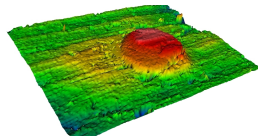
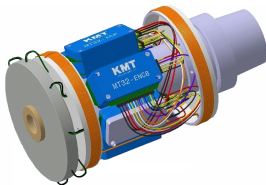


Damien Méresse

Soutenance de thèse de doctorat

Approche thermomécanique de la tribologie à grande vitesse
Application au freinage



1^{er} Juin 2011

Historique du freinage automobile

Fin XIX^{ème}

544 kg
70 km/h

1951 : Frein à disque



1200 kg
150 km/h

De nos jours

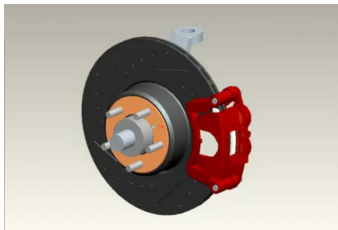


1700 kg
> 200km/h

Poids

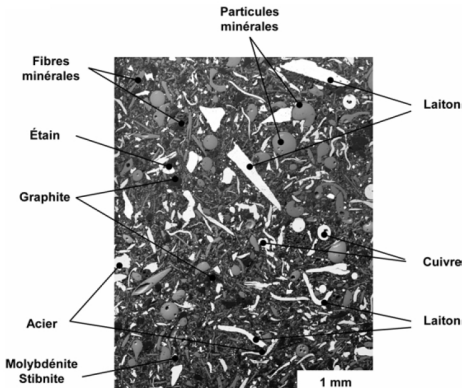
Performance

Sécurité



Énergie dissipée sous
forme de chaleur

Composition d'une plaquette

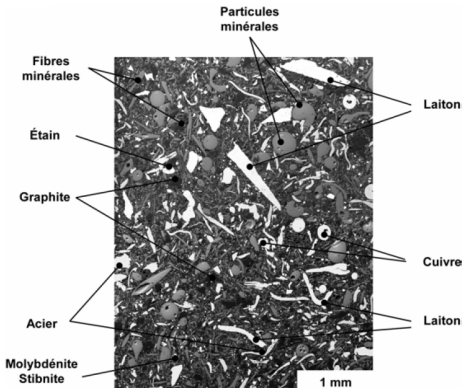


Organo-métalliques majoritaires Compaction à chaud

Matrice phénolique (20-30%)
Fibres structurales (20-30%)
Abrasifs (10-15%)
Lubrifiants (30-35%)

Nombre de constituants différents

Composition d'une plaquette

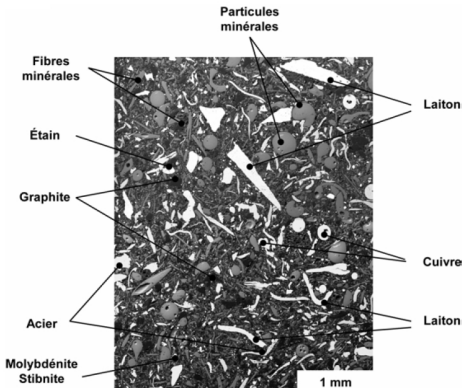


Organo-métalliques majoritaires
Compaction à chaud

Matrice phénolique (20-30%)
Fibres structurales (20-30%)
Abrasifs (10-15%)
Lubrifiants (30-35%)

Nombre de constituants différents

Composition d'une plaquette

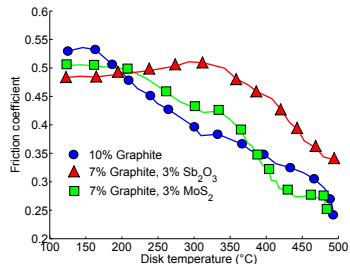
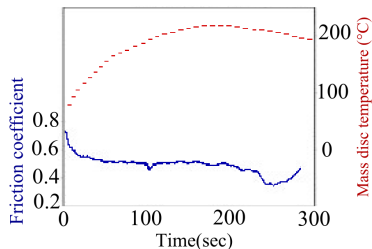


Organo-métalliques majoritaires
Compaction à chaud

Matrice phénolique (20-30%)
Fibres structurales (20-30%)
Abrasifs (10-15%)
Lubrifiants (30-35%)

Nombre de constituants différents

Fading effect



Perte d'efficacité du système de freinage

Accumulation de la chaleur
 Succession de freinages

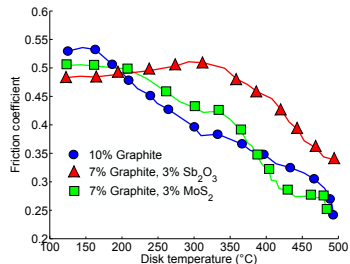
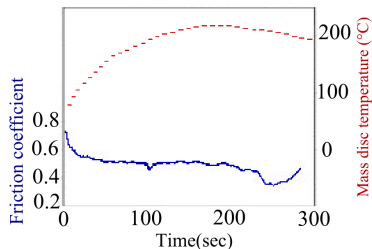
Prépondérance de la température

Choix de la résine, abrasifs, lubrifiants
 pour retarder l'apparition du
 phénomène

Optimisation empirique

P. Gurunath and J. Bijwe, *Wear* 263 (2007), pp. 1212-1219

Fading effect



Perte d'efficacité du système de freinage

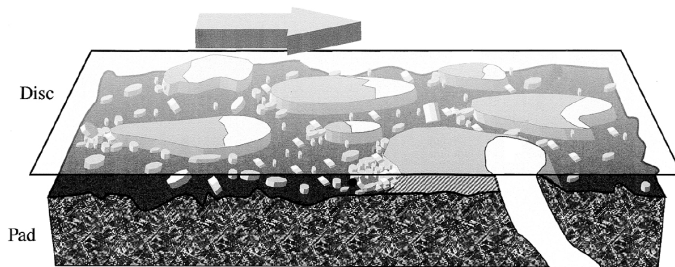
Accumulation de la chaleur
Succession de freinages

Prépondérance de la température

Choix de la résine, abrasifs, lubrifiants
pour retarder l'apparition du
phénomène

Optimisation empirique

Observation de la surface d'une garniture



Zones de contact privilégiées

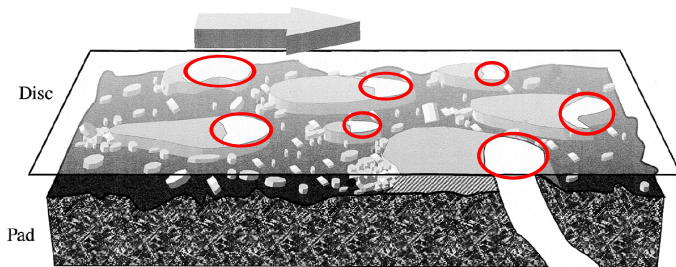
Plateaux primaires

Plateaux secondaires

Diamètre $\sim 50-500 \mu\text{m}$

Hauteur $\sim 3-5 \mu\text{m}$

Observation de la surface d'une garniture



Zones de contact privilégiées

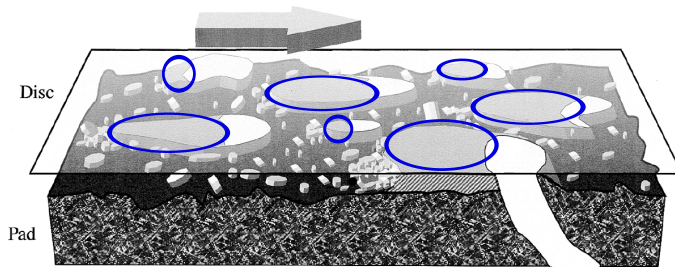
Plateaux primaires

Plateaux secondaires

Fibres structurales

Dégradation des zones à proximité

Observation de la surface d'une garniture



Zones de contact privilégiées

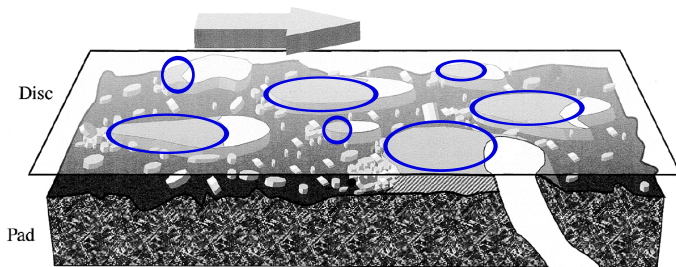
Plateaux primaires

Plateaux secondaires

Compaction des débris au devant du plateau primaire

Destruction avec la rupture de la fibre du plateau primaire

Observation de la surface d'une garniture



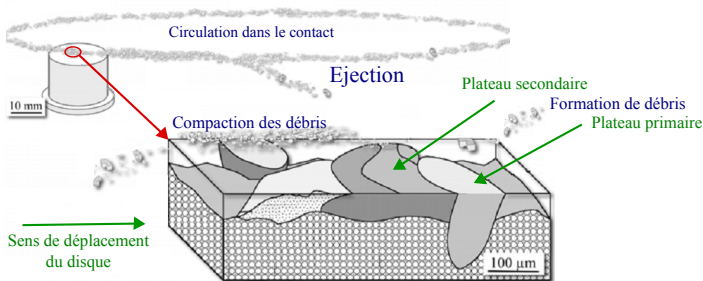
Zones de contact privilégiées

Plateaux primaires

Plateaux secondaires

Cohésion de la fibre structurale
prépondérante sur le taux
d'usure

Dynamique de l'état de surface



Théorie du 3^{ème} corps

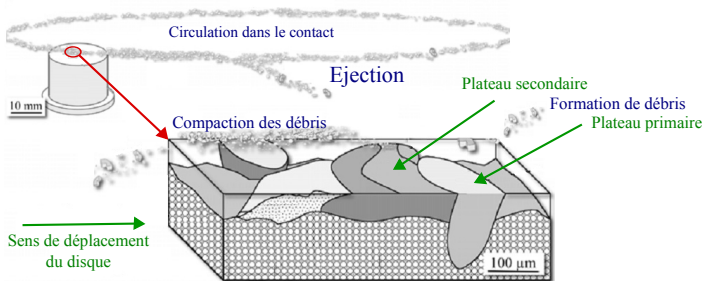
Prédiction de la formation des débris

Équilibre entre :

Formation : débit source
Circulation : débit interne
Compaction des débris
Éjection des particules

Y. Berthier & al., *Wear* 125 (1988), pp. 25-38

Dynamique de l'état de surface



Théorie du 3^{ème} corps

Prédiction de la formation des débris

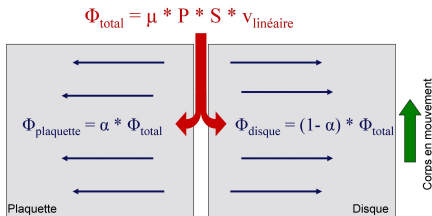
Équilibre entre :

Formation : débit source
Circulation : débit interne
Compaction des débris
Éjection des particules

Thermique du contact glissant

Génération de chaleur

$$\Phi_{total} = \mu * P * S_{plaquette} * v_{lineaire}$$



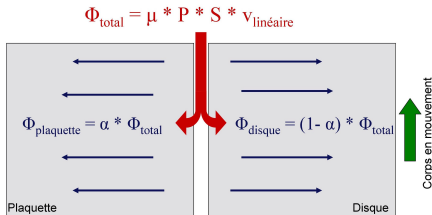
Partage entre disque et plaque

$$\alpha = \frac{S_{garniture} * \xi_{garniture}}{S_{garniture} * \xi_{garniture} + S_{disque} * \xi_{disque}}$$

$$\alpha_j = \frac{\xi_{garniture}}{\xi_{garniture} + \xi_{disque}}$$

$$R_c = \frac{T_{S_{garniture}} - T_{S_{disque}}}{\phi}$$

Thermique du contact glissant



Génération de chaleur

$$\Phi_{total} = \mu * P * S_{plaque} * v_{linéaire}$$

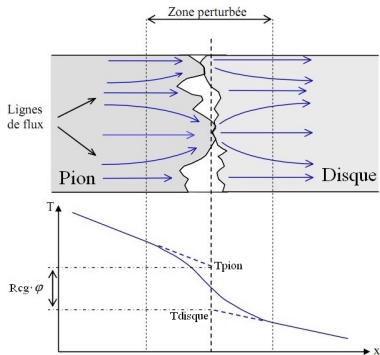
Partage entre disque et plaque

$$\alpha = \frac{S_{garniture} * \xi_{garniture}}{S_{garniture} * \xi_{garniture} + S_{disque} * \xi_{disque}}$$

$$\alpha_j = \frac{\xi_{garniture}}{\xi_{garniture} + \xi_{disque}}$$

$$R_c = \frac{T_{S_{garniture}} - T_{S_{disque}}}{\phi}$$

Thermique du contact glissant



Génération de chaleur

$$\Phi_{total} = \mu * P * S_{plaquette} * v_{lineaire}$$

Partage entre disque et plaquette

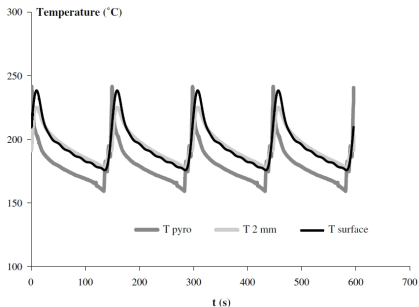
$$\alpha = \frac{S_{garniture} * \xi_{garniture}}{S_{garniture} * \xi_{garniture} + S_{disque} * \xi_{disque}}$$

$$\alpha_j = \frac{\xi_{garniture}}{\xi_{garniture} + \xi_{disque}}$$

$$R_c = \frac{T_{S_{garniture}} - T_{S_{disque}}}{\Phi}$$

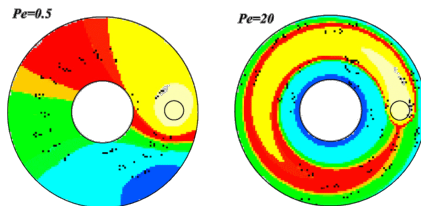
Modélisation des transferts thermiques

Succession de freinages



M. Siroux & al., **Applied Thermal Engineering** 28 (2008),
pp. 2194-2202

Influence de ω

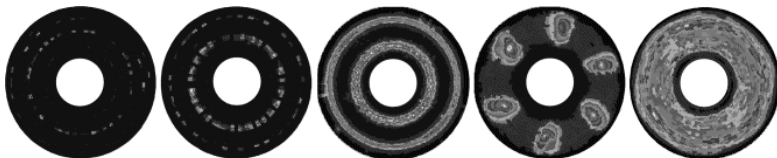


N. Laraqi & al., **Wear** 266 (2009), pp. 765-770

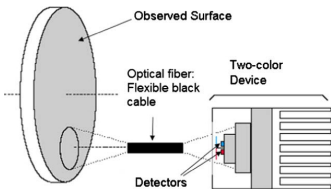
Analytique → Régime établi, Numérique → Régime transitoire

Mesure de la température

Localisation thermique ("Hot spots")



A. Anderson, *Wear* **135** (1990), pp. 319-337



Pyrométrie monochromatique

Mesure simultanée de T_S et ϵ

Température ($> 250 \text{ }^\circ\text{C}$)

J. Thevenet & al., *Applied Thermal Engineering* **30** (2010), pp. 753-759

Objectifs des travaux

Quoi ?

Étudier le frottement pour de grandes vitesses de glissement

Comment ?

Dimensionner une plateforme adaptée

Mesurer les grandeurs mécaniques et thermiques au cours de l'essai

Analyser l'influence des conditions de contact sur l'état de surface

Objectifs des travaux

Quoi ?

Identifier les facteurs favorisant la génération d'un 3^{ème} corps

Comment ?

Matériau de composition simplifiée : résine et renforts particulières

Essais rhéologiques pour identifier les conditions amenant à la décohésion

Essais tribologiques sous différentes conditions de pression, vitesse, température

Simulation de la décohésion sur un Volume Local d'Étude

Objectifs des travaux

Quoi ?

Examiner la répartition des champs thermiques dans le système pion-disque

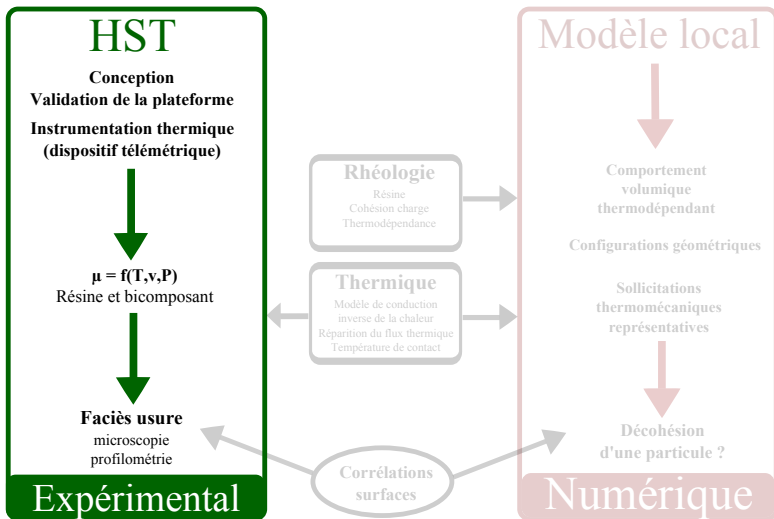
Comment ?

Adaptation d'un système télémétrique pour la mesure sur système tournant

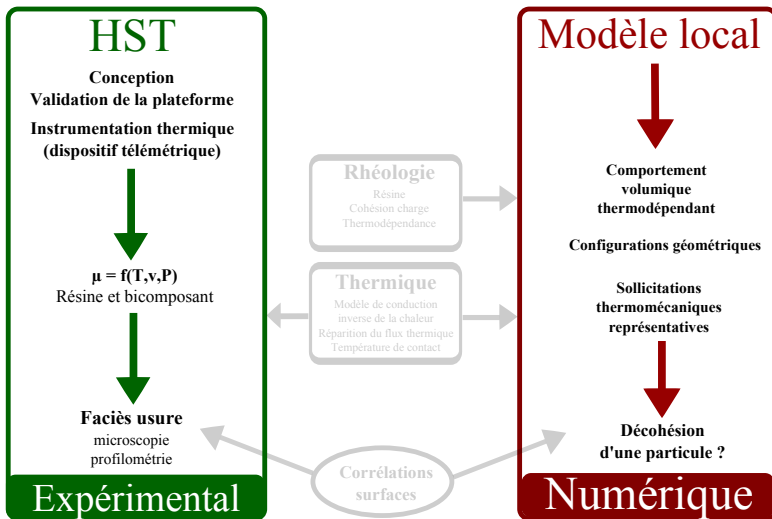
Calcul des flux thermiques et des températures de contact par méthode inverse

Influence des conditions de sollicitation sur la répartition de la chaleur

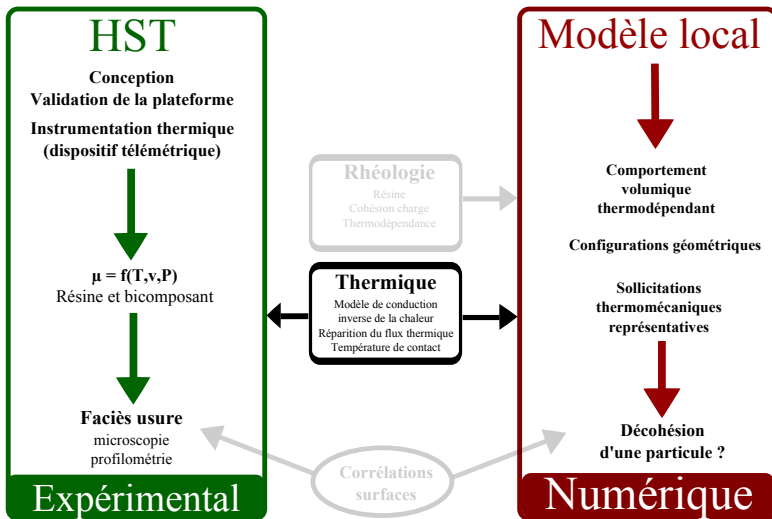
Synopsis



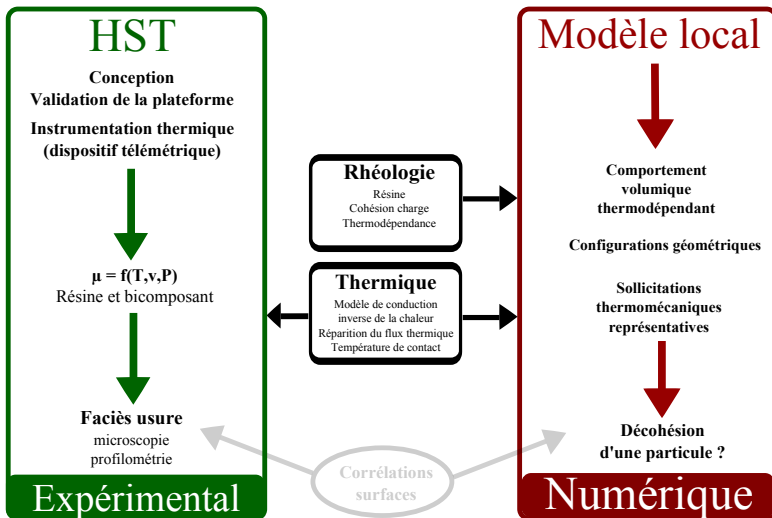
Synopsis



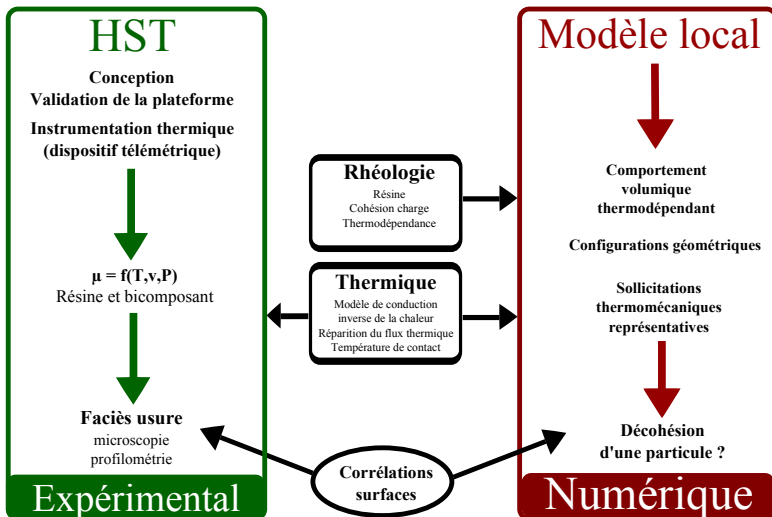
Synopsis



Synopsis



Synopsis

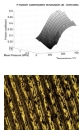


1



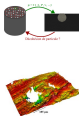
Plateforme High Speed Tribology
Moyens expérimentaux et numériques pour l'étude à l'échelle macroscopique

2



Comportement tribologique et thermique du matériau d'étude en configuration pion - disque

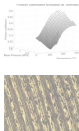
3



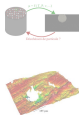
Stratégie de modélisation à l'échelle mésoscopique en vue de la prédiction de l'arrachement d'une particule

1

Plateforme High Speed Tribology
Moyens expérimentaux et numériques pour
l'étude à l'échelle macroscopique

2

Comportement tribologique et thermique du matériau
d'étude en configuration pion - disque

3

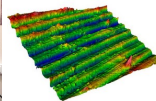
Stratégie de modélisation à l'échelle mésoscopique en
vue de la prédiction de l'arrachement d'une particule

Tribomètre Grande Vitesse

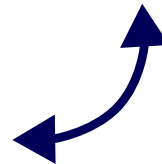
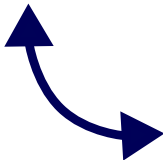
Modèles thermiques inverses

Plateforme *High Speed Tribology*Tribomètre
Grande VitesseModèles de
conduction inversesFunction Specification
methodFlux thermique
entrant inconnuVariation de température
au point de mesure

Thermocouple



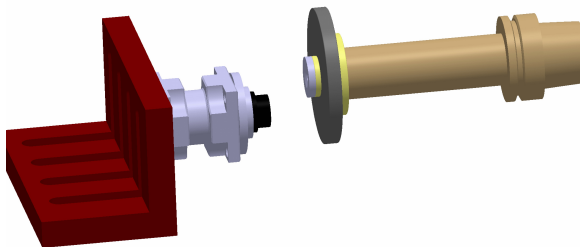
Analyse des surfaces



Tribomètre Grande Vitesse

Modèles thermiques inverses

Description du tribomètre



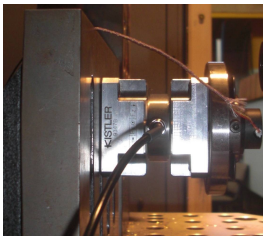
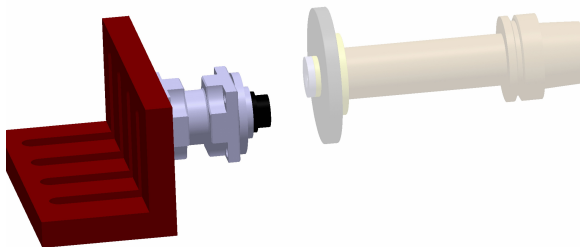
Configuration Pion - Disque

Jusque $15000 \text{ tr.min}^{-1}$

Tribomètre Grande Vitesse

Modèles thermiques inverses

Description du tribomètre



Partie fixe

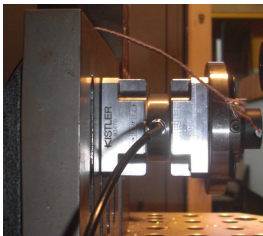
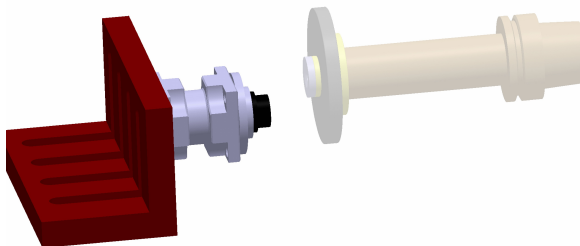
Dimensions du pion :

\varnothing : 24 mm
Épaisseur : 20 mm

Tribomètre Grande Vitesse

Modèles thermiques inverses

Description du tribomètre



Capteur effort triaxes Kistler

$$F_{N_{max}} = 20 \text{ kN}, F_{T_{max}} = 5 \text{ kN}$$

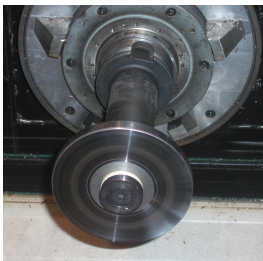
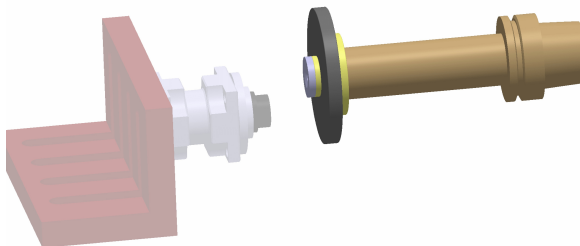
Mesure de température

Thermocouple K, $\varnothing = 100 \mu\text{m}$
Temps de réponse, fixé pâte ciment

Tribomètre Grande Vitesse

Modèles thermiques inverses

Description du tribomètre



Partie tournante

Dimensions du disque :

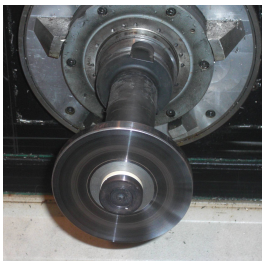
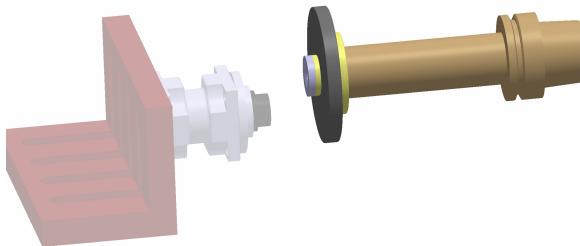
\varnothing	:	100	mm
Épaisseur	:	10	mm
R_{moy}	:	36	mm

Isolation thermique par rondelles de zircone

Tribomètre Grande Vitesse

Modèles thermiques inverses

Description du tribomètre



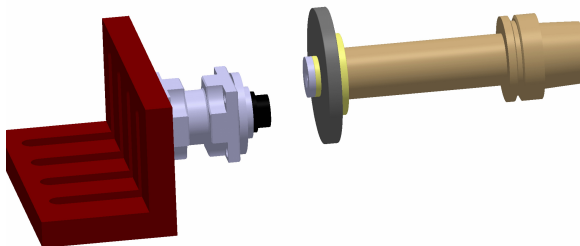
Partie tournante

Conservation de la répartition des flux entre
disque et plaquetteO. Roussette & al., *Comptes Rendus Mécaniques* 331 (2003), 343-349

Tribomètre Grande Vitesse

Modèles thermiques inverses

Description du tribomètre



Déroulement d'un essai

1. Mise en rotation de la broche
2. Déplacement normal jusqu'à effort