec un amortissement structurel calculé expérimentalement.

La figure 2.15 montre l'allure temporelle de la coordonnée suivant X d'un nœud du maillage du disque : les mêmes niveaux de vibration ainsi que la même fréquence de vi-

bration sont obtenus avec les trois maillages. La convergence du modèle transitoire est donc vérifiée avec l'introduction de l'amortissement structurel calculé expérimentalement.

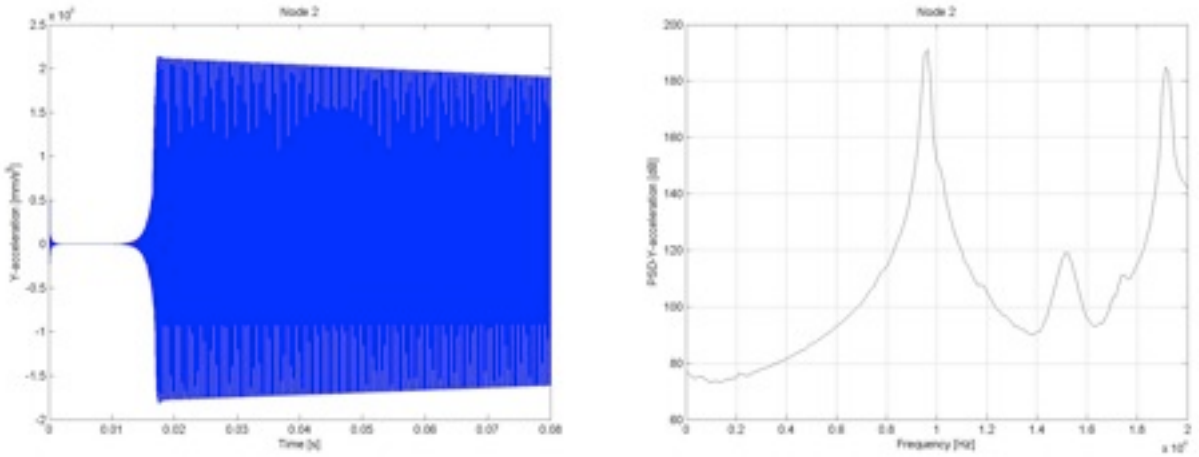


Fig. 3.16 : composante suivant Y de l'accélération d'un nœud du disque (gauche) et PSD de l'accélération d'un nœud du disque ; instabilité à 9500 Hz (droite).

Les vibrations du système, montrées sur le graphe de gauche de la figure 2.16, ont l'allure caractéristique d'une instabilité de crissement, avec une augmentation exponentielle de l'amplitude jusqu'au cycle limite de vibration. Le graphe de droite de la figure 2.16 montre la densité spectrale en fréquence (PSD – Power Spectral Density) de l'accélération. La vibration du système est caractérisée par une harmonique principale, comme dans le cas du crissement ; un mode du système est excité par le contact frottant entre les deux disques.

3 Analyse modale

3.1 Dynamique du système

L'analyse temporelle développée avec le modèle FEM non-linéaire montre une vibration harmonique du système, avec une déformée de vibration bien définie. Ce comportement est du à l'excitation d'un mode de vibration du système qui devient instable à cause de la présence du frottement. Afin de décrire ce phénomène et caractériser le mode de vibration excité par les forces de frottement, une analyse modale du système est conduite avec le code commercial ANSYS.

Une linéarisation du modèle est nécessaire pour effectuer l'analyse modale du système; les éléments de contact non-linéaires sont donc remplacés par des éléments linéaires introduisant une rigidité dans les directions normale et tangentielle au contact.

Toutefois, dans le but d'analyser le comportement dynamique du système pendant la rotation du disque, une analyse modale précontrainte est nécessaire : dans une premiere étape une analyse statique est développée pour simuler la dilatation du disque intérieur, et pour introduire l'effet de la rotation du disque intérieur ; une fois calculée la position d'équilibre glissante, l'analyse modale est effectuée sur le modèle précontraint.

Les conditions aux limites du modèle sont les même que celles utilisées pour l'analyse temporelle, avec le rayon extérieur du disque en polycarbonate bloqué, et la

même dilatation radiale du disque intérieur. Une fois prise la rotation en compte via l'analyse statique précontrainte, l'analyse modale est effectuée sur le système en condition d'équilibre glissant.

La figure 2.17 montre les modes de vibration calculés sur le disque en conditions précontrainte. Il faut souligner que la fréquence et la déformée de chaque mode dépendent fortement de la rigidité au contact entre les deux disques.

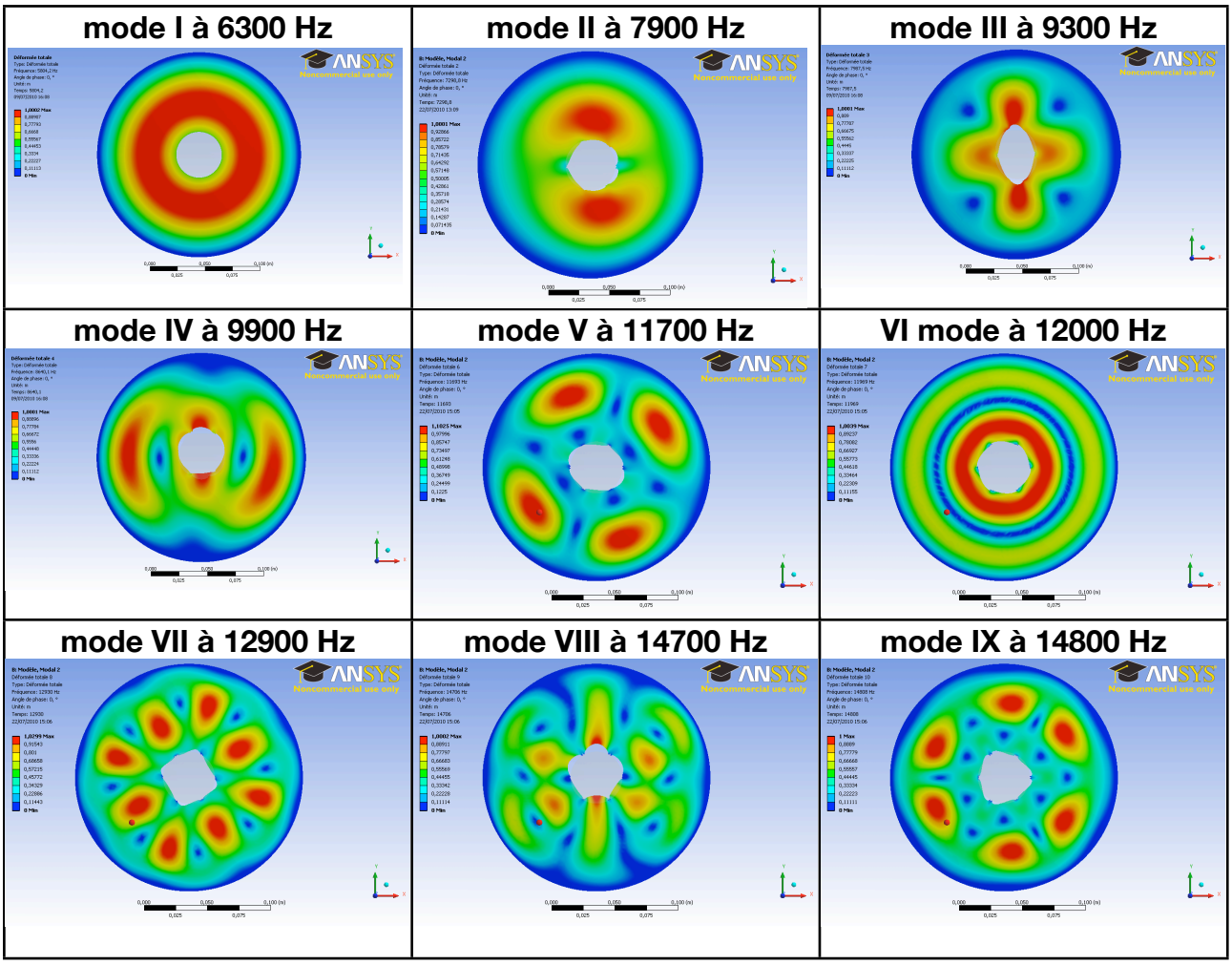


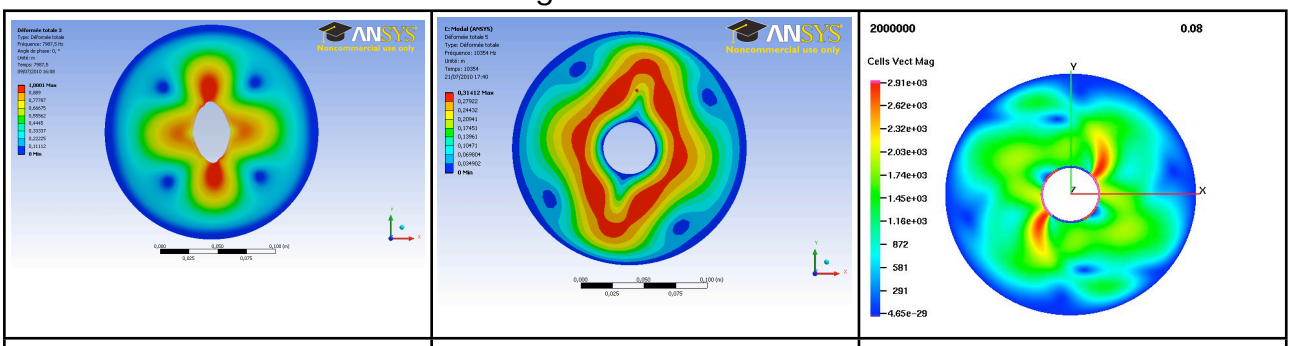
Fig. 2.17: modes de vibration du système calculés avec une analyse modale précontrainte.

4 Comparaison et validation des modèles

4.1 Comparaison des modèles numériques

La comparaison entre l'analyse temporelle effectuée avec le modèle non-linéaire et l'analyse modale précontrainte effectuée avec le modèle linéaire permet l'individuation du mode de vibration excité par les forces de frottement. Dans les simulations présentées dans la section 2.4 une vibration harmonique à 9500 Hz est calculée. Cette fréquence correspond au mode III de vibration calculée via l'analyse modale. La figure 2.18 montre une comparaison entre la déformée du III mode de vibration et la distribution des vitesses calculée sur le disque pendant la simulation temporelle montre en section 2.4. Le mode III a été calculé avec l'analyse précontrainte (Figure 2.18a) et avec le rayon intérieur du dis-

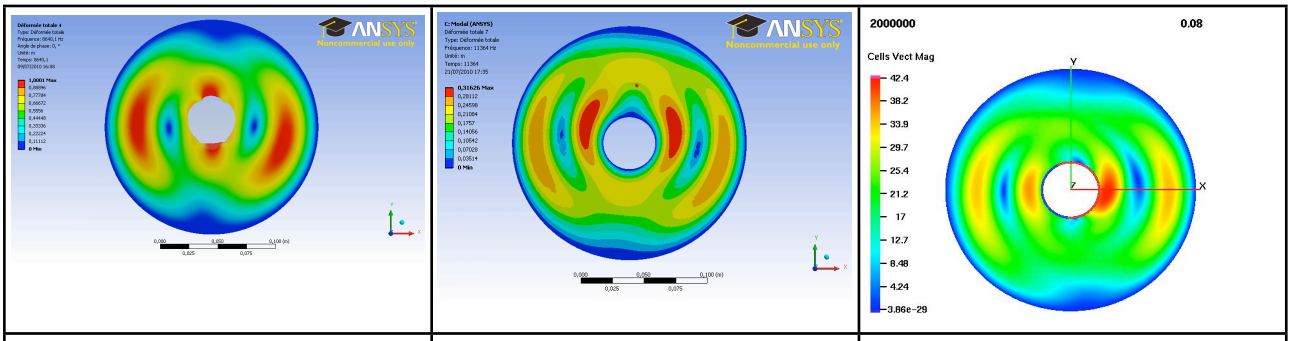
que bloqué (Figure 2.18c), pour montrer la gamme de variation de la fréquence et la variation de la déformé en fonction de la rigidité au contact.



(a) mode III à 9300 Hz	(b) mode III à 10300 Hz	(c) Instabilité à 9500 Hz

Fig. 2.18: déformée du mode III de vibration du disque avec analyse précontrainte (a) et avec rayon intérieur bloqué (b) et distribution des vitesses calculée sur le disque pendant la simulation temporelle montre en section 2.4.

Pour effectuer une comparaison entre les résultats numérique et l'expérimentation, la vitesse de rotation du disque intérieur a été diminuée pour effectuer une analyse temporelle ultérieure (voir section 4.2). En changeant les conditions aux limites (vitesse de glissement), la réponse dynamique du système change, et une fréquence de crissement différente est obtenue à 10800 Hz.



(a) mode IV à 9900 Hz	(b) mode IV à 11300 Hz	(c) Instabilité à 9500 Hz

Fig. 3.19: déformée du mode III de vibration du disque avec analyse précontrainte (a) et avec rayon intérieur bloqué (b) et distribution des vitesses calculée sur le disque pendant la simulation temporelle montre en section 4.2.

La figure 2.19 montre la comparaison entre la déformée du mode IV de vibration du système et la distribution de vitesses calculée avec la nouvelle vitesse de vibration. La comparaison entre les déformations obtenues avec les deux modèles montre la cohérence des résultats et permet l'interprétation du comportement dynamique du système pendant l'instabilité. La comparaison entre les déformées et les fréquences montre aussi une sous estimation de la rigidité au contact du modèle précontraint.

4.2 Validation expérimental

Des interactions entre le GT1 et le GT2 ont conduit à la définition d'une vitesse optimale de rotation du cylindre intérieur de 10 tr/min. Cette réduction de la vitesse de rotation a été décidée pour avoir un temps expérimental de crissement suffisamment élevés,

avant que la formation de troisième corps empêche les vibrations. De plus, une vitesse trop réduite aurait augmenté le temps de simulation.

Pour vérifier expérimentalement les simulations numériques, la simulation temporelle a été effectuée avec la même vitesse de rotation expérimentale, et l'amplitude des vibrations expérimentales et numériques a été comparée. En changeant la vitesse de rotation, les conditions aux limites changent, en particulier à l'interface entre le deux cylindre. La simulation temporelle montre une instabilité à 10800 Hz.

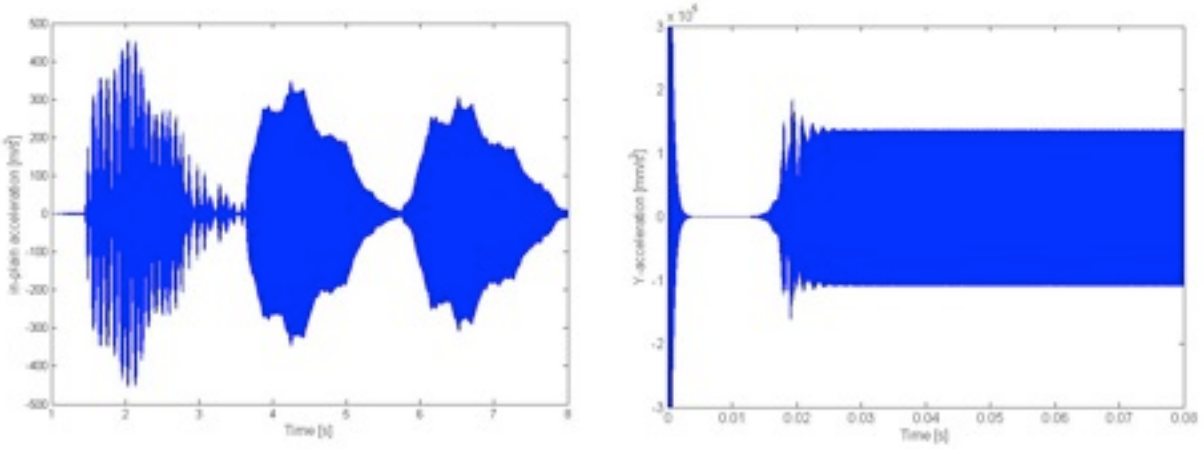


Fig. 2.20 : comparaison entre l'accélération mesurée expérimentalement (gauche) et de l'accélération d'un nœud du disque calculée numériquement, pour une vitesse de rotation du disque intérieurégale à 10 tour per minute.

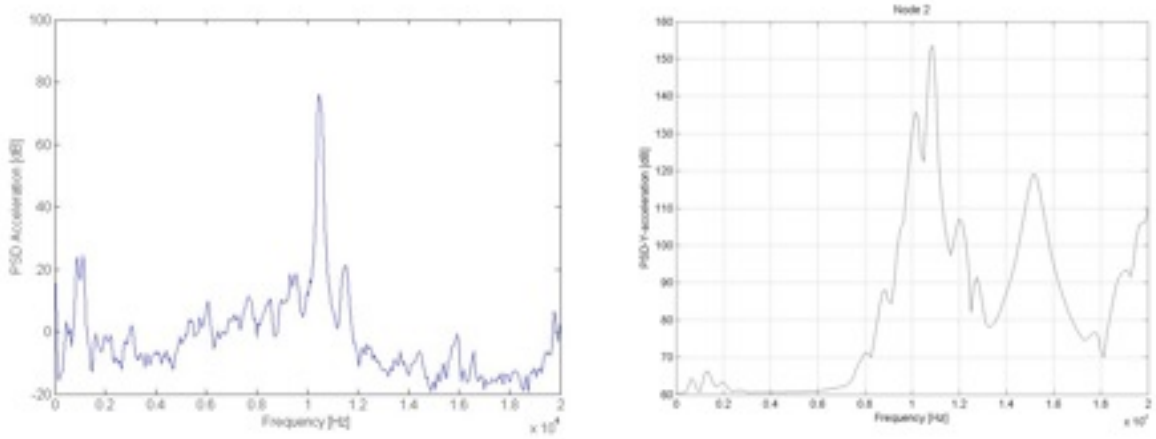


Fig. 2.21: comparaison entre la PSD de l'accélération mesurée expérimentalement (gauche) et de l'accélération d'un nœud du disque calculé numériquement, pour une vitesse de rotation du disque intérieur égale à 10 tour par minute.

Les figures 2.20 et 2.21 montrent une comparaison entre l'accélération *in-plain* mesurée sur le disque et l'accélération *in-plain* calculée avec le simulation numérique temporelle. L'allure, caractérisée par une croissance exponentielle jusqu'à un cycle limite, est visible ; le même niveau d'oscillations en cycle limite (environ 200 m/s^2) et la même fréquence (environ 11000 Hz) sont calculés et mesurés. A cause de l'impossibilité d'avoir une parfaite symétrie dans le dispositif expérimental, le crissement mesuré n'atteint pas une condition stable, mais une succession d'apparition et de disparition du crissement

est rencontré en fonction de la rotation du disque intérieur. En effet, l'occurrence du crissement est très sensible à la variation des conditions aux contours.

Cette comparaison a été effectuée avec les mesures obtenues avec l'ancienne méthode de blocage du disque en polycarbonate.

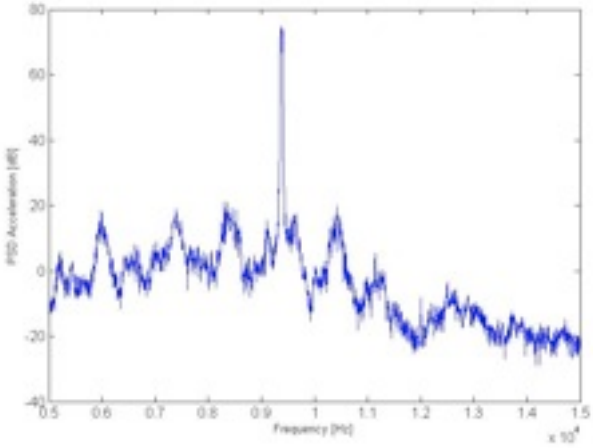


Figure 2.22: PSD de l'accélération mesurée pendant une instabilité de crissement à 9400 Hz.

En changeant les conditions au contour pendant les tests expérimentaux, d'autre fréquences de crissement peuvent être obtenues. La Figure 2.22 montre la PDS de l'accélération *in-plain* mesurée pendant un crissement à 9400 Hz, qui correspond à l'instabilité présentée dans la section 2.4.

Conclusion

En conclusion du GT2, le bilan suivant peut-être réalisé. Les modèles numériques de premiers corps ont été validés :

- l'instabilité de crissement a été simulée avec le modèle non-linéaire via une analyse temporelle ;
- la convergence du modèle numérique non-linéaire a été vérifiée et obtenue grâce à l'introduction de l'amortissement structurel calculé expérimentalement ;
- l'analyse modale précontrainte a permis l'analyse de la dynamique du système et l'individuation du mode instable, excité par les forces de frottement ;
- la comparaison avec les résultats expérimentaux permet la validation en amplitude et en fréquence des simulations numériques ; les mêmes instabilités avec les mêmes niveaux de vibrations ont été mesurées et calculées.

De plus, la simulation temporelle effectuée à l'échelle des premiers corps permet le calcul des données nécessaires pour effectuer des simulations à l'échelle de l'interface (données ne pouvant pas être obtenues expérimentalement).

PARTIE 3

GT3 - Modélisation à l'échelle des interfaces

INTRODUCTION

L'objectif de ce groupe de travail consiste à caractériser la rhéologie des interfaces de contacts. Il s'agira dans un premier temps d'effectuer des simulations en utilisant des données issues de simulations à l'échelle B puis de données issues de l'échelle D. Des études propres concernant la rhéologie des écoulements de troisième corps seront effectuées, en essayant de corréler les informations liant contrainte et déformation au coefficient de frottement.

Rappel des différentes tâches
Tache 3.1 : **Etude paramétrique sous sollicitations macroscopiques** A partir d'ensemble de données issues de l'échelle macro (B), une série de simulation sera effectuée faisant ainsi varier les conditions limites force normale/vitesse de cisaillement. Leur influence sur le coefficient de frottement mesuré sera précisée. **Tache 3.2** : **Modèle de frottement fonction des contraintes et déformations globales** On s'attachera plus particulièrement à formuler correctement les relations pouvant exister entre les conditions limites et conditions locales sur les variables mesurées. **Tache 3.3** : **Influence des lois microscopiques (échelle D) sur la rhéologie** A partir de données locales issues de simulations micros (échelle D), effectuera des tests comparatifs entre les nouvelles données et les utilisées usuellement. **Tache 3.4** : **Etude paramétrique sous sollicitations macroscopiques prenant en compte les lois d'adhésion micro (échelle D)**. A partir d'ensemble de données issues de l'échelle macro (B), une série de simulations sera effectuée faisant ainsi varier les conditions limites force normale/vitesse de cisaillement en utilisant les lois de cohésion micro. Leur influence sur le coefficient de frottement mesuré sera précisée.

1 CADRE NUMERIQUE

Les présents travaux s'appuient sur l'extension de la méthode Contact Dynamics [] proposée par M. Jean portant le nom de Non Smooth Contact Dynamics (NSCD) [] pour décrire l'évolution dynamique d'un ensemble de particules, s'appuyant sur l'équation de la dynamique :

$$\mathbb{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{F}^{ext}(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{R} \qquad \textbf{[3.1]}$$

où **M** est la matrice de masse du système, **q** le vecteur position, $\mathbf{F}^{ext}$ les forces extérieures appliquées au corps en contact et **R** les forces de contact.

La méthode NSCD est basée sur une mise en équation de l'équation (1) en présence de collisions éventuelles. Elle est caractérisée par une discrétisation en temps de type "time stepping" en utilisant une θ-méthode. Un solveur de type Gauss Seidel Non Linéaire permet de calculer en même temps vitesses relatives au contact **u** et forces de contact **r** en tenant compte des lois d'interaction entre éléments :

$$\begin{cases} \mathbb{W}h\mathbf{r}_{i+1} + \mathbf{u}_i^{free} = \mathbf{u}_{i+1} \\ Interaction[\mathbf{r}_{i+1}, \mathbf{u}_{i+1}] \end{cases} , \qquad \textbf{[3.2]}$$

où **W** =($\mathbf{H}^*\mathbf{M}^{-1}\mathbf{H}$)est l'opérateur de Delassus et $\mathbf{u}^{free}$ la vitesse libre calculée en l'absence de force de contact. **H** et sa transposée $\mathbf{H}^*$ sont les deux applications linéaires permettant de transférer les informations des repères locaux (niveau des contacts), au repère global, (corps en contact). On trouvera dans les travaux initiaux les détails concernant la mise en équation du système [].

Dans ces travaux deux lois d'interaction différentes sont utilisées.

La première, baptisée IQS, est une loi unilatérale cohésive. Celle-ci peut-être formulé comme un problème de complémentarité entre la vitesse relative au contact et la force de contact de la façon suivante :

$$(r_n + \gamma) \geq 0 \quad u_n \geq 0 \quad (r_n + \gamma).u_n = 0, \qquad \textbf{[3.3]}$$

où γ représente la force nécessaire pour séparer les corps en contact.

La seconde loi, baptisée ELAS, est une loi élastique cohésive. Elle peut également s'écrire comme un problème de complémentarité entre la vitesse relative au contact et force de contact de la façon suivante :

$$(r_n + \gamma) - ku_n \geq 0 \quad u_n \geq 0 \quad ((r_n + \gamma) - ku_n).u_n = 0, \qquad \textbf{[3.4]}$$

où k représente la raideur au contact.

3 RHEOLOGIE DES TROISIEME CORPS SOLIDES

3.1 Modèles numériques

Pour étudier la rhéologie du troisième corps, une réflexion a été menée concernant le choix de la dimension. En effet, si pour un modèle à l'échelle globale, il n'y a pas d'incidence du choix du modèle sur les grandeurs mesurés dans le plan d'étude, ce n'est pas le cas à l''échelle locale lorsque l'on utilise un modèle discret. En effet, en deux dimensions, si une particules doit franchir un obstacle, elle ne peut que soit passer par dessus ou par dessous, en fonction de la configuration géométrique, ce qui peut conduire à des efforts non admissible physiquement. En trois dimensions, on n'observe pas ce problème, puisque la même particule peut contourner l'obstacle latéralement.

Pour essayer de rester réaliste, ou du moins pour ne pas introduire d'artefact due à la modélisation, nous effectuerons des écoulements en 3D. Cependant pour ne pas introduire de biais vis à vis des modèles à l'échelle globale, nous utiliserons des conditions bi-périodiques.

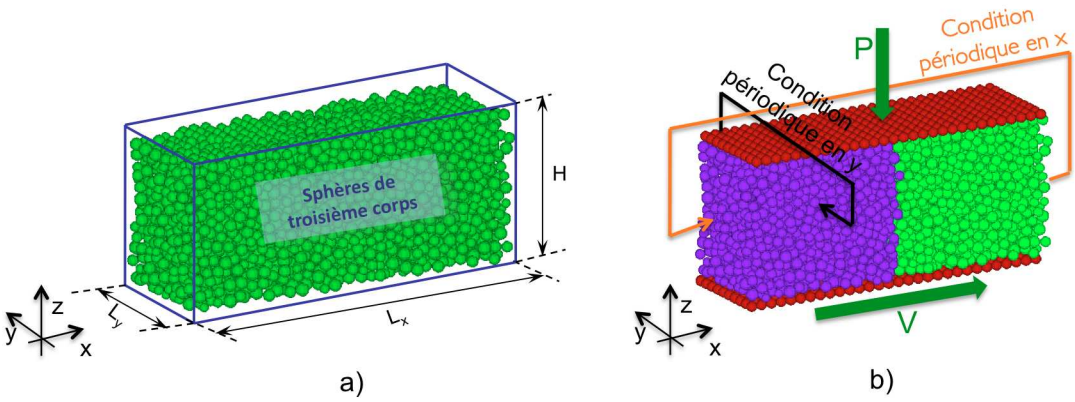


Fig. 3.1 : (a) Visualisation des particules constituant le troisième corps et (b) description des conditions aux limites et des conditions périodiques.

Nous modélisons donc une cellule de cisaillement simple (type Couette), comme utilisée classiquement. Le troisième corps est contenu dans une domaine rectangulaire de longueur L_x, de largeur L_y et de hauteur H. Le troisième corps est constitué de sphères de rayon choisi aléatoirement entre deux valeurs R_{min} et R_{max}

Comme dans les simulations 2D, un couple de conditions aux limites est appliqué sur les premiers corps : une pression verticale P et une vitesse de cisaillement horizontale V (dans la direction x) (cf. Fig. 3.1b). Le premier corps supérieur est libre suivant l'axe (0; z) et fixe dans les deux autres directions, tandis que le premier corps inférieur est libre suivant (0; x) et fixe dans les deux autres directions. Enfin on ajoute des conditions périodiques dans les directions x et y (cf. Fig. 3.1b). On considère ainsi que, ce contact élémentaire, contenu entre ces deux frontières, se répète à l'infini. Pour visualiser la déformation de l'échantillon durant la simulation, les particules sont coloriées de deux couleurs différentes, perpendiculaires à la direction du cisaillement.

Pour prendre en compte la déformation du premier corps et voir son effet sur la rhéologie du troisième corps, on utilise de premier corps utilisant un réseau de ressorts. Ce modèle est comparé à l'approche classique utilisant un premier corps rigide. Les deux modèles "rigide"et "déformable" utilisés dans les simulations sont présentés sur la figure 3.2.

Dans le modèle "rigide", chaque premier corps est composé de sphères rigides fixées les unes par rapport aux autres. La taille des sphères est constante et égale à la taille moyenne des sphères constituant le troisième corps (cf. Fig. 3.2a).

Dans le modèle "déformable", le premier corps supérieur est modélisé par un réseau de ressorts cf. Fig. 3.2b). Ce corps est constitué de deux couches de sphères : les sphères de la première couche et de la deuxième couche sont connectées par des ressorts pour permettre une déformation locale du premier corps supérieur. Le premier corps inférieur est rigide avec les même propriétés que dans le modèle "rigide".

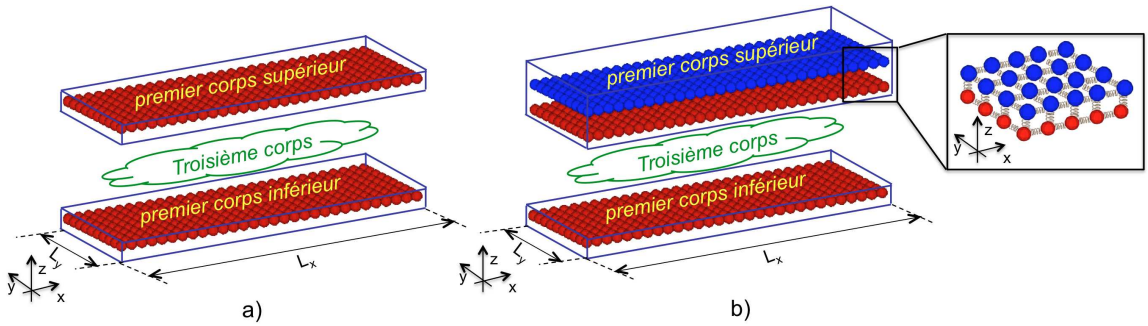


Fig. 3.2 : modèles de premier corps "rigides" (a), utilisant deux premiers corps rigides et (b) "déformables" utilisant le premier corps supérieur déformable et le premier corps inférieur rigide.

2.2 Coefficient de frottement macroscopique

La figure 3.3 présente l'évolution du coefficient de frottement macroscopique <μ> en fonction de l'intensité de cohésion η pour les deux modèles "rigide" et "déformable" ainsi que pour les deux lois de contact IQS (cf. figure 3.3.a) et ELAS (cf. figure 3.3.b).

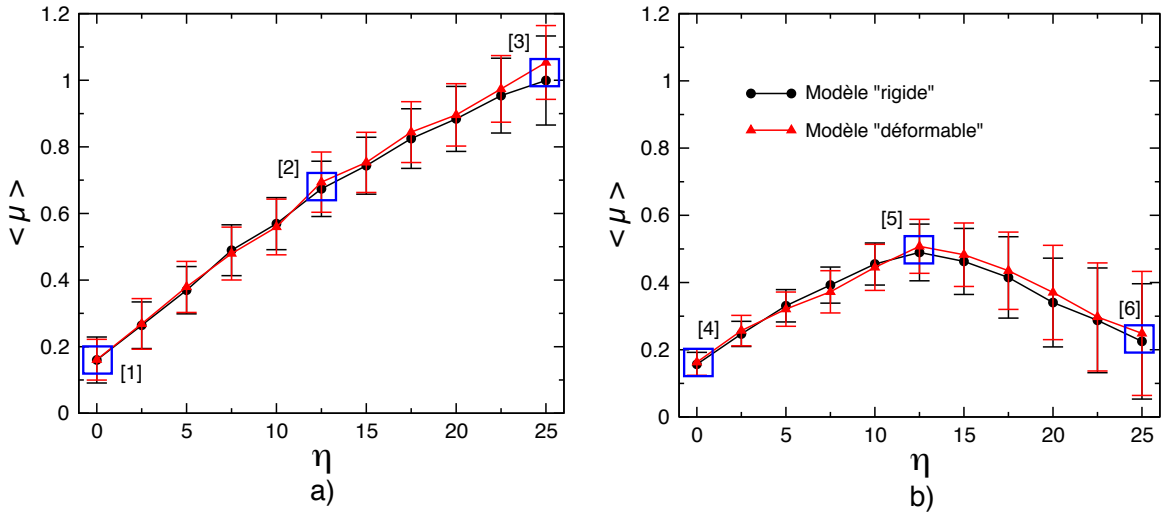


Fig. 3.3: Relation entre le coefficient de frottement macroscopique moyen <μ> et l'intensité de cohésion η pour lénsemble des modèles "rigide" et "déformable" selon les lois (a) IQS et (b) ELAS ;

Pour la loi IQS, le frottement augmente quasi linéairement avec l'intensité de cohésion η. Pour la loi ELAS, on obtient un comportement du coefficient de frottement particulier : dans un premier temps, le frottement augmente quasi linéairement jusqu'à une valeur seuil (ici, ηégale à 12.5 pour une valeur <μ> correspondant à 0.48), puis diminue avec l'augmentation de η. Ce comportement est observé dans d'autres travaux de la littérature utilisant des lois de contact similaire.

Le comportement (rigide/déformable) du premier corps supérieur n'est pas influent sur le coefficient de frottement global, et ce quelque soit la loi de contact. Ce comportement est donc plus une caractéristique locale propre au troisième corps.

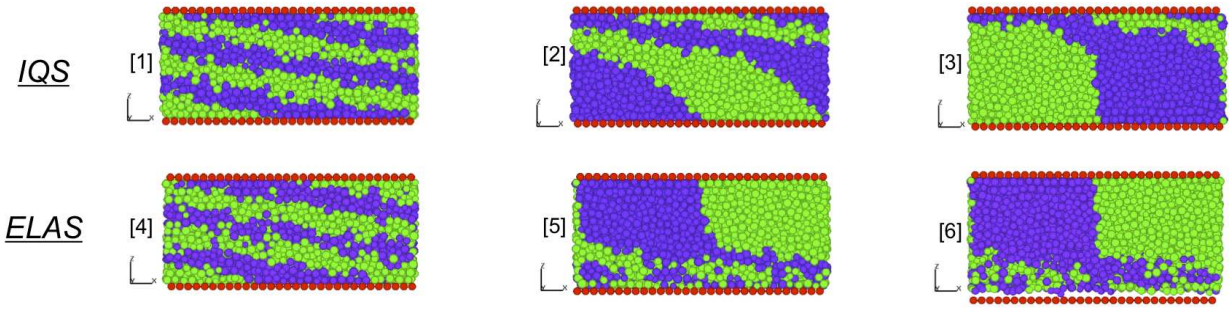


Fig. 3.4: visualisation de la déformation du troisième corps en fonction de η (point de vue 1 à 6 de la figure 4.3) pour les lois IQS et ELAS.

On peut remarquer également que le frottement obtenu avec la loi ELAS est inférieur à celui obtenu avec la loi IQS, ce qui se comprend car la loi IQS est plus dissipative que la loi ELAS.

Pour la loi IQS, plus l'intensité de cohésion η est importante plus il est difficile de briser les liens entre les particules (cf. points de vue 1,2 et 3 de la figure 3.4), ce qui entraîne une augmentation de la force tangentielle et donc l'augmentation du frottement.

Pour la loi ELAS, nous retrouvons un comportement similaire à celui obtenu avec la loi IQS uniquement pour des valeur de η.inférieure à 12.5, valeurs pour lesquelles le milieux reste relativement dense (cf. points de vue 4 et 5 de la figure 3.4). Au delà de cette valeur, il y a une compétition entre l'inertie engendrée par le cisaillement et la cohésion du milieu, et on observe une rupture macroscopiques entre les particules constituant le troisième corps et le premier corps inférieur (cf. point de vue 6 de la figure 3.4). Il y a donc beaucoup moins de contact actif, ce qui entraîne une diminution de la force tangentielle et donc une diminution du frottement mesuré. Ce résultat souligne le fait qu'il est possible d'obtenir une même valeur de frottement macroscopique pour deux rhéologies très différentes.

2.3 Profils de vitesse

Dans cette section, nous présentons trois types caractéristiques de profils de vitesse correspondants à des valeurs faibles, intermédiaires et fortes de la cohésion locale. On observe ici l'influence du comportement (rigide/déformable) du premier corps supérieur et de la loi de contact (IQS ou ELAS) sur le profil de vitesse au travers de l'épaisseur du troisième corps.

2.3.1 Cohésion faible

Ce régime correspond à des valeurs faibles d'intensité de cohésion (i.e. $\eta \in [0, 2]$). On observe un troisième corps très dense et un profil d'écoulement de type Couette dans tous les cas de simulation. On obtient un profil de vitesse quasiment linéaire, sans influence du comportement rigide/déformable et la loi de contact sur les profils de vitesse. Il n'y a pas de localisation et toute la couche de troisième corps participe à l'accommodation de vitesse.

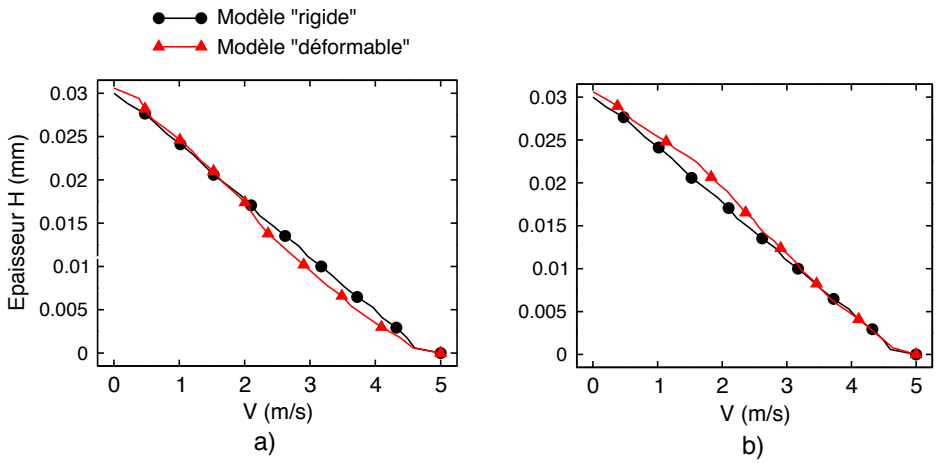


Fig. 3.5 : Profils de vitesse au travers de l'épaisseur du troisième corps dans la direction du cisaillement x pour les modèles "rigide" et "déformable" avec les lois de contact (a) IQS et (b) ELAS pour une valeur de η égale à 0.

2.3.2 Cohésion intermédiaire

Dans une gamme de valeurs intermédiaires d'intensité de cohésion (i.e. $\eta \in [2, 12.5]$), le régime d'écoulement n'est plus de type Couette. Il apparaît des localisations dans les profils d'écoulement.

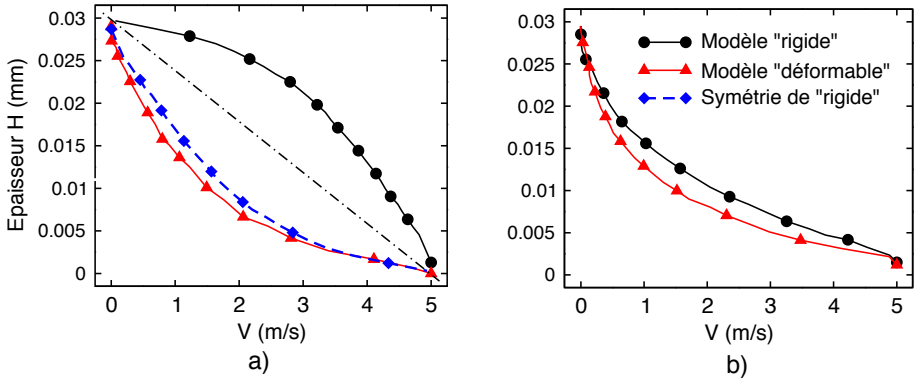


Fig. 3.6 : Profils de vitesse au travers de l'épaisseur du troisième corps dans la direction du cisaillement x pour les modèles "rigide" et "déformable" avec les lois de contact (a) IQS et (b) ELAS pour une valeur de η égale à 10.

Pour la loi de contact IQS et le modèle "rigide", on obtient une accommodation de vitesse au niveau du premier corps supérieur tandis qu'elle se produit au niveau du premier corps inférieur avec le modèle "déformable". Il démontre que, la déformation locale des ressorts du modèle "déformable" favorise une accommodation de la déformation du troisième corps au niveau du premier corps supérieur, favorisant ainsi une accommodation de vitesse au niveau du premier corps inférieur. Toutefois, les profils de vitesse sont quasi identiques lorsque l'on compare le symétrique de la courbe obtenue avec le modèle "rigide" et celle du modèle "déformable".

Pour la loi ELAS, "l'élasticité" de la loi conduit à une accommodation de vitesse au niveau du premier corps mobile, aussi bien pour le modèle "rigide" que le modèle "déformable". En comparant les deux modèles, on observe une légère différence (cf. Fig. 3.6.b)

entre les profils de vitesse qui deviennent un peu plus sensibles au comportement du premier corps supérieur mais aussi à la loi de contact sir l'on compare avec la loi IQS.

2.3.3 Cohésion forte

Ce régime correspond des valeurs de l'intensité de cohésion η supérieur à 12.5. La localisation est plus importante que pour une intensité de cohésion intermédiaire. Le troisième corps est divisée en deux parties, une partie "fluide" et une autre partie "statique" qui ne participe pas à l'accommodation de vitesses

Pour la loi IQS, on retrouve un comportement identique au profil d'écoulement obtenu pour une intensité de cohésion intermédiaire (cf. figure 4.7). On obtient une accommodation de vitesse au niveau du premier corps supérieur avec le modèle "rigide", tandis quélle se situe au niveau du premier corps inférieur avec le modèle "déformable". Toutefois, les profils de vitesse sont quasi identiques lorsque l'on compare le symétrique de la courbe obtenue avec le modèle "rigide" et celle du modèle "déformable" (cf. figure 3.7a).

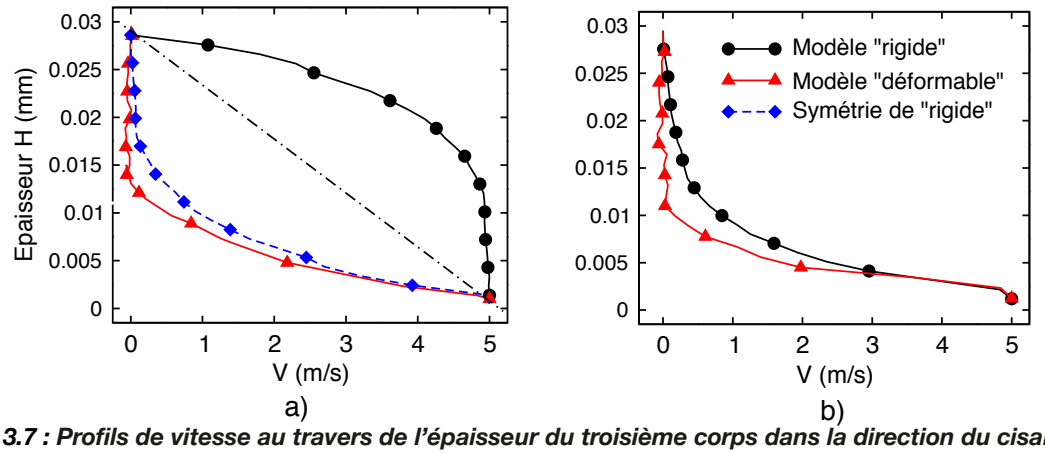


Fig. 3.7 : Profils de vitesse au travers de l'épaisseur du troisième corps dans la direction du cisaillement x pour les modèles "rigide" et "déformable" avec les lois de contact (a) IQS et (b) ELAS pour une valeur de η égale à 25.

Pour la loi ELAS, on obtient une accommodation de vitesse au niveau du premier corps inférieur pour les deux modèles de premier corps.

Le modèle de premier corps supérieur déformable conduit à une transition plus "raide" entre la partie statique et la partie dynamique du troisième corps, et ceci pour les deux lois de contact. On retrouve dans les deux cas une vitesse moyenne nulle alors qu'il y a une léger gradient pour le modèle rigide. L'ajout de cette souplesse au modèle favorise la tenue de l'échantillon et privilégie ainsi l'accommodation de vitesse au niveau du premier corps mobile.

2.3.4. Synthèse

La figure 8.11 propose une synthèse des profils de vitesse pour les différentes rigidités de premier corps supérieur et loi de contact en fonction de l'intensité de cohésion η. Si η est faible, les profils de vitesse sont linéaires pour tout les cas. Si η augmente, les profils de vitesse ne restent plus linéaires, et on observe une localisation au niveau des profils de vitesse qui augmente avec l'augmentation de l'intensité de cohésion η.

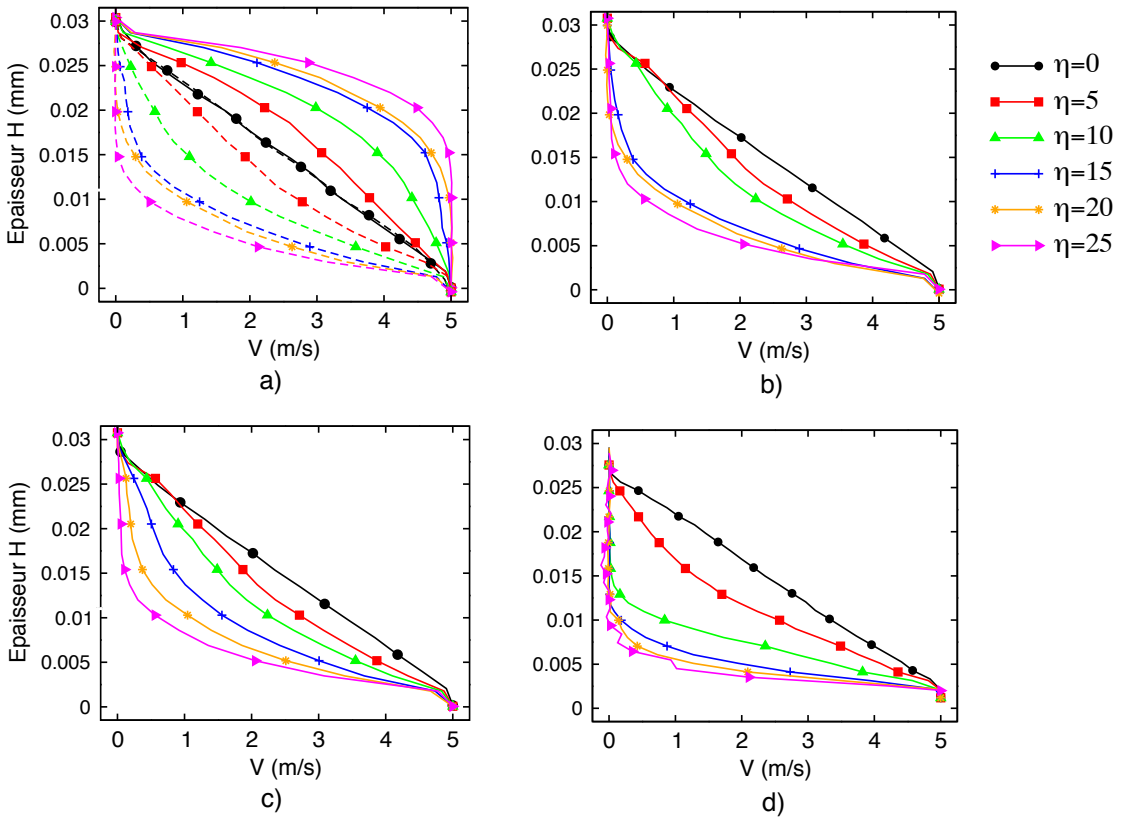


Fig. 3.8 : Profils de vitesse dans la direction de cisaillement x en fonction de η pour le modèle "rigide" ((a) IQS et (c) ELAS) et pour le modèle "déformable" ((b) IQS et (d) ELAS).

Il est intéressant de noter que pour le modèle rigide, lorsque η augmente l'accommodation de vitesse se fait de façon régulière (décroissance de l'épaisseur d'accommodation). Avec le modèle déformable, la transition est plus raide et se passe dans la gamme d'intensité de cohésion intermédiaire, pouvant aussi conduire à des profils très différents (cas ηégal à 10 par exemple).

2.4 Profils de contrainte

Pour obtenir une description complète de la rhéologie du troisième corps sous la sollicitation de cisaillement, on examine maintenant les différents profils de contrainte.

2.4.1 Profils de contrainte de compression

La figure 3.9 montre les profils de contrainte σ_{zz} au travers de l'épaisseur du troisième corps en fonction de l'intensité de cohésion η pour le modèle "déformable" avec une loi de contact IQS. La valeur moyenne du profil de contrainte σ_{zz} est inchangée et égale à la pression appliquée P. Logiquement la contrainte principale σ_{zz} que l'on mesure est toujours égale à la pression appliquée. Nous obtenons le même comportement aussi bien avec le modèle "rigide" qu'avec la loi de contact ELAS. De plus, ils sont en bon accords avec la littérature. Donc, le comportement rigide/déformable du premier corps supérieur et la loi de contact (ELAS ou IQS) sont peu influents sur les profils de contrainte σ_{zz}.

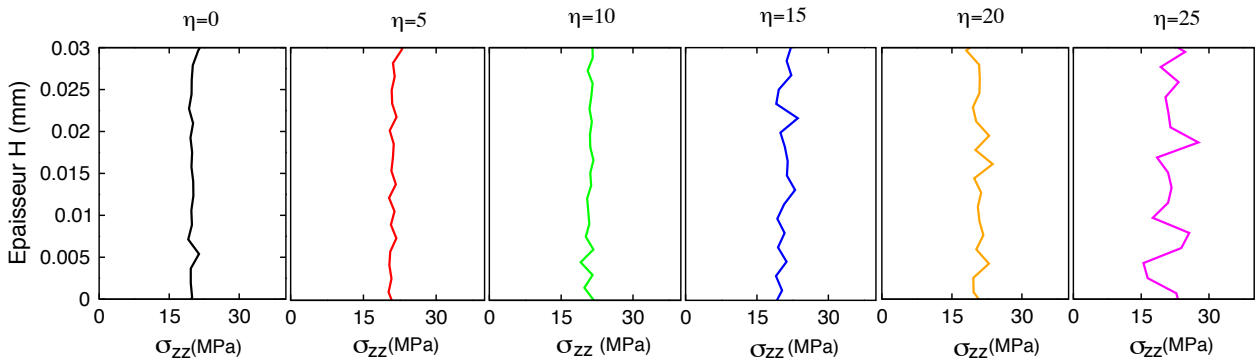


Fig 3.9: Profil de contrainte σ_{zz} en fonction de l'intensité de cohésion η pour le modèle "déformable" avec une loi de contact IQS.

2.4.2 Profils de contrainte de cisaillement

Au niveau des profils de contrainte σ_{xz}, les résultats sont similaires pour le modèle "rigide" et "déformable", donc seul le modèle "déformable" est présenté. La figure 3.10 montre les profils de contraintes de cisaillement σ_{xz} en fonction de l'intensité de cohésion η pour le modèle "déformable" avec une loi de contact IQS et ELAS.

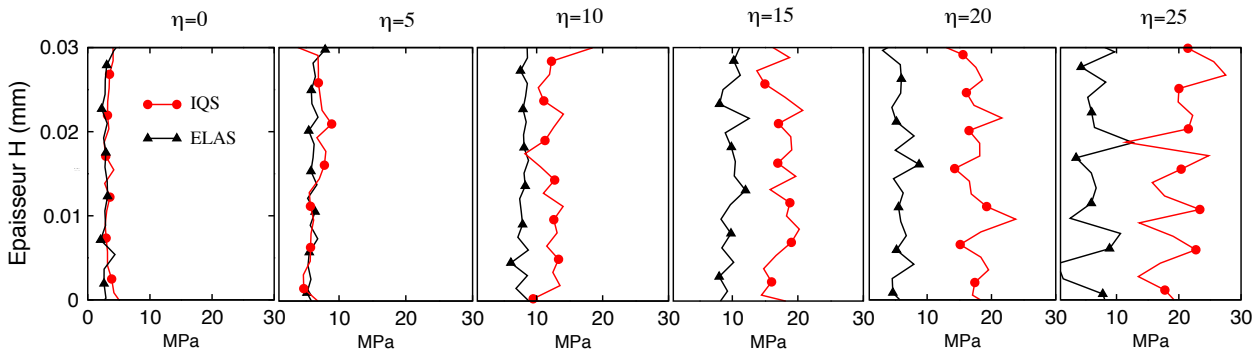


Fig. 3.10 : Profil de contrainte σ_{xz} en fonction de l'intensité de cohésion η pour le modèle "déformable" avec la loi de contact IQS et ELAS.

Le profil de contrainte σ_{xz} présente des différences entre les lois IQS et ELAS. Au niveau de la loi IQS, la valeur moyenne du profil de contrainte σ_{xz} augmente avec l'augmentation de η. Ce phénomène ne se produit pas pour la loi ELAS, la valeur moyenne augmente puis diminue avec l'augmentation de η. Logiquement nous retrouvons l'évolution des profils de contrainte cisaillé σ_{xz} comme le comportement du frottement macroscopique.

Donc, il y a peu d'influence du comportement rigide/déformable du premier corps supérieur sur le profil de σ_{xz}, mais la loi de contact est beaucoup plus influente sur le profil de σ_{xz} comme observé avec le coefficient de frottement macroscopique (cf. Fig. 3.4).

2.4 Conclusion

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à étudier la rhéologie du troisième corps dans 3D et plus particulièrement à l'influence de la description (rigide/déformable) du premier corps supérieur, de la cohésion et de la loi de contact sur le comportement global du troisième corps.

Nous avons montré une grande influence de la cohésion locale et de la loi de contact sur la rhéologie, le frottement macroscopique et les profils de vitesse et de contrainte.

La description (rigide/déformable) est peu influente sur le coefficient de frottement macroscopique et les profils de contrainte mais beaucoup plus influente sur les profils de vitesse.

PARTIE 4

GT4 - Echelle moléculaire

INTRODUCTION

L'idée première du GT4était de donner à l'échelle C (interface) des valeurs physiques de frottement et d'adhésion entre deux particules de troisièmes corps piégées à l'interface ainsi qu'entre une particule de troisième corps et l'une ou l'autre des surfaces en contact.

Rappel des différentes tâches
Tache 4.1 : *Définition du problème* Définir en liaison avec l'échelle C les caractéristiques géométriques (type et disposition atomique), physiques et chimiques (définissant ainsi les types d'interactions) des matériaux constituant le troisième corps et les deux surfaces de contact. **Tache 4.2 : *Développement du modèle*** Adapter les simulations de Dynamique Moléculaire existantes (initialement dédiées au comportement des lubrifiants liquides) pour pouvoir étudier les interactions entre deux solides, le but étant de réaliser des expériences numériques de séparation de surfaces et de frottement. Il faudra choisir et implémenter les champs de forces représentatifs des phénomènes physiques rencontrés avec ces matériaux. **Tache 4.3 : *Validation*** Une étape de validation des résultats sera effectuée. Elle consistera à confronter les résultats avec des expériences similaires (numériques ou physiques) de la littérature. **Tache 4.4 : *Réalisation d'essais numériques et développement de lois de comportement*.** Plusieurs séries de simulations seront nécessaires pour déterminer les comportements en adhésion et en frottement du contact entre deux particules de troisième corps et entre particule et l'une ou l'autre des surfaces en contact. Chaque lot de simulations tentera de caractériser l'évolution d'une grandeur (adhésion ou frottement) en fonction des conditions normales et tangentielles, cinématiques et en chargement. .

1.PREPROCESSING

Durant les premiers mois du projet un bilan des outils disponibles a été réalisé afin de pouvoir les affiner pour les besoins du projet. Une attention particulière a été porté sur les matériaux qu'il sera possible de modéliser à l'échelle nanométrique. Ces deux points coïncident tout à fait avec les tâches 4.2 et 4.1 respectivement.

Le cœur des simulations dynamique moléculaire (MD pour *Molecular Dynamics*) menées dans ce projet repose sur le logiciel LAMMPS (développé par Sandia National Laboratory, USA, Department of Energy). Ce logiciel a l'avantage d'être open-source, ce qui offre une grande clarté quand au contenu du logiciel et la possibilité de modifier

ponctuellement certaines routines, au gré des besoins. Il a été conçu pour des calculs massivement parallèles et a montré son efficacité dans un grand nombre d'application. LAMMPS présente en revanche le désavantage d'être difficilement accessible aux néophytes : un long apprentissage des différentes commandes est nécessaire pour le faire fonctionner dans de bonnes conditions, et notamment pour créer un domaine de départ (une configuration géométrique initiale des atomes).

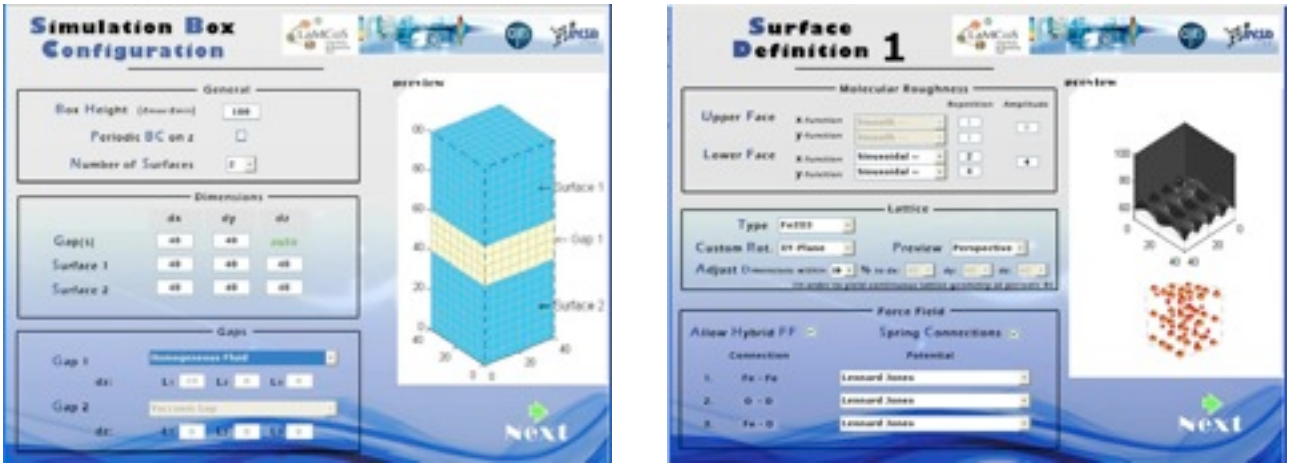


Fig 4.1 : à gauche, snapshot du préprocesseur PREPOL montrant les possibilités du domaine d'étude; à droite, snapshot de PREPOL montrant la définition des surfaces solides

Pour initier ce projet, il a donc été proposé de créer un module indépendant de pré-processing sous Matlab, accessible au plus grand nombre d'utilisateurs grâce à son interface graphique. C'est le développement de ce module, nommé PREPOL, qui est présenté ici. Bien au-delà des copies d'écran, c'est les potentialités des notre approche en général que l'on propose d'exposer.

Il est maintenant possible de créer un domaine solide, fluide ou mixte dans une boîte rectangulaire de dimensions à définir par l'utilisateur. Dans deux dimensions x et y des frontières périodiques sont automatiquement générées (à définir pour z). Dans l'exemple ci-dessous on propose de définir deux solides (en bleu) et un espace rempli d'un fluide (il est possible de laisser vide ce domaine, pour les besoins de ce projet par exemple, ou de définir un fluide hétérogène lorsque l'on étudie des lubrifiants additivés par exemple).

2 Définition du problème

Si la définition du problème (**tâche 4.1**) est explicitée après le développement du modèle (tâche 4.2), c'est pour faire ressortir les difficultés qui se sont d'ors et déjà présentées pour faire concorder les expériences (même modèles) du GT1 avec les possibilités de simulations à l'échelle nanométrique.

En effet, l'un des solides utilisé dans les expériences doit être transparent pour la visualisation des contraintes dans le massif. Si d'un point de vue des contraintes expérimentales, le choix d'un matériau polymère apparaît comme naturel, il est en revanche très restrictif en ce qui concerne les simulations à l'échelle nanométrique.

Comme évoqué précédemment, la boîte de simulation mesure typiquement 10 à 20 nanomètres de long si l'on veut espérer pouvoir décrire le mouvement des atomes sur quelques nanosecondes (nécessaires pour avoir une valeur suffisamment représentative

des forces de frottement locale par exemple). Les chaînes moléculaires impliquées dans les matériaux polymères obligerait à des simulations beaucoup plus volumineuses en terme de nombre d'atomes, ce qui rendrait l'étude quasi-statique (avec les moyens actuels de calcul). Une autre solution peut être de « simplifier » les molécules en mettant en œuvre des techniques d'homogénéisation (des méthodes United Atomes, supportées par notre logiciel, jusqu'aux méthodes Coarse Grain). En optant pour ce type de méthode, on perdrait alors toute la richesse des informations issues de la mécanique quantique, qui nous donne des informations fondées (les champs de forces) sur les interactions entre atomes.

Après de nombreux aller-retour entre modèles expérimental et numérique, le choix s'est porté sur un matériau cuivre, facilement modélisable car présentant un réseau cristallin et relativement simple d'utilisation dans les expériences. Le choix se portant sur un contact cuivre/cuivre, on pourra modéliser à l'échelle nanométrique des oxydes de cuivre., dégageant ainsi trois cas d'étude : cuivre / cuivre, cuivre / oxyde de cuivre et oxyde de cuivre / oxyde de cuivre.

3 Essais Mécaniques

3.1 Définition du modèle

Afin d'obtenir des informations sur les composantes normales et tangentielles des forces locales, deux types d'essais sont à réaliser :

- un test de séparation piloté en déplacement en mesurant la force d'adhésion générée par les deux surfaces en contact;
- un test de cisaillement sous charge normale et déplacement tangentiel imposés et en mesurant la force de frottement résultant.

La gamme de pression normale et de vitesse de cisaillement est donnée par le GT3.

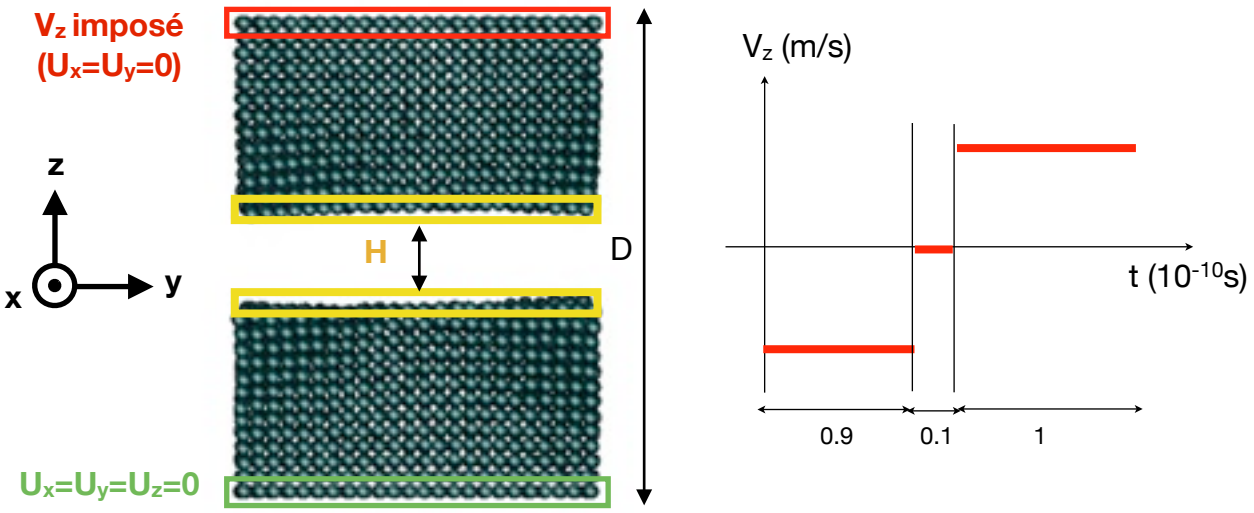


Fig 4.2 : Modèle utilisé pour les essais de séparation: 7486 atomes; masse : 34 g/mol; Coefficients de Lennard-Jones : ε=11.03 kcal/mol et σ=2.5 A.

Les premières simulations mettent en jeu deux massifs bi-périodiques constitués d'atomes de cuivre de dimensions 40x40x30 Å (pour L_x x L_y x L_z). Ils sont disposés à environ 11 Å de distances, pour une température fixée à 300 K et un temps de relaxation de 10^{-11} s (effectué sur 10000 itérations). Le massif inférieur est fixe. La vitesse d'approche du massif supérieur est de 10^{-4} Å/fs (i.e. 10m/s). Elle est appliquée sur la première couche supérieure pendant 9.10^{-11}s (i.e. 90000 itérations). La vitesse imposée est ensuite mise à zéro pendant 10^{-11}s (i.e. 10000 itérations) et on procède à une remontée à 10m/s pendant 10^{-10}s (i.e. 100000 itérations).

Deux distances de séparation sont calculées (Fig. 4.2). La première distance de séparation , notée H, est calculée comme la différence de la moyenne de la position suivant z des atomes de la couche haute du massif supérieur et de la moyenne de la position suivant z des atomes de la couche basse du massif inférieur . La seconde représente directement la différence entre la couche supérieure du massif supérieur et la couche inférieure du massif inférieur. Le calcul des positions des atomes comprend également la zone «d'occupation des atomes (estimée à 1 Å par atome)

Pendant la simulation on calcule la force Fz, force ressentie par la couche basse du massif supérieur pour lequel on impose la vitesse.

Les atomes des deux massifs interagissent via le potentiel de Lennard-Jones :

$$V_{LJ} = 4\epsilon[\frac{\sigma}{r}^{12} - \frac{\sigma}{r}^{6}]$$

Les valeurs (σ, ε) sont égalent à σ = 2.5 Å et ε = 11.03 kcal/mol pour le cuivre et à σ = 3.0 Å et ε = 0.21 kcal/mol pour l'oxygène. Ces valeurs ont été choisies de manières cohérentes avec la littérature [1], [3], [4].

En plus des interactions à distance de Lennard-Jones caractérisant les actions d'un solide sur l'autre, des interactions de type ressorts harmonique entre atomes à l'intérieur de chaque massif permettent de simuler simplement le comportement d'un solide sans avoir à utiliser des potentiels plus sophistiqués de type EAM [5], très coûteux en temps de calcul et surtout utile pour étudier la plasticité, voir la dégradation des solides à l'échelle nanoscopique. Le potentiel d'interaction utilisé est donc décrit simplement de la manière suivante :

$$V_{HB}(t) = K(l(t) - l_0)^2$$

où K représente une raideur locale à déterminer, l_0 la distance entre les atomes au repos (déterminé par le réseau cristallin) et l la distance mesurée à un instant t. Le point critique de ce modèle est donc la détermination de la raideur K (dont la valeur par défaut est de 10 kcal/(mol/Å ^{2})).

3.2 Résultats pour différentes températures

Pour une température de 300K (c.f. Fig. 4.3a), la force Fz mesurée est quasi-nulle lors de phase d'approche jusqu'à environ 6 Å de séparation puis devient négative (phase d'attraction). On observe alors une descente brutale ainsi qu'une déformation des massifs afin de faire coller les surfaces.

Lors de la phase de séparation, la force d'attraction augmente (en valeur absolue) pour atteindre une valeur maximale, suivie d'une rupture brutale des forces de cohésion

entre les deux massifs, générant de fortes vibrations, plus importante qu'en début de simulation.

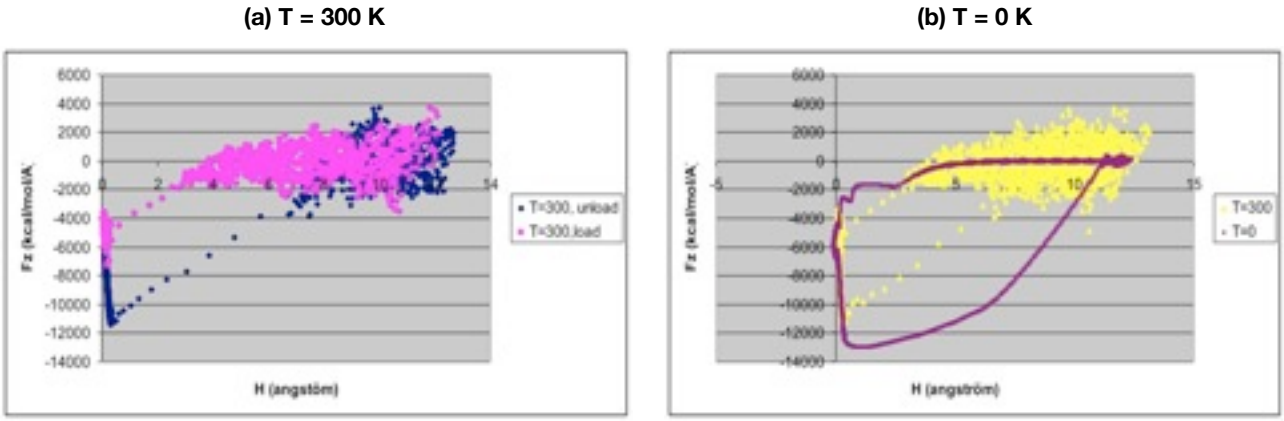


Fig. 4.3: Courbes d'approche/séparation pour des températures de 300K (a) et 0K (b).

A T = 0K (c.f. Fig. 4.3b), la courbe est naturellement beaucoup moins bruitée (mais aussi beaucoup moins réaliste par rapport à la physique). La valeur de la force d'adhésion à vaincre pour décoller les deux surfaces est du même ordre de grandeur.

Pour mettre en évidence le comportement répulsif des massifs, on effectue une simulation en faisant descendre d'avantage le massif supérieur (c.f. Fig. 4.4). La vitesse de descente s'effectue de manière tout à fait similaire à la simulation précédente.

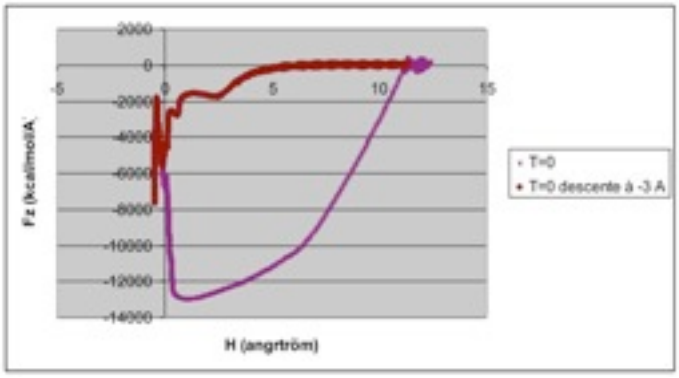


Fig. 4.4: Courbes d'approche/séparation pour une température de 0K et une distance d'approche plus grande.

Lorsqu'on atteint H=0, la force adhésive diminue puis on observe un comportement parasite où la première couche d'atomes de la surface supérieure passe à travers la première couche d'atome de la surface inférieure. Cet artefact entraine non pas une augmentation de la de répulsion Fz mais une augmentation à nouveau de la force d'adhésion.Pour contourner ce problème, on pourrait tirer de ces calculs une expression de raideur qu'on pourrait extrapoler jusqu'au Fz>0.

Une représentation alternative à la figure 4.2 consiste à représenter Fz non pas en fonction de H, mais en fonction de la distance D (Fig. 4.5). Cette représentation a l'avantage de montrer clairement le comportement en traction/compression une fois le contact établi. On remarque d'ailleurs ici clairement qu'on a une réponse linéaire de F_z par rapport à la distance des massifs.

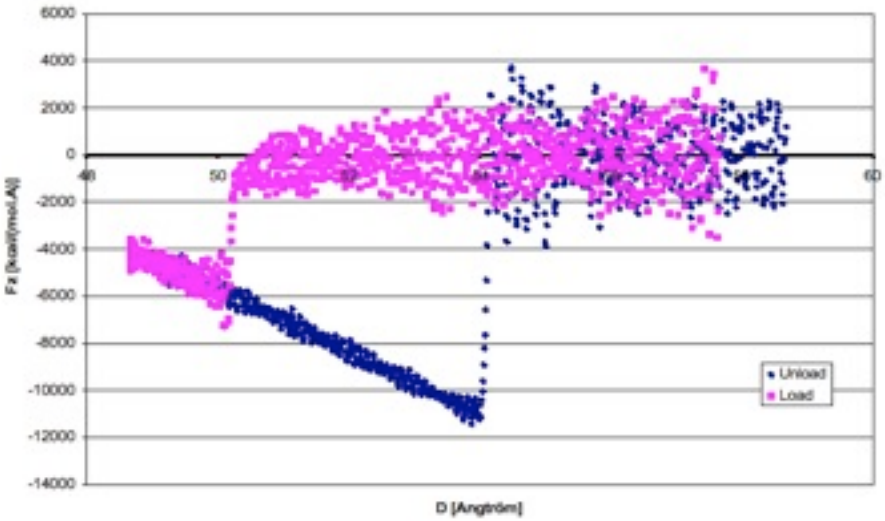


Fig. 4.5: Evolution de Fz en fonction de D pour une température T = 300K.

On pourra donc approcher le comportement du contact comme une raideur linaire de pente, notée α, agissant dès la distance de 3 à 4 angströms lorsque les 2 solides viennent subitement en contact, jusqu'au moment où ils se séparent mettant en jeu la force d'adhésion F_{adh} lors du décrochage.

3.3 Aspects Energétiques

Pour proposer un modèle fiable d'interaction solide-solide à l'échelle nano qui pourra être intégré aux échelles supérieures, une analyse énergétique est nécessaire. La figure 4.6 présente l'évolution des différentes énergies mises en jeu au cours de l'essai d'adhésion.

On remarque que l'énergie totale du système est constante dans toute la phase d'approche des solides; on retrouve par ailleurs cette même énergie à la fin de l'essai lorsque les solides se sont séparés. Dans la phase où les solides sont en contact, l'énergie totale décrite ici est contrebalancée par le travail de la force F_z le long du déplacement imposé, ce qui conduit à stocker momentanément de l'énergie potentielle dans les liaisons inter-atomiques. Les lois d'interaction entre atomes étant conservatives, l'énergie dissipée est réduite au minimum. Elle existe néanmoins (en très faible quantité comparée aux autres énergies en présence) lorsque les deux solides se séparent, se qui va de paire avec l'apparition soudaine d'une énergie cinétique supplémentaire dans le système. A cause du thermostat utilisé dans le modèle (qui dissipe l'énergie pour maintenir la température imposée de 300 K), l'énergie cinétique revient rapidement à sont niveau initial.

L'énergie potentielle du système peut, être décomposer en deux partie : celle contenue dans les liaisons inter-atomiques d'un même solide (E_{bond}), et celle contenue dans les interactions à distance entre les deux solides, de type Lennard-Jones (E_{pair}).

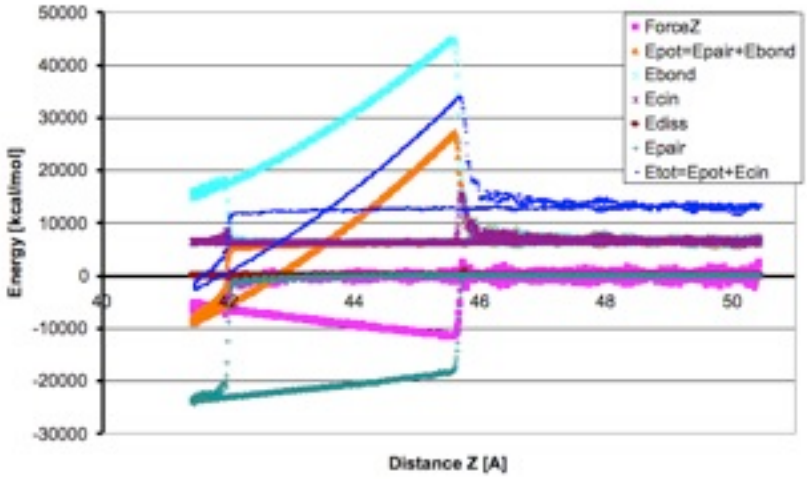


Fig. 4.6: Evolution desénergies (potentielle, cinétique, dissipée, totale) au cours de léssai numérique de d'adhésion.

Lorsque les deux solides entrent en contact, E_{bond} augmente brusquement (les massifs sont étirés, les ressorts travaillent en traction), pour diminuer au fur et à mesure que les massifs se rapprochent. En parallèle, E_{pair} jusqu'alors nulle devient négative (force de travail «cohésive»). Lorsque les massifs sont séparés, E_{bond} augmente, traduisant un travail en traction de plus en plus important à l'intérieur des solides, et E_{pair} diminue (en valeur absolue) car une composante de traction s'ajoute à cette force essentiellement cohésive. Lorsque les massifs se sont séparés, toutes les énergies potentielles (et l'énergie totale) retombent à leurs niveaux initiaux dans un délai très cours.

On remarque que l'énergie potentielle libérée au moment du détachement est d'environ 27000 kcal/mol, conduisant à créer deux surfaces de 43.32 Å² chacune. Toutes conversions faites, ceci revient à créer des énergies de surface d'environ 5 J/m². Au regard de la littérature sur le sujet [6], cette valeur respecte tout à fait l'ordre de grandeur attendue. La relation entre les paramètres locaux (ε et σ) et globaux (la tension superficielle) est donc validée vis-à-vis de la littérature.

3.4 Comportement des massifs

Une fois les aspects énergétiques validés, l'impact de la raideur locale entre atomes du même massif doit être étudié. Il est évident que la valeur de raideur choisie va influencer directement la raideur du contact (α). La Figure 4.7 montre une évolution linéaire de α en fonction de K.

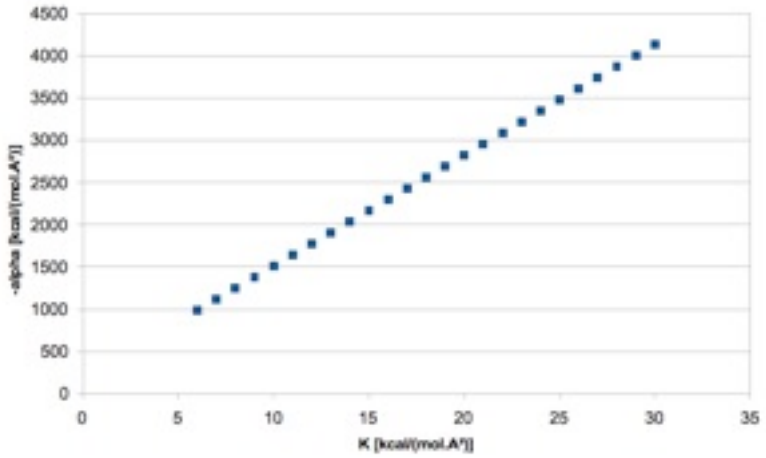


Fig 4.7 : Effet de la raideur K sur la raideur de contact α

On pourrait alors penser à chercher la valeur de K telle qu'elle représenterait la raideur d'un massif continu (liée au module d'Young du cuivre, donnée connue). En considérant la théorie de l'élasticité linéaire, pour un matériau isotrope et en considérant des déplacements nuls dans les directions de la surface de contact ($\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 0$), justifiés par l'emploi de conditions périodiques dans ces deux directions (pas de striction contrairement à la théorie des poutres), on aboutit à :

$$\sigma_{zz} = \frac{E}{1+\nu}\epsilon_{zz}$$

En choisissant pour le cuivre E = 124 GPa et υ = 0.33, on obtient un coefficient de 93 GPa soit 13.4 kcal/(mol.A^3). Pour K = 10, la figure 5.7a, représentant une partie de la figure 4.4 (lorsque les solides sont en contact), souligne le comportement contrainte/déformation des massifs.

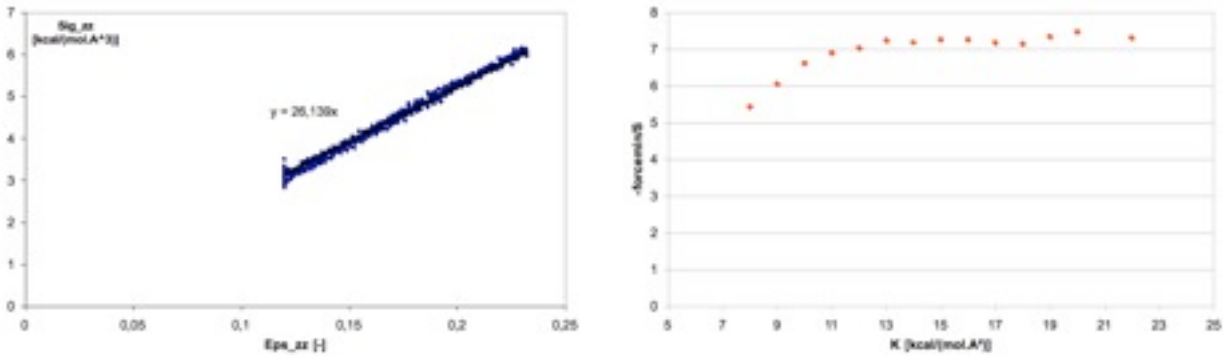


Fig. 4.8 : (a) Comportement en contrainte-déformation des massifs solides dans la phase de contact et (b) effet de la raideur K sur la force d'adhésion

On retrouve bien une relation de proportionnalité entre ε et σ, mais le coefficient directeur apparait comme deux fois plus élevé. On serait donc tenté de choisir une valeur de K deux fois plus faible pour représenter les propriétés macroscopiques du cuivre. Cependant, la figure 5.7b montre que le fait de choisir une raideur trop petite, ne permettrait

pas de garder une valeur de force d'adhésion constante, paramètre qui par nature ne dépend pas du volume mais des surfaces.Pour garantir cela, il faut donc choisir une raideur K qui ne soit pas plus petite que 10 kcal/(mol.A²).

3.5 Paramètres d'espace et de temps

Les paramètres recensés sont de deux types : le pas de temps employé et les dimensions des massifs.

Dans un premier temps, on étudie l'influence du pas de temps et de la vitesse d'approche des solides sur les résultats mesurés. La Figure 4.9a montre l'effet du pas de temps. Si le comportement est tout à fait similaire pour des pas de temps 0,5 et 1 fs, il commence à dévier légèrement pour un pas de temps de 2 fs . Les variations apparaissent non pas sur la pente caractérisant la raideur du contact, mais sur la force Fz atteinte lors du décrochage). Un choix de pas de temps de 1 fs est donc raisonnable.

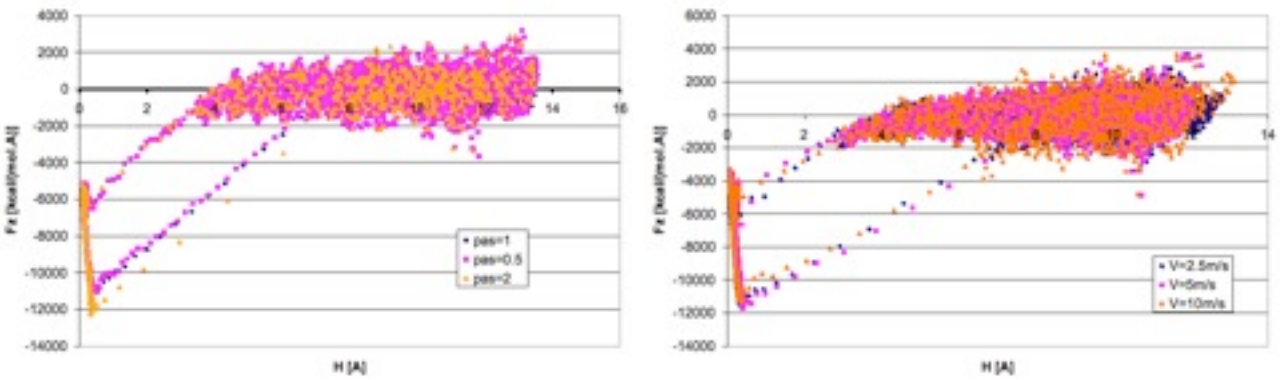


Figure 4.9: (a) Effet du pas de temps (0,5 fs, 1 fs, 2fs) sur la réponse de Fz en fonction de H et (b) Figure 10 : Effet de la vitesse d'approche (de descente) des deux solides.

Le deuxième aspect sur lequel le temps peut intervenir est la vitesse de descente (et de remontée) des deux solides en vis-à-vis.

Comme montré sur la figure 4.9b, pour trois vitesses de descentes différentes (de 2,5, 5 et 10 m/s), aucune différence notable n'est constatée sur le comportement du système. Il faut donc noter que la caractérisation de cet essai numérique est totalement indépendante du paramètre temps. Localement cela s'explique par le fait que les interactions atomiques sont elles-mêmes dé-corrélées de la notion de vitesse.

Concernant les dimensions des massifs, nous pouvons distinguer deux paramètres : la dimension de l'aire de contact et l'épaisseur des massifs.

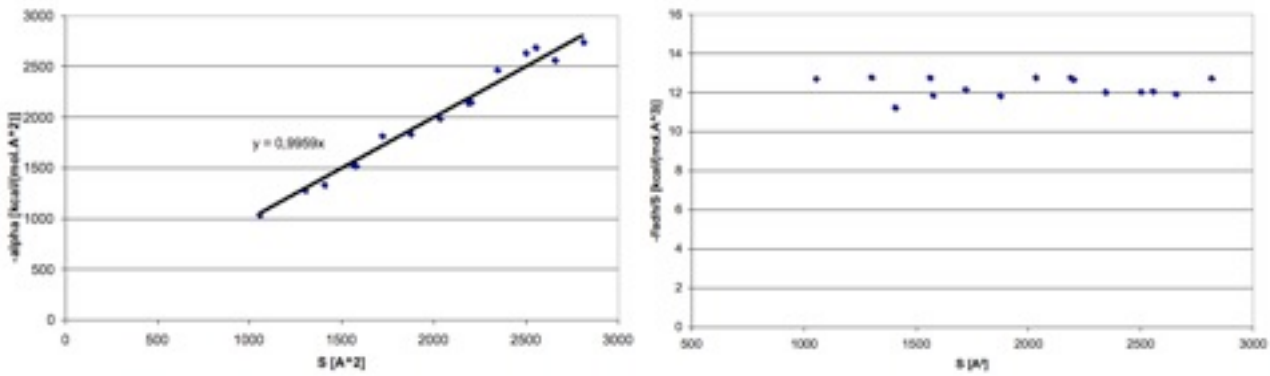


Figure 4.10 : (a) Raideur de contact alpha variant avec l'aire de contact et (b) force d'adhésion fonction de la surface de contact (contact Cu-Cu).

Il est rassurant de constater sur la Figure 4.10a que la raideur de contact varie linéairement avec la surface S du contact. En effet, ceci est tout à fait conforme à la loi des ressorts en parallèle : deux fois plus de ressorts en parallèle implique par exemple une raideur équivalente 2 fois plus grande. Notre essai numérique suit tout à fait ce comportement. La valeur de la raideur donnée doit donc être relative à l'aire du contact étudiée Cette raideur re-dimensionnée vaut approximativement : $-\alpha/S = 1$ kcal/(mol.A^4). De même, la force d'adhésion F_{adh} (valeur de F_z au moment de la rupture) devient constante lorsqu'on la re-dimensionne via l'aire de contact : $F_{adh}/S = -12$ kcal/(mol.A^3).

Des essais numériques ont été également conduits avec deux massifs identiques en Cu^2O i.e. en oxyde de cuivre (Fig. 4.11). En faisant varier l'aire de contact on trouve également des valeurs constantes pour α/S et F_{adh}/S respectivement égalent à -0,8 kcal/(mol. A^4) et -2,2 kcal/(mol.A^3).

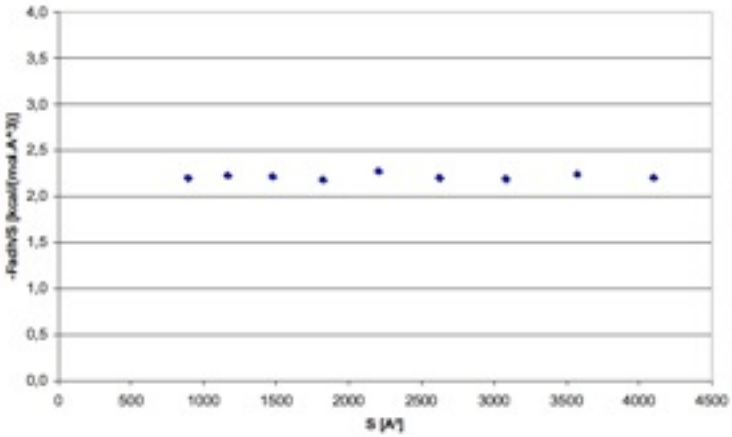


Figure 4.11 : Force d'adhésion fonction de la surface de contact (contact Cu_2O-Cu_2O).

La force d'adhésion est donc le paramètre le plus impactée par la composition différente du matériau (facteur 6 entre la présence ou non d'oxygène). Ceci joue donc un rôle essentiellement sur l'état de surface (contrôlant l'adhésion) que le volume (contrôlant la raideur).

Après étude de l'aire de contact, l'épaisseur des massifs (dz) est étudiée. En faisant le parallèle avec la loi des ressorts montés en séries, il apparaît intéressant d'exprimer non pas la raideur de contact α mais le produit αdz où dz est l'épaisseur du massif considéré.

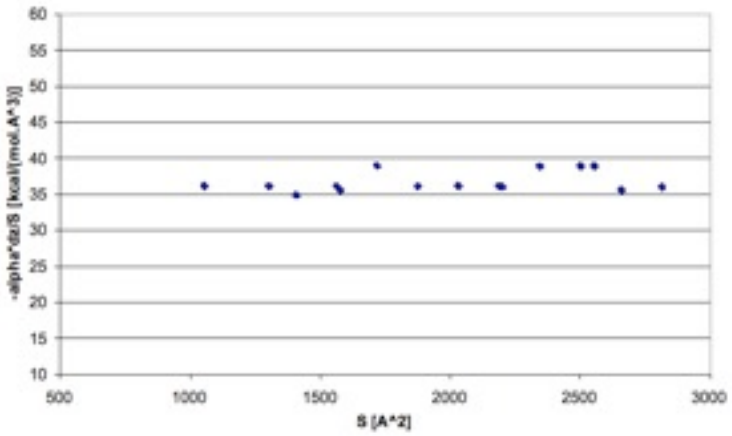


Figure 4.12 : Raideur du contact adimensionnée par les paramètres géométriques (contact Cu-Cu).

La Figure 4.12 montre dans le cas du contact Cu-Cu la constance de la raideur du contact lorsqu'elle est re-dimensionnée par les paramètres géométriques. En revanche, la force d'adhésion s'avère indépendante de l'épaisseur des massifs, ce qui se justifie tout à fait par le fait qu'il s'agisse d'un paramètre essentiellement gouverné par l'état de surface.

3.6 Bilan

En généralisant les résultats présentés précédemment, on peut exprimer les grandeurs suivantes indépendamment des dimensions choisies :

Matériau	$-\alpha.dz/S$ (kcal/(mol.A^3))	$-F_{adh}/S$ (kcal/(mol.A^3))
Cu-Cu	37	30
Cu_2O-Cu_2O	12	2,2

4. Comportement sous sollicitations tangentielles

Comme pour la partie dédiée aux essais mécaniques «normaux», on expliquera ici dans un premier temps les modélisations effectuées, et dans un deuxième temps les résultats obtenus.

Le but des simulations qui suivent est de déterminer les paramètres influents pour la force tangentielle s'opposant au mouvement imposé (frottement par définition). Par commodité, on exprimera la contrainte tangentielle τ comme le rapport de la somme des

forces de chaque atome de la partie encastrée, projetées dans la direction du cisaillement divisée et de la surface du solide (43.3 x 43.3 Å²).

Selon les célèbres expériences de Léonard de Vinci [7] (à une toute autre échelle !...) le coefficient de frottement f (= τ/P_N) est indépendant du chargement normal (P_N) et de l'aire de contact.

A une autre échelle, cette fois-ci celle des micro-rugosités des surfaces, Bowden et Tabor [8] définissent une force de frottement comme le produit de l'aire de contact par une contrainte limite en cisaillement.

A l'échelle du nanomètre, il convient maintenant d'établir l'effet de la pression normale, de l'aire de contact, mais aussi de la vitesse et de la température sur le frottement.

4.1 Mise en place du modèle numérique

La boîte de simulation choisie à des dimensions similaires à celle utilisée précédemment : 43.3 x 43.3 Å pour les deux dimensions de la surface en contact, et 10 Å d'épaisseur pour chacun des deux solides. Le matériau considéré pour les deux surfaces est du cuivre (coefficient de Lennard Jones : ε = 11 kcal/mol et σ = 2.5 Å).

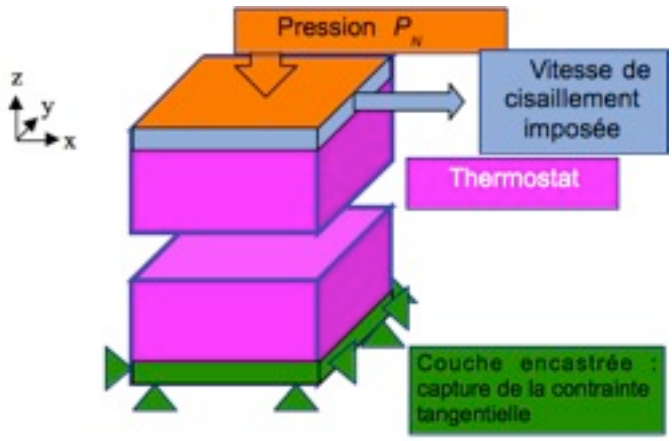


Figure 4.13 : Domaine de simulation et conditions aux limites.

Afin de conserver la géométrie des surfaces pendant le frottement, on choisit pour ces essais des solides suffisamment rigides en fixant la raideur K étudiée plus haut à 6000 kcal/(mol.Å²).

Les conditions limites sont fixées telles que sur la figure 4.13 : le solide inférieur est encastré sur la dernière couche d'atome le constituant, on impose une charge normale au contact (pression P_N), et une vitesse tangentielle (direction x, de 10m/s par défaut). La température des atomes à l'intérieur de la boîte (non contraints en force et déplacement) est fixée à 300K par défaut.

4.2 Définition des surfaces

La géométrie locale des surfaces pourrait jouer un rôle crucial sur le frottement. C'est pourquoi on modélise des surfaces ondulées pour le solide supérieur (pour représenter une rugosité locale à l'échelle nanométrique), grâce à une fonction de type « sinus » (la surface inférieure reste lisse). Plusieurs types de surfaces pourront ainsi être gé-

nérés, avec des oscillations seulement dans la direction x ou à la fois en x et y pour simuler des contacts ponctuels. On notera par exemple **X3** une surface présentant 3 «lignes» de contact (cf. Fig. 4.14)

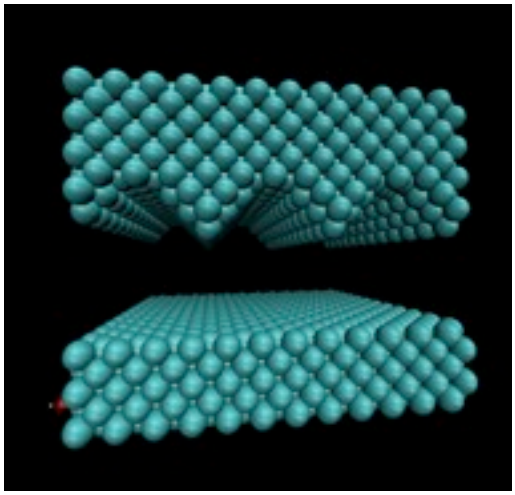


Fig. 4.14 : Exemple d'une simulation « X3 » (trois lignes de contact).

4.3 Mesures numériques

Les simulations numériques de cisaillement de deux solides donnent naturellement une réponse dynamique. La contrainte tangentielle oscille entre deux valeurs, dites « statique » et « dynamique » qui correspondent respectivement à la contrainte à vaincre pour permettre l'initiation du mouvement, et la contrainte pendant le déplacement relatif des massifs. Dans nos essais, si l'oscillation de cette contrainte tangentielle est bien présente, elle est en revanche très bruitée par l'agitation atomique (la température est imposée à 300 K). D'autre part, le but étant de donner à l'échelle supérieure des valeurs suffisamment simples mais représentatives, une moyenne dans le temps de la contrainte tangentielle sera présentée ici.

4.4 Résultats

4.4.1 Effet de l'aire réelle de contact

Lorsque les surfaces « lisses » sont en contact direct, on observe une force tangentielle très grande, équivalente à cisailler un volume de cuivre. A chargement normal nul, le coefficient de frottement est donc infini. C'est pourquoi tous nos essais numériques de frottement sont réalisés avec des surfaces ondulées, comme expliqué plus haut, de manière à mieux représenter la «réalité» du contact. Il reste à identifier l'effet de cette ondulation.

Plutôt que de représenter les aires de contacts réelles (une notion « continue »), on parlera d'aire de contact relative définie comme le ratio entre le nombre d'atome de la surface de contact où s'exerce une force tangentielle, et le nombre total d'atome de cette surface. L'influence de l'aire de contact sur la contrainte tangentielle τ est représentée sur la figure 4.15.

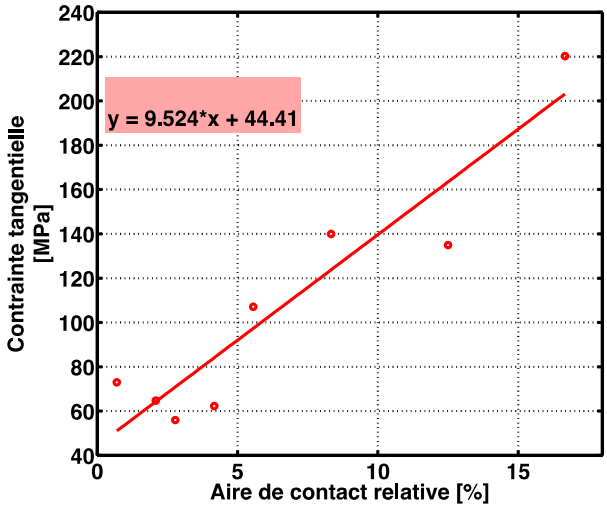


Figure 4.15 : Effet de l'aire de contact sur la contrainte tangentielle (frottement).pour un chargement normal de 1 GPa.

Il apparaît que, en accord avec la loi de Bowden et Tabor et contrairement aux expériences de De Vinci (à une échelle « continue »), la contrainte tangentielle représentant le frottement est bien proportionnelle à l'aire de contact. L'approximation linéaire fournie par la figure 4.15 permettra d'établir la force de frottement à prendre en compte, aux échelles supérieures, en fonction de l'état des surfaces en contact (rugosité).

4.4.2 Effet du chargement normal

On fixe cette fois l'aire relative de contact autour de 8% (surface de type **X2**), et le chargement normal P_N varie. L'influence sur la contrainte tangentielle est représentée sur la figure 4.16.

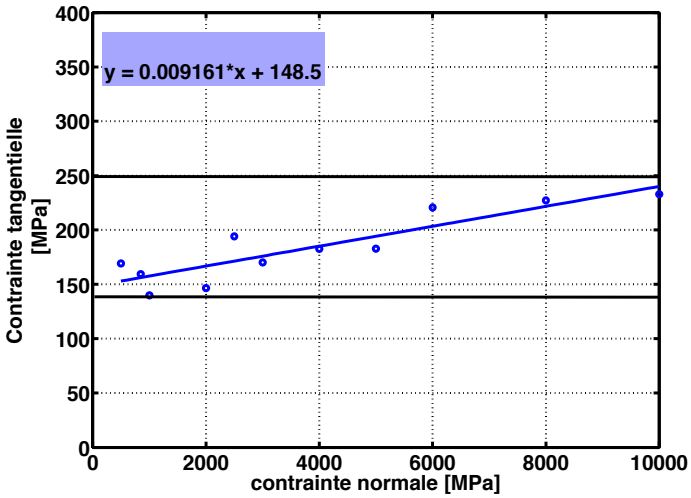


Figure 4.16 : Effet du chargement normal PN sur la contrainte tangentielle τ (frottement). Surface X2 (Aire relative de contact : 8%).

On pourrait remarquer une dépendance linéaire de la contrainte tangentielle τ par rapport à la contrainte normal P_N (ce qui validerait les expériences de Da Vinci et la notion

de coefficient de frottement chère à Amonton et Coulomb [7]). Mais les gammes de variations de ces deux grandeurs sont tout à fait différentes ! Alors que le chargement normal varie de quelques centaines de MPa à 10 GPa, la contrainte tangentielle ne varie que de 100 MPa, soit quasiment deux ordres de grandeurs de différences.

Par la suite nous pourrons donc considérer que la contrainte tangentielle caractérisant le frottement est quasi-indépendante du chargement normal, l'essentielle de la contribution tangentielle apparaissant être une contrainte seuil à franchir (d'environ 148 MPa dans ce cas). Notre résultat à l'échelle nano est donc d'avantage en accord avec la loi de Bowden et Tabor.

4.4.3 Effet de la température

Comme expliqué plus haut, tous les atomes du domaine de simulation qui ne sont pas déjà contraints en force ou déplacement par les conditions aux limites, sont soumis à une température imposée (à cette échelle la notion de température doit être comprise comme une moyenne de l'agitation atomique sur un volume représentatif). En faisant varier la température sur une gamme de 100 K à 500 K, très peu de variation ont été obtenues sur le coefficient de frottement. En revanche, le cas particulier d'une température imposée à 0 K donne une contrainte tangentielle beaucoup plus élevée, comme le montre la figure 4.17.

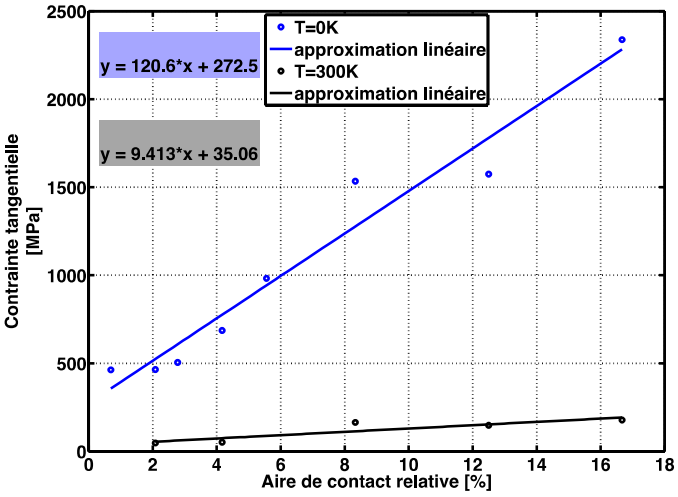


Fig. 4.17 : Effet d'une température nulle sur le frottement.

Ce cas (0 K), qui aurait pu être envisagé pour simplifier l'étude en évitant de rajouter un paramètre de température supplémentaire, est en fait à éviter car il représente une situation bien particulière. En effet, fixer une température nulle revient à « rigidifier » le domaine atomique en empêchant toute vibration. La simulation de frottement d'un solide sur l'autre, pour laquelle des atomes doivent franchir une barrière énergétique afin de passer d'une position stable à une autre devient très contrainte. En permettant aux atomes de « naviguer » autour de leur position d'équilibre, la translation relative des deux massifs solides devient plus aisée, et la contrainte tangentielle décroît.

4.4.4 Effet de la vitesse tangentielle imposée

Le dernier paramètre de nos simulations numériques est la vitesse tangentielle imposée. Son influence sur la contrainte tangentielle est montrée dans la Figure 4.18.

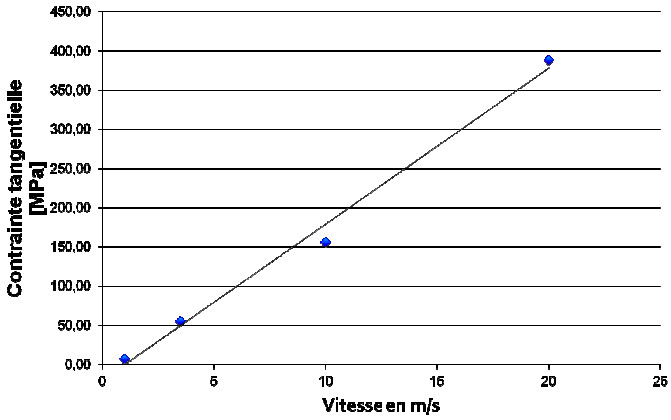


Fig. 4.18 : Effet de la vitesse tangentielle

Chacun des points résultat montré sur la Figure 4.18 a été obtenu pour une distance de glissement équivalente, c'est-à-dire que le temps de simulation est inversement proportionnel à la vitesse.On pourra donc définir une dépendance linéaire de la contrainte tangentielle par rapport à la vitesse de glissement imposée.

4.5 Bilan

On peut donc synthétiser les résultats numériques concernant la réponse en frottement du cuivre à l'échelle nanométrique par une loi du type :

$$\tau=(5.10^{24}\ A+44.10^{5})V$$

en remplaçant l'aire relative par l'aire absolue A en m^2 (il s'agit de l'aire réelle de contact, en tenant compte des aspérités nanométrique), avec τ en Pa et V la vitesse tangentielle en m/s. On admet alors, en cohérence avec les analyses déduites des figures 4.19, 4.18 que le chargement normal et la température (non nulle) n'ont pas d'influence significative.

PARTIE 5

GT5 - Changement d'échelle

INTRODUCTION

Les objectifs de ce groupe de travail sont doubles. Le premier est de coordonner les différents dialogues entre les échelles B, C et D que ce soit par couplage faible ou couplage fort. Le second est d'identifier et de quantifier, si possible, les critères utilisés expérimentalement.

Un application est également dédiée à la caractérisation du temps de régularisation utilisé dans les modèles éléments-finis grâce à des simulations discrètes effectuées à une échelle inférieure.

Rappel des différentes tâches
Tache 5.1 : Formulation et mise en donnée de cartographie numérique entre l'échelle macroscopique B et l'échelle mésoscopique C. **Tache 5.2** : Formulation et mise en donnée de cartographie numérique entre l'échelle macroscopique C et l'échelle mésoscopique D. **Tache 5.3** : Développement numérique pour la mise en place d'un couplage fort (explicite) entre échelles. Il s'agira de réaliser les interfaces nécessaires entre les codes de calculs utilisés aux différentes échelles afin de gérer automatiquement ce dialogue. **Tache 5.4** : Formulation théorique et algorithmique du couplage fort. **Tache 5.5** : Caractérisation du « temps de régularisation » des lois de contact type Prakash-Clifton. Cet applicatif fera office de livrable pour la tâche 5.5.

1. METHODOLOGIE

Afin de prendre en compte l'information venant de l'interface à l'échelle des premiers corps deux types d'approches sont possibles.

La première que nous baptiserons «dialogue» consiste à moyenner des grandeurs micro (échelle de l'interface) et d'injecter ces valeurs dans un modèle macro. L'avantage de cette démarche est d'avoir une représentation plus riche de l'interface (création de particules de troisième corps de façon dynamique).

La seconde approche possible, baptisée«couplage» consiste à combiner modèle de premier corps et modèle d'interface au coeur d'un même simulation. Cette approche ne permet pas d'avoir une représentation très fine de l'interface mais permet déjà d'appréhender un milieu discontinu et hétérogène au coeur de l'interface. Cependant l'inter-

face utilisée est déjà présente au coeur du contact et ne vas pas évoluer (pas de création de particules).

Nous présentons ici une synthèse des travaux effectués en utilisant les deux approches.

2. DIALOGUE NUMERIQUE

2.1 Introduction

L'approche baptisée «dialogue» consiste à moyenner des grandeurs micro (échelle de l'interface) et d'injecter ces valeurs dans un modèle macro. L'avantage de cette démarche est d'avoir une représentation plus riche de l'interface (création de particules de troisième corps de façon dynamique). L'étude proposé ci-dessous présente une première approche mise en place durant ce projet et qui n'a pas pu être abouti. Sa mise en place a été réalisé sur un modèle réduit afin de valider la démarche.

La méthode utilisée à l'échelle de l'interface s'appuie sur l'approche Non Smooth Contact Dynamics citée précédemment utilisant cette fois-ci un modèle de zone cohésive comme loi d'interaction afin de donner à l'échantillon un comportement continu avec la possibilité de se dégrader.

L'approche utilisée à l'échelle des corps en contact se base sur l'approche semi-implicite proposée par Carpenter et al (1991) utilisant un traitement explicite de la dynamique et un traitement implicite du contact. Le contact est géré par multiplicateurs de Lagrange et frottement de coulomb dans un premier temps. Les codes de calcul LMGC90 et PLAST2D sont utilisés. Afin de valider l'approche.

2.2 Principe

Le dialogue numérique proposé repose sur trois étapes :

Etape 1 : une première simulation éléments finis est réalisée en utilisant un coefficient de frottement de Coulomb constant afin de déterminer la force normale au contact en chaque noeud [r_n^{min} ; r_n^{max}] ainsi que la vitesse de glissement [v_t^{min} ; v_t^{max}] au contact.

Etape 2 : des simulations ED sont réalisées sur un échantillon représentant un élément du maillage EF. Les conditions limites (force et vitesse de cisaillement appliquées) sont issues des valeurs déterminées à l'étape 1 . Les paramètres de la loi CZM retenus permettent au modèle discontinu d'avoir les mêmes propriétés que le modèle continu. Le coefficient de frottement global μ est calculé en fonction du temps et est fonction du couple [r_n ; v_t].

Etape 3 - Une seconde simulation EF est réalisée en utilisant le coefficient de frottement issu des simulations ED où chaque noeud en contact possède son historique de frottement.

Avec ce dialogue numérique, il est bien évidemment que seuls les débits source et interne de troisième corps sont pris en compte. Les modèles ED et EF étant avec des conditions aux limites périodiques, le débit d'usure n'est alors pas pris en compte.

2.3 Choix des modèles

2.3.1 Généralités

A l'échelle globale, le premier corps est considéré continu et modélisé par éléments finis. Il est construit et traité par une condition périodique (homogénéisation longitudinale). Il est soumis à des sollicitations tribologiques (compression et cisaillement) au cours de la simulation.

A l'échelle du troisième corps, le milieu discontinu est modélisé par éléments discrets. Le comportement élastique avec endommagement du matériau est défini par une loi CZM (Cohésive Zone Model) permettant d'avoir un modèle continu équivalent pouvant naturellement se dégrader au travers d'un paramètre d'endommagement β.

2.3.2 Echelle globale

Le cas de référence (cf. Fig. 5.1) est un modèle 2D de 32000 éléments, représentant le contact entre un parallélépipède élastique (E = 10000MPa,n = 0:3) aux frontières latérales périodiques et une surface rigide. Une force verticale est appliquée sur la frontière supérieure du parallélépipède, et la surface rigide est animée d'une vitesse constante. Les surfaces de contact sont lisses.

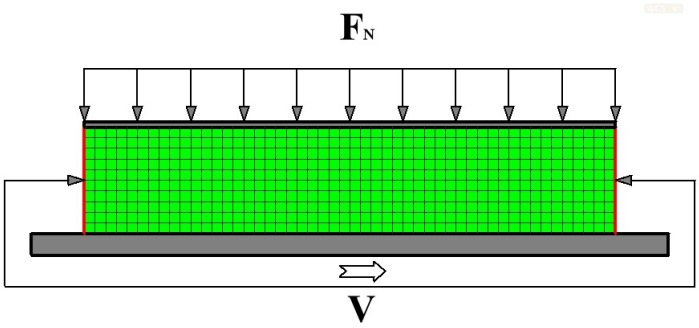


Fig. 5.1 : représentation du modèle FEM

Au cours de l'étape 1, le coefficient de frottement de type Coulomb reste constant dans la simulation, mais différentes valeurs sont utilisées (0:1;0:3;0:5 et 0:9) afin d'évaluer l'influence de μ sur le comportement global du système.

2.3.3 Echelle locale

Le modèle par éléments discrets est d'une taille égale à celle d'un élément du maillage éléments finis (50μm × 50μm). Il est constitué de 5600 disques rigides dont le diamètre moyen est de 0.7μm.

Afin d'obtenir un comportement mécanique similaire à celui du milieu continu modélisé par éléments finis, les paramètres de la loi de contact local CZM entre particules, ont été adaptés pour retrouver les paramètres mécaniques (E = 10 000MPa, ν = 0.3) utilisés à l'échelle globale. La figure 5.2 montre la relation contrainte - déformation d'un test de traction uni-axiale, dans laquelle, le module Young E a été considéré lorsque la déformation ε depasse 0.2% pour éviter les effets de chocs locaux existant dans la mise en charge de la traction.

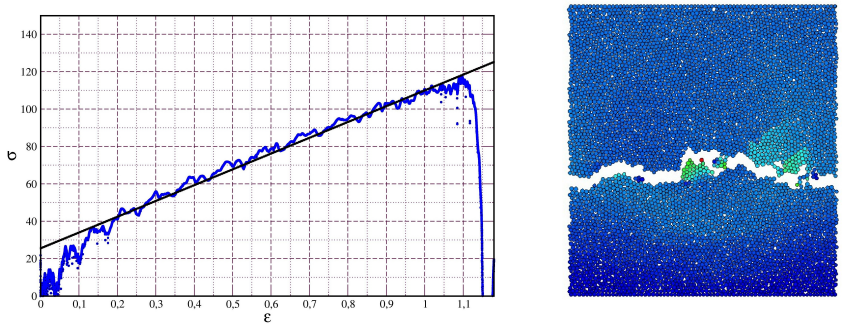


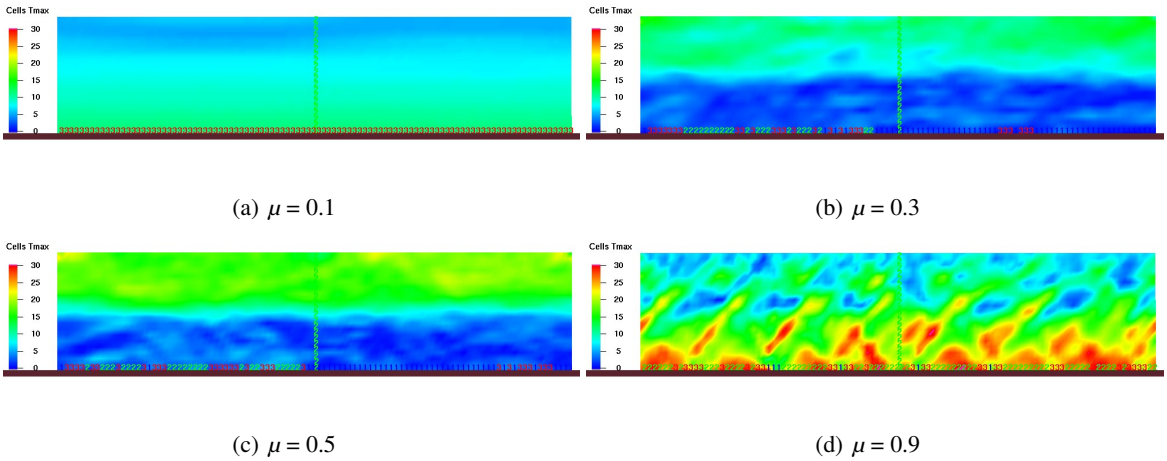
Fig. 5.2 : (à gauche) relation contrainte-déformation lors d'un essais de traction utilisé pour identifier les paramètres locaux; (à droite) visualisation de l'échantillon en fin d'essais (i.e. après rupture).

Une fois les paramètres identifiés, le système est soumis à sollicitations dynamique (en compression et cisaillement) pour une simulation prenant en compte la dégradation du milieu continu discret.

2.4 Résultats

2.4.1 Frottement limite

Pour le cas de référence (étape 1), lorsque le coefficient de frottement de type Coulomb est constant, différents tests ont été réalisés avec différentes valeurs de frottement ($\mu \in [0.1 - 0.9]$). Des instabilités de type "adhérence – glissement - décollement" apparaissent au niveau du contact et semble dépendre d'une valeur seuil. Cette valeur seuil v_{seuil} est égale à 0.3 (cf. Fig. 5.3). Quand la valeur du frottement est plus faible que la valeur seuil, on n'observe que des instabilités de type *adhérence/glissement* ou "*glissement*". Au-delà ce cette valeur, on observe l'apparition des trois régimes plus ou mois rapidement.



(a) $\mu = 0.1$ (b) $\mu = 0.3$

(c) $\mu = 0.5$ (d) $\mu = 0.9$

Fig. 5.3 : Visualisation des instabilités de contact pour différents valeurs de frottement.

Pour illustrer ces instabilités, on peut observer la trajectoire du nœud milieu de la structure déformable (cf. Fig. 5.4). On remarque que le déplacement suivant le sens de cisaillement , noté Dx, est proportionnel au frottement de Coulomb.

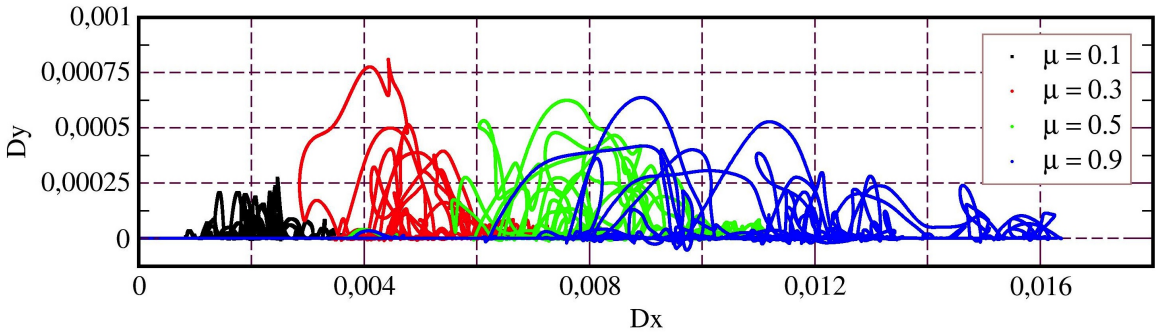


Fig. 5.4 : déplacement du noeud central de la structure déformable en fonction de la valeur de μ local.

Lorsque la valeur de frottement dépasse le seuil de 0.3, le déplacement Dy devient plus important (décollement). Contrairement à la valeur Dx maximale, la hauteur Dy maximale ne semble pas être reliée directement à la valeur de μ. Elle semble être indépendante de μ et est probablement liée plus aux sollicitations et à la déformation du matériau.

2.4.2 Modèle discret, usure et frottement

Dans les simulations par éléments discrets, le coefficient de frottement macroscopique va intégrer toutes les composantes que l'on aura mis dans le modèle. Ceci comprends aussi bien les lois d'interaction entre particules dans le volume et à la surface cisaillée, la disposition géométrique, les sollicitations tribologiques mais aussi la rugosité de l'interface. Afin de reproduire des instabilités, nous avons vu lors de l'étape 1, que le frottement local moyen devait être supérieur ou égal à 0.3. Il faut donc à l'échelle locale retrouver cette valeur.

Les conditions macroscopiques et la géométrie étant fixés, deux aspects sont alors à considérer : les rugosités et la cohésion à l'interface. Au cours de simulation, la dégradation du modèle est mesurée par la variable β^T qui représente la somme des β de chaque contact. A cette grandeur moyenne, on y associe une variable βi (cf. Fig. 5.5) qui est la somme des β agissant sur une particule divisé par le nombre de contact initial. Ainsi sur la figure 5.5 (gauche), on observe un endommagement total si $\beta = 0$ (bleu), partiellement $0 < \beta < 1$ ou nul si $\beta = 1$ (rouge).

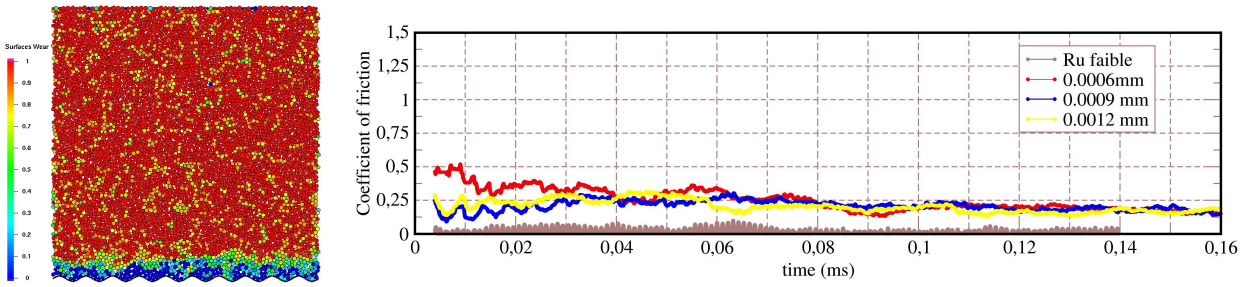


Fig. 5.16 : (gauche) visualisation de la couche de troisième corps produite lors d'un essais de cisaillement et (droite) évolution du coefficient de frottement global pour différentes rugosités

Sur la figure 5.5 (droite), il apparait que la rugosité de la surface frottante influence uniquement les valeurs initiales du frottement ($t \leq 0.1$ms) . En fin de simulation, l'effet rugosité est gommé par les particules dégradées et les différentes simulations convergent toute vers la même valeurs du frottement ($\mu \approx 0.18$). Les particules dégradées interagis-

sant par une simple loi de contact unilatéral (pas de frottement ni de cohésion), le milieu est très pulvérulent, bouche les rugosités, et sert de lubrifiant solide préservant la dégradation du milieu.

Les rugosités seules ne permettent donc pas d'atteindre des valeurs de frottement macro $\mu > 0.2$. Pour cela, il faut donc introduire de la cohésion au niveau des particules détachées (cf. Fig. 5.6).

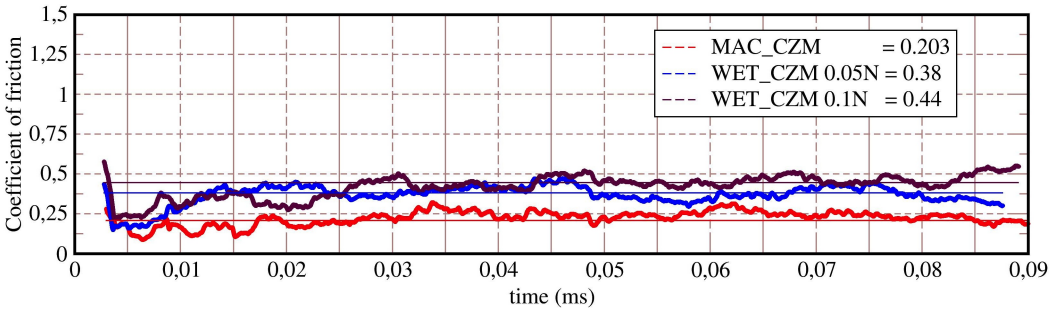


Fig. 5.6: évolution du coefficient de frottement global en fonction de la cohésion agissant entre particules constituant le troisième corps.

Sur cette figure, on montre l'évolution du frottement global pour 3 valeurs différentes de cohésions. La courbe rouge correspondant au cas sans cohésion après endommagement (CZM avec $\gamma = 0.0$N) conduit à une valeur du frottement faible. Les courbes bleue et le noire obtenues pour des valeurs de cohésions $\gamma = 0.05$N et de $\gamma = 0.1$N fournissent des valeurs de frottement plus significative. Ces résultats rejoignent ceux de la littérature, observant une augmentation de μ avec la cohésion.

2.5 Conclusion

Dans la démarche de l'approche baptisé «dialogue», il est donc possible de déterminer un modèle micro représentant un volume élémentaire d'un modèle macro en prenant à la fois les propriétés matériaux et en caractérisant un état de surface en terme de rugosité et de propriétés adhésive du troisième corps. Cette démarche permet d'avoir une représentation plus riche de l'interface (création de particules de troisième corps de façon dynamique) qui peut servir à enrichir les modèles macros.

3. COUPLAGE DISCRET/CONTINU

3.1 Introduction

L'approche NSCD utilisée lors du GT3 est utilisée ici. En effet cette approche permet de simuler naturellement des systèmes composés de particules rigides et de corps déformables. Ainsi afin de faire un parallèle avec les résultats expérimentaux, les modèles utilisés lors du GT2 sont ici utilisés en injectant un milieu discret à l'interface de contact (cf. Fig. 5.7).

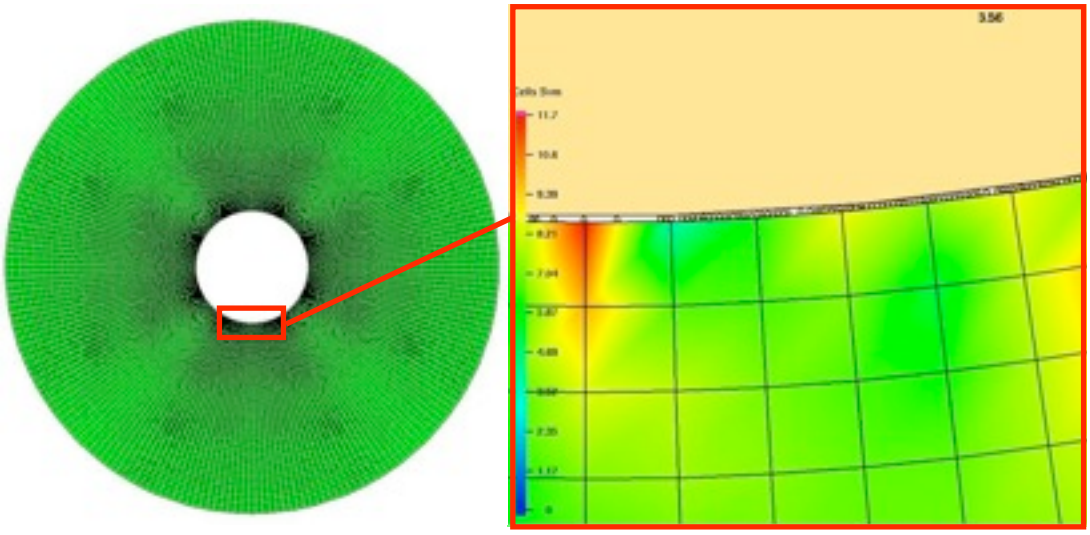


Fig. 5.7 : Modèle utilisé pour le couplage discret/continu

En utilisant alors ce couplage dit direct, il est alors possible de faire un parallèle avec les résultats expérimentaux obtenus dans le GT1 et comparer également les résultats du GT2 concernant les instabilités de contact.

3.2 Cadre numérique

3.2.1 Formulation globale

Dans l'équation [3.2] présentée dans la partie 3, l'opérateur de Delassus **W** est présenté comme étant le produit de l'inverse de la matrice de masse **M** et des matrices de passage **H** et **H**^{T}**.** Cette formulation est valable aussi bien dans le cas rigide que dans le cas déformable, sous-entendu que l'approche utilisé dans le GT3 peut-être directement utilisé ici. Seule la matrice de masse est différente, mais concernant la résolution du problème de contact il n'y a pas de différence. Ainsi, si les corps sont rigides, le couple formé par la matrice de masse et la vitesse libre est donné par:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbb{M}} = \mathbb{M} \\ \dot{\mathbf{q}}_i^{libre} = \tilde{\mathbb{M}}^{-1}(h(1-\theta)\mathbf{F}_i^{ext} + h\theta\mathbf{F}_{i+1}^{ext}) \end{cases} , \qquad \textbf{[5.1]}$$

et si les corps sont déformables, il est donné par :

$$\begin{cases} \tilde{\mathbb{M}} = \mathbb{M} + h\theta\mathbb{C} + h^2\theta^2\mathbb{K} \\ \dot{\mathbf{q}}_i^{libre} = \tilde{\mathbb{M}}^{-1}(h(1-\theta)\mathbf{F}_i^{ext} + h\theta\mathbf{F}_{i+1}^{ext} + h\mathbf{F}^{int}(\mathbf{q}_i + \theta\dot{\mathbf{q}}_i, \dot{\mathbf{q}}_{i+1})) \end{cases} , \textbf{[5.2]}$$

où **C** et **K** représentent respectivement la matrice de viscosité et de rigidité, **F**^{int} représente la force intérieure d'un corps déformable. Plus de détails peuvent être trouvés dans les travaux originaux Jean [CMAME1999].

3.2.1 Formulation locale

A cette mise en équation globale, il ne faut oublier que l'on doit traité un problème de contact, il faut alors traité et définir le contact entre les particules représentant l'interface et les éléments frontières du maillage.

Pour cela on définit sur les mailles en périphérie un contacteur *ligne* permettant au particule d'interagir avec le maillage (cf. Fig. 5.8).

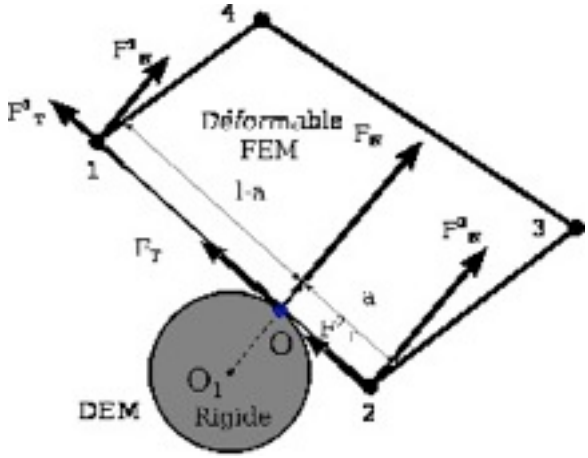


Fig. 5.8 : contact entre particule rigide et corps déformable

Le point de contact entre la ligne associée à la maille et la particule rigide s'obtient par projection suivant la normale à la ligne du centre d'inertie de la particule sur la ligne. La force de contact résultante est alors répartie en les noeuds associés à la ligne par une simple pondération. Si A1 et A2 représentent les noeuds associés à la ligne et I le point de contact alors, on note ||A1I||=l-a et ||A2I||=a et :

$$\begin{cases} \mathbf{F}(A1) = \dfrac{l-a}{l}\mathbf{r} \\ \mathbf{F}(A2) = \dfrac{a}{l}\mathbf{r} \end{cases} \qquad \textbf{[5.3]}$$

où l'on rappelle que **r** est la force au contact.

3.3 Modèle numérique

Le modèle utilisé est celui présenté sur la figure 5.8. Le premier corps est le disque utilisé lors du GT2 avec un maillage constitué de 15400 éléments. Le matériau utilisé est un matériau élastique avec amortissement de Rayleigh utilisant les mêmes coefficient que ceux définis par le GT2. Le module de Young est de 2300Pa et le couple (α,β) = (40, 4.5~10^{-7}). Le deuxième corps est un cylindre rigide de 20.5mm de diamètre.

Les particules numériques constituant le troisième corps ont un diamètre de 30µm et forment une couche d'épaisseur d'environ 60µm conformément aux observations faites dans le cadre du GT1 (cf. Fig. 5.9).

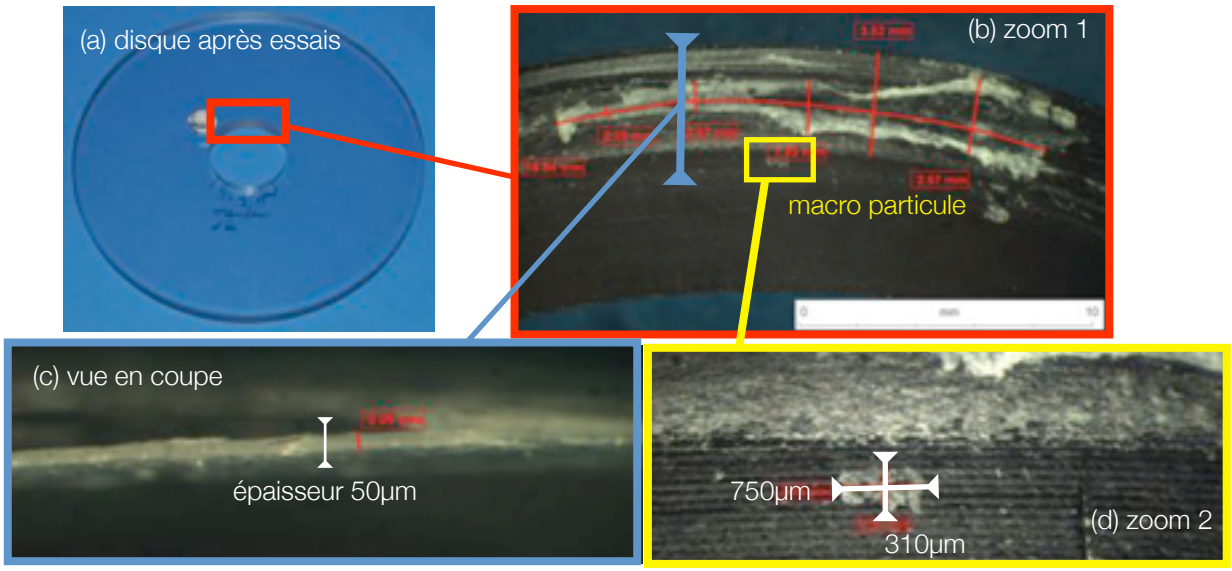


Fig. 5.9 : Analyse expérimentale des particules de troisième corps sur un disque après essais (a).: analyse de la zone de contact (b), mesure de l'épaisseur de la trace (b) et observation d'une macro-oarticule (d)

La figure 5.9 montre les observations faites sur la piste de frottement après essais. Cette piste à une épaisseur de 50µm (cf. Fig. 5.9c) et peux avoir une longueur de plus de 10mm cf. Fig. 5.9b). Enfin on observe sur la figure 5.9d une macro-particule composée d'un assemblage de micro-particule. C'est ces macro-particule qui seront représentées dans le modèle numérique et également vue comme un ensemble de particules numériques, mais en soulignant qu'une micro-particule expérimentale ne sera pas forcément une micro-particule numérique.

Les conditions de simulations sont identiques à celles du GT2.

3.4 Résultats

3.4.1 Macro-particule et régime d'instabilités

Une première simulation est effectué avec une seule macro-particule constituée de 23 éléments. Pendant la durée de la simulation, on suit la trajectoire de points situés dans quatre zones d'intérêt représentées sur la figure 5.10 comme les zones A, B, C et D. Les zones A,C et D sont vierges de particules tandis que la macro-particule est localisée dans la zone B.

On observe des comportements similaires dans les zones sans particules, i.e les points décrivent des orbites autours d'une position moyenne. Ces mouvements sont équivalents à ceux obtenus en l'absence de macro-particule (cf. Fig. 5.11). En l'absence de macro-particule, les résultats sont moins bruités, mais la fréquence est l'amplitude des trajectoire sont les mêmes.

L'évolution du point appartenant à la zone B est plus irrégulière et de plus forte amplitude. En présence de particules le point de mesure subit le mouvement de l'interface roulante et sa trajectoire est parasité.

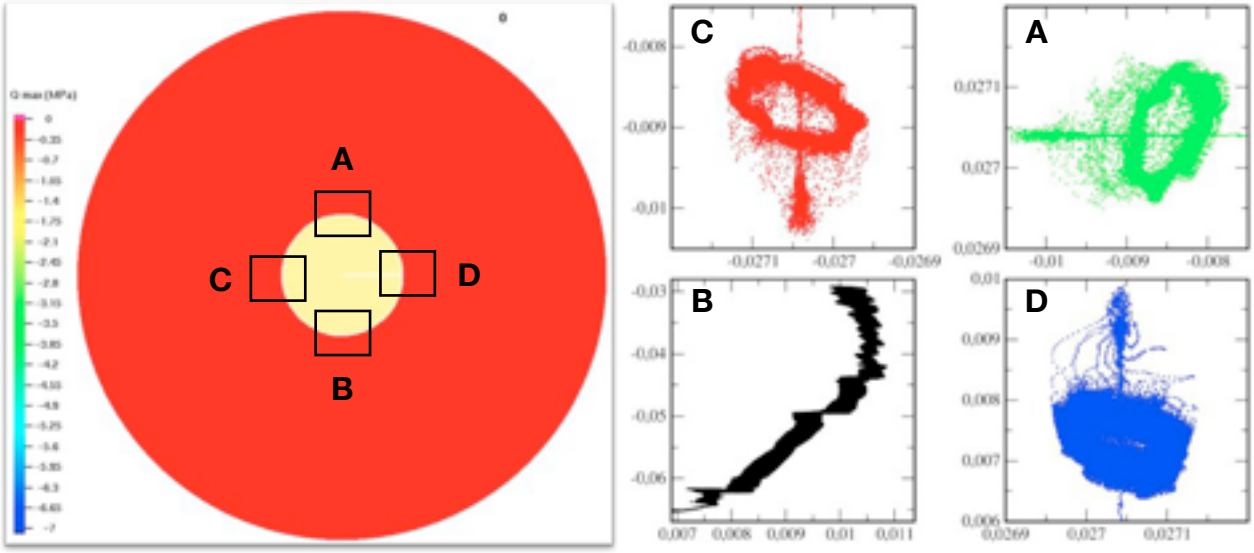


Fig. 5.10 : trajectoire de différents noeuds du maillage en présence d'une macro-particule

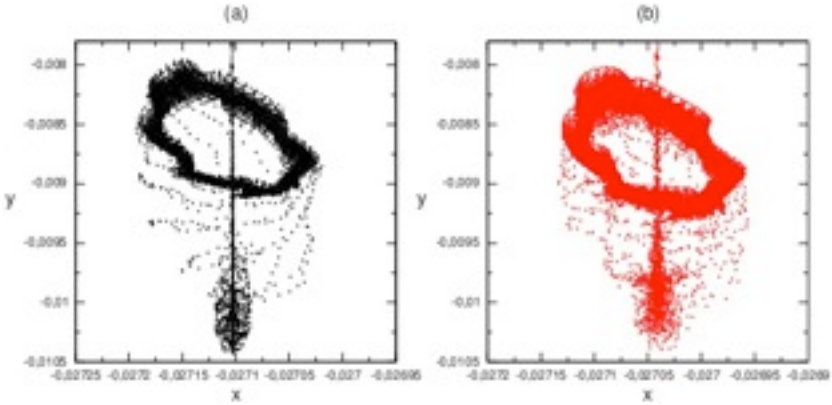


Fig. 5.11 : trajectoire du noeud D sans (a) et avec (b) macro-particule

3.4.2 Influence de la taille des macro-particules

Suite à ces premières observations, des simulations on été effectués en faisant varier la longueur de la macro particule située dans la zone B. Trois valeurs sont utilisées: 0.36mm (a), 10.73mm (b) et 16.80mm (c) (cf. Fig. 5.12).

En observant la contrainte de cisaillement maximale dans le disque on peut remarquer plusieurs choses. La première est que plus la macro particule est grande plus la zone d'influence est grande. Deuxièmement, la valeur maximale de la contrainte de cisaillement n'est pas nécessairement obtenu pour la plus petite taille de particule (cas a).

En effet, pour la macro-particule de grande taille (cas c) on voit apparaître deux localisations à fort contrainte due à une séparation des particules contrairement La macro-particule de taille intermédiaire (cas b) semble avoir une taille critique ne favorisant pas la séparation des micro-particules, préservant ainsi le cisaillement à l'interface.

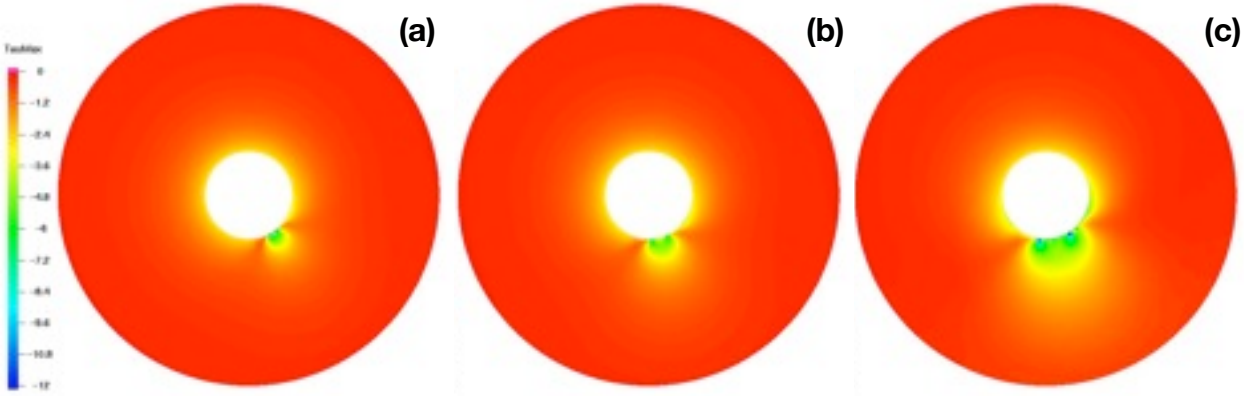


Fig. 5.12 : influence de la longueur d'une macro particule sur la contrainte de cisaillement maximale

On peut alors supposer qu'en l'absence de débit d'usure, la macro-particule va tendre vers une taille critique afin de limiter les contraintes à l'interface et que pour des tailles plus importantes elle n'hésiteras pas à se séparer pour retrouver une taille plus petite.

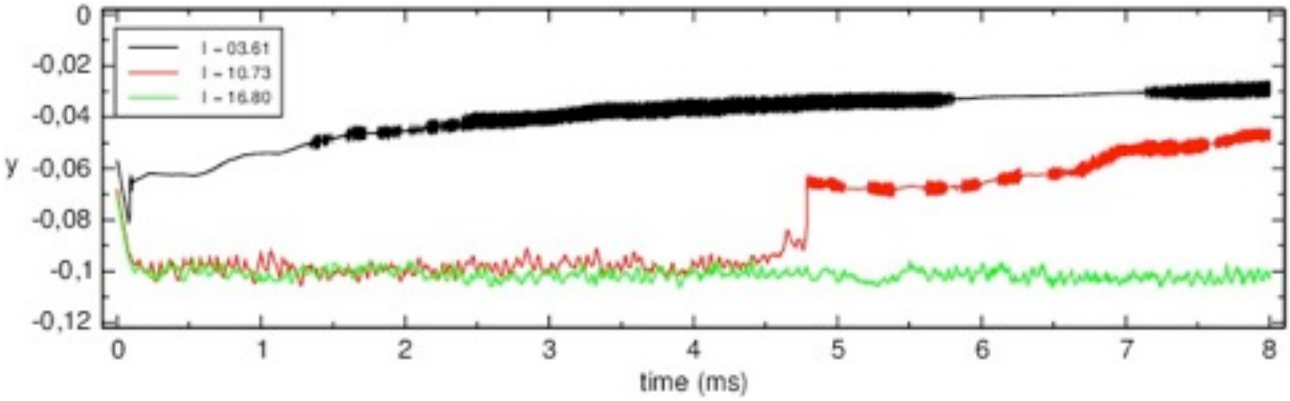


Fig. 5.13 : évolution de la position suivant y du noeud situé en zone B

Si l'on observe la figure 5.13, on remarque que même si la macro-particule reste «compacte», celle-ci migre plus ou moins dans le contact libérant ainsi la zone du maillage de l'influence de la particule et pouvant ainsi retrouver un mouvement «orbital».

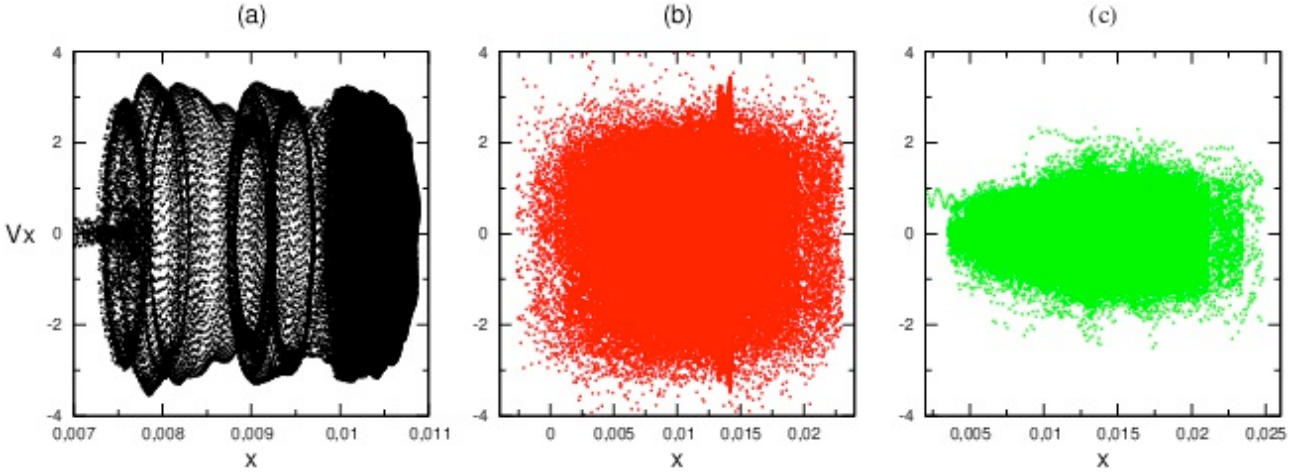


Fig. 5.14 : portrait de phase (point B) pour les macro-particules de 3.6mm (a), 10.71mm (b) et 16.80mm (c).

On retrouve ce comportement avec la figure 5.14 représentant l'évolution de vitesse suivant x (vitesse tangentielle) suivant la position suivant x (portrait de phase). Pour la macro-particule de 3.6mm (cf. Fig. 5.14a), on retrouve des orbitales caractérisant un mouvement oscillatoire périodique. Pour la macro-particule de 10.71mm (cf. Fig. 5.14b), un observe un signal en grande partie bruitée mais avec une apparition de trajectoire périodique pour une position autour de 0.015. Enfin, pour la macro-particule de 16.40mm (cf. Fig. 5.14b), le signal reste bruité sans apparition de trajectoire périodique. Ceci est en parfaite adéquation avec les observations faite sur la figure 5.13.

3.4.3 Compétitions entre deux macro-particules / confrontation expérimentale

Pour achever cette partie l'approche numérique couplée est confrontée aux résultats expérimentaux obtenus dans le cadre du GT1. Pour cela on introduit deux macro-particules dans les zones A et B (cf. Fig. 5.15).

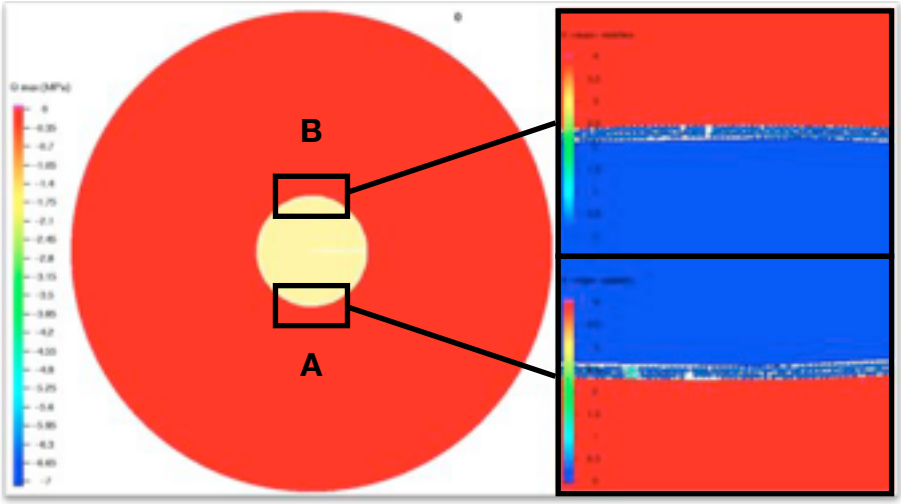


Fig. 5.15 : localisation des deux macro-particules pour la confrontation numérique/expérimental

La macro-particule de la zone A contient 628 particules et celle de la zone B 203. Lors de la simulation on observe les plans de phase pour les zone A, B de la figure 5.15 et les zones C et D de la figure 5.10. Les plans de phase des zones C et D sont caractéristiques d'une succession d'état adhérent, glissant et décollé du noeud étudié. Les noeuds correspondant ont un comportement similaire (au signe près). Dans les zones A et B les orbitales sont beaucoup plus marquées, traduisant des régimes périodiques et sationnaires.

Sur la partie droite de la figure 5.15, on peut regarder le champ de contrainte de cisaillement maximale en fin de simulation ainsi que le statut des noeuds en contact. On

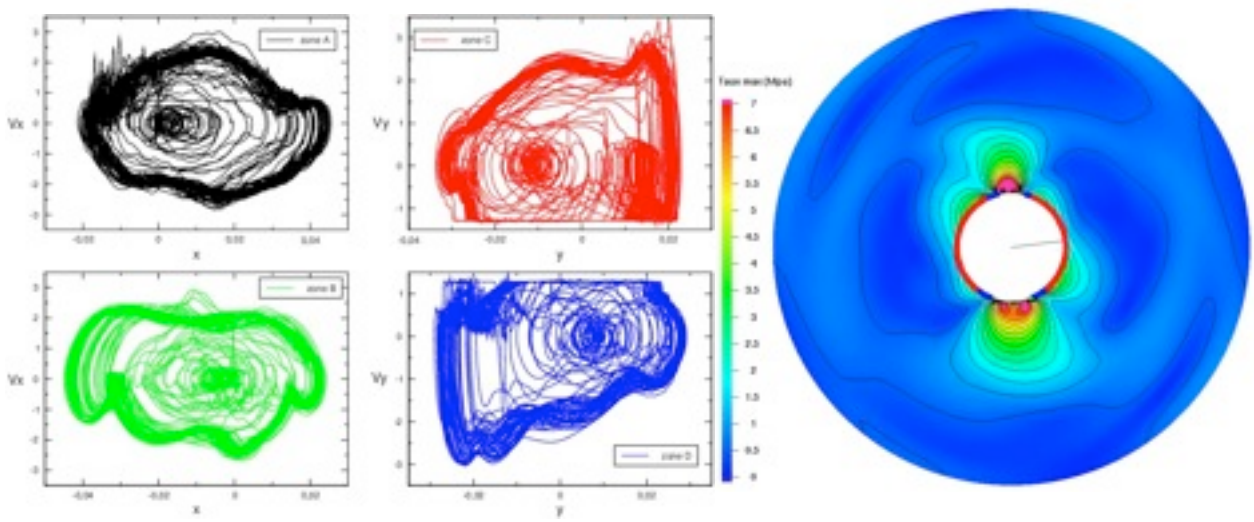


Fig. 5.16 : (gauche) plan de phase pour les zones A, B, C et D et (droite) visualisation des contraintes de cisaillement

observe tout d'abord une concentration de contraintes au niveau des zones d'intérêt (zone A et B). A la limite de ces zones, les noeuds en contact ont un statut décollé (du à la proximité des particules et ont observe un état glissant pour les autres noeuds en contacts.

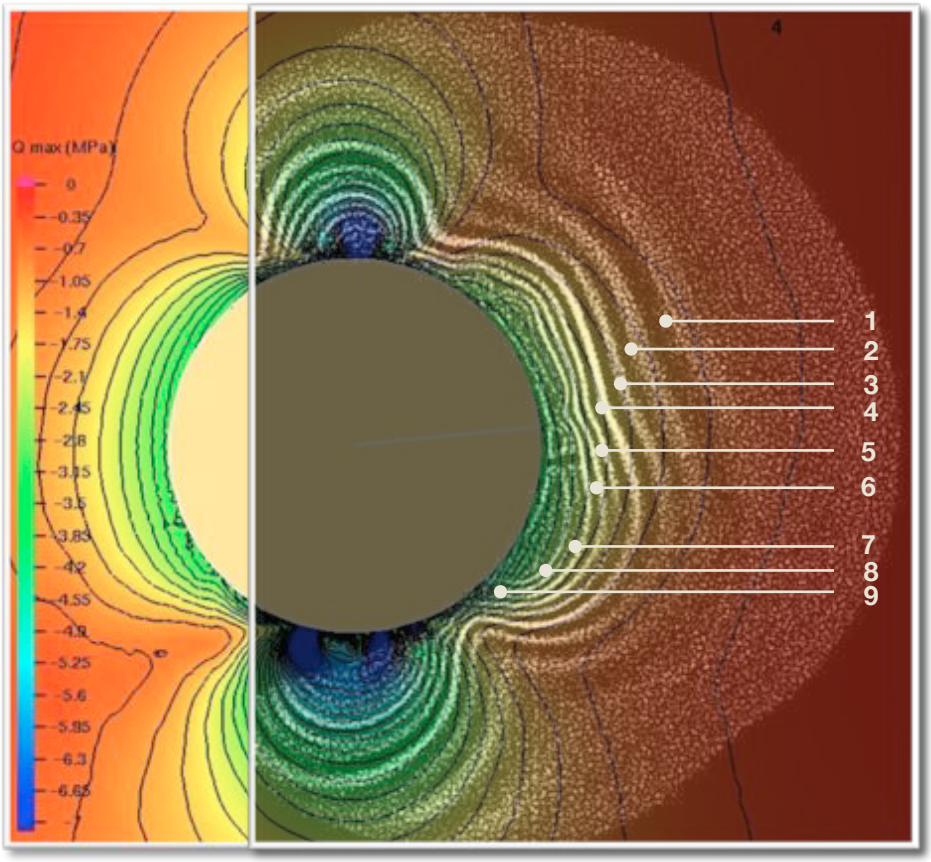


Fig. 5.17 : sur la gauche, modèle numérique avec un zoom sur l'interface de contact avec visualisation des contraintes de cisaillement maximales et sur la droite, modèle expérimental avec zoom sur l'interface de contact et visualisation des franges par photo-élastimétrie (Tmax = 0.35Mpa/ordre).

Pour finir on superpose résultats numérique et expérimentaux (cf. Fig. 5.17). En faisant un zoom sur l'interface de contact, il est alors possible de comparer avec précision les simulations numériques utilisant des macro-particules introduites artificiellement et le modèle expérimental générant naturellement des particules de troisième corps. La comparaison montre une très bonne corrélation entre les deux modèles en terme de régimes d'instabilités et de valeur de contraintes. Le nombre d'ordre (associé aux franges) donne un niveau équivalent au contrainte des modèles numériques.

3.5 Conclusion

La première approche «multi-échelle», baptisée «couplage direct» combinant modèle de premier corps et modèle d'interface au coeur d'un même simulation permet d'appréhender un milieu discontinu et hétérogène au coeur de l'interface. Même si l'interface utilisée est déjà présente au coeur du contact et ne vas pas évoluer (pas de création de particules), elle permet de mettre en évidence l'utilisation d'outil de mesure permettant de «repérer» les particules via les instabilités dynamiques et permet d'avoir des résultats pas uniquement qualitatifs mais aussi qualitatif puisque la comparaison avec les taux de contraintes expérimentaux sont en très bonne adéquation. Nous verrons dans la conclusion bilan les perspectives de ce travail.

PARTIE 6

BILAN

CONCLUSIONS

Le projet ANR-DiNEET a durée trois ans. Les différents groupes de travail ont fournit des résultats qualitatifs et quantitatifs et ont peu noter de nombreuses interaction entre les GT.

L'étude du GT1 sur l'interaction instabilité de contact et couche de troisième corps a permis de conclure que les instabilités de contact sans troisième corps « visible » ont pu être reproduite numériquement par le modèle élément fini utilisé dans le GT2. Lorsque que de nombreuses particules de troisième corps sont « visibles » dans le contact, l'état de contrainte de cisaillement maximal du disque à proximité du contact augmente fortement (plus de 10 fois), cette augmentation a pu être reproduite numériquement en introduisant les dimensions des particules réelles dans un modèle couplant Eléments Finis et Eléments discrets développé en lien avec les GT2 et GT3. Finalement, une compétition entre instabilités de contact et évolution de la couche de troisième corps a été mise en évidence. Outre le maintien ou non des instabilités de contact, cette évolution se traduit aussi sur la tendance haussière ou baissière du couple résistant au contact.

Les modèles numériques des premiers corps du GT2 ont été validés grâce à une convergence obtenu grâce à l'introduction de l'amortissement structurel calculé expérimentalement. Ils ont ainsi permis de simuler l'instabilité de crissement avec le modèle non-linéaire via une analyse temporelle. L'analyse modale précontrainte a permis l'analyse de la dynamique du système et l'individuation du mode instable, excité par les forces de frottement. Enfin la comparaison avec les résultats expérimentaux permet la validation en amplitude et en fréquence des simulations numériques ; les mêmes instabilités avec les mêmes niveaux de vibrations ont été mesurées et calculées. De plus, la simulation temporelle effectuée à l'échelle des premiers corps permet le calcul des données nécessaires pour effectuer des simulations à l'échelle de l'interface (données ne pouvant pas être obtenues expérimentalement).

Dans le GT3, nous nous sommes intéressés à étudier la rhéologie du troisième corps dans des écoulements confinés tridimensionnels. L'influence de la description (rigide/déformable) du premier corps supérieur, de la cohésion et de la loi de contact sur le comportement global du troisième corps ont été mis en avant. Nous avons montré une grande influence de la cohésion locale et de la loi de contact sur la rhéologie, le frottement macroscopique et les profils de vitesse et de contrainte. La description (rigide/déformable) est peu influente sur le coefficient de frottement macroscopique et les profils de contrainte mais beaucoup plus influente sur les profils de vitesse. Ceci souligne donc l'importance d'avoir la donnée d'une loi d'interaction micro afin de pouvoir dissocié la rhéologie du troisième corps du frottement moyen résultant.

Dans le cadre du GT4 des simulations Dynamique Moléculaire ont été proposées pour simuler le comportement en attraction/répulsion puis en frottement de deux massifs de cuivre à l'échelle atomique. Une analyse énergétique, ainsi que des références constantes à la littérature ont permis de valider l'approche et les résultats obtenus et il est possible de modéliser (simplifier) le comportement en attraction/répulsion obtenu afin de l'intégrer à l'échelle supérieure des grains de troisième corps.

Enfin dans le cadre du GT5, l'approche «multi-échelle», baptisée «couplage direct» combinant modèle de premier corps et modèle d'interface au coeur d'un même simulation a permis d'appréhender un milieu discontinu et hétérogène au coeur de l'interface. Même si l'interface utilisée est déjà présente au coeur du contact et ne vas pas évoluer (pas de création de particules), elle permet de mettre en évidence l'utilisation d'outil de mesure permettant de «repérer» les particules via les instabilités dynamiques et permet d'avoir des résultats pas uniquement qualitatifs mais aussi qualitatif puisque la comparaison avec les taux de contraintes expérimentaux sont en très bonne adéquation. Nous verrons dans la conclusion bilan les perspectives de ce travail.

Si l'on doit garder un point noir dans le projet, c'est la dissociation du GT4 des GT1 et GT2, ne le faisant interagir uniquement avec le GT3 pour un autre type de matériau. Afin de pouvoir avancé, le matériau utilisé rendait difficile une étude à l'échelle moléculaire. On peut toutefois noter que cette étude n'est pas impossible et que c'est l'une des perspectives au projet.

Si l'on doit garder un résultat phare de ce projet, c'est celui proposé par la figure 5.17, mettant en parallèle résultats numériques et expérimentaux avec une très bonne adéquation. Ce choix n'est pas anodin. En effet, il reflète la base du projet, à savoir le développement d'outils numériques avec la volonté de confronté les résultats à des données expérimentales.

- Les données expérimentales proviennent directement du GT1 qui à vu la naissance du dispositif PhotoTrib qui à permis de voir la naissance de particules de troisième corps et de suivre leur évolution et le niveau de contrainte résultant.
- Les résultats numériques proviennent eux à la fois du GT5 qui est lui une combinaison des outils du GT2 et du GT3. Sans une volonté d'être le plus rigoureux possible à chaque échelle, cette combinaison n'aurait pas pu arriver à terme et coller aux résultats du GT1.

ANNEXE 1

Synthèse des essais réalisés dans le cadre du GT1

Références d'essai		Paramètres d'essai					
N° de disque	n° d'essai	Vit. moteur	Dilat. Diam.	Sens ω	Nettoyage TC	Type en-castr	
DK_ANR_JC		(mm/s)	(µm)	Dech. avant essai	(X = sens trigo)	(Oui / Non)	Couronne rigide en acier
1	1	10	0	Non	X	Non	Non
1	1bis	10	0	Non	X	Non	Non
1	2	100	0	Non	X	Non	Non
1	2bis	100	0	Non	X	Non	Non
1	2ter	100	0	Non	X	Non	Non
1	3	500	0	Non	X	Non	Non
1	4	10	15	Non	X	Non	Non
1	4bis	10	10	Non	X	Non	Non
1	5	100	10	Non	X	Non	Non
1	6	500	10	Non	X	Non	Non
1	7	1000	10	Non	X	Non	Non
1	7bis	1000	10	Non	X	Non	Non
2	1	manuel	10	Non	X	**Oui (initial)**	Non
2	2	10	10	Non	X	Non	Non
2	3	100	10	Non	X	Non	Non
2	4	100	0	Non	X	Non	Non
2	5	500	0	Non	X	Non	Non
2	6	500	0	Non	X	Non	Non
2	7	100	0	Non	X	Non	Non
2	8	100	0	Non	-	Non	Non
3	1	100	10	Non	X	**Oui (initial)**	Non
3	2	100	10	Non	X	Non	Non
3	3	500	10	Non	X	Non	Non
3	4	100	0	Non	X	Non	Non
3	5	100	0	Non	X	Non	Non
3	6	500	0	Non	X	Non	Non
3	7	100	0	Non	X	Non	Non
3	8	10	0	Non	X	Non	Non
3	9	manuel	0	Non	X & -	Non	**Oui**
3	10	manuel	0	Non	X & -	Non	Oui
3	11	100	0	Non	X	Non	Oui

3	12	100	0	Non	X	Non	Oui
3	12bis	100	0	Non	X	Non	Oui
3	13	10	0	Non	X	Non	Oui
3	14	500	0	Non	X	Non	Oui
3	15	100	10	Non	X	Non	Oui
3	15bis	100	10	Non	X	Non	Oui
3	15ter	100	10	Non	X	Non	Oui
3	15quad	100	10	Non	X	Non	Oui
3	15cinq	100	10	Non	X	Non	Oui
3	16	100	10	Non	X	Non	Oui
3	16bis	100	10	Non	X	Non	Oui
3	17	100	0	Non	X	Non	Oui
4	1	100	0	Non	X	**Oui (initial)**	Oui
4	2	100	10	Non	X	Non	Oui
4	3	100	10	Non	X	Non	Oui
4	4	100	10	Non	X	Non	Oui
4	5	10	10	Non	X	Non	Oui
4	6	10	10	Non	-	Non	Oui
4	7	100	10	Non	-	Non	Oui
4	8	100	0	Non	X	Non	Oui
4	9	100	10	**Oui**	X	Non	Oui
4	10	100	15	**Oui**	X	Non	Oui
4	11	100	20	**Oui**	X	Non	Oui
4	11bis	100	20	Non	X	Non	Oui
4	11ter	100	20	Non	X	Non	Oui
4	11quad	100	20	Non	X	Non	Oui
4	12	100	20	**Oui**	X	Non	Oui
4	12bis	100	20	Non	X	Non	Oui
4	13	100	10	**Oui**	X	Non	Oui
4	14	100	30	**Oui**	X	Non	Oui
4	15	100	30	Non	X	Non	Oui
4	16	100	0	**Oui**	X	**Oui (étha-nol)**	Oui
4	17	100	10	Non	X	Non	Oui
4	18	100	10	Non	X	Non	Oui
4	19	100	10	Non	X	Non	Oui
4	20	100	10	Non	X	Non	Oui
4	21	100	0	**Oui**	X	Non	Oui
4	22	100	15	**Oui**	X	Non	Oui
4	23	100	15	**Oui**	X	Non	Oui
4	24	100	20	**Oui**	X	Non	Oui
4	25	100	30	**Oui**	X	Non	Oui

4	26	100	20	**Oui**	X	Non	Oui
4	27	10	20	**Oui**	X	Non	Oui
4	28	200	20	**Oui**	X	Non	Oui
4	29	200	20	**Oui**	X	Non	Oui
5	1	100	10	**Oui**	X	**Oui (initial)**	Oui
5	2	100	10	Non	X	Non	Oui
5	3	100	10	Non	X	Non	Oui
5	4	100	30	**Oui**	X	Non	Oui
5	5	100	30	Non	X	Non	Oui
5	6	100	30	Non	X	Non	Oui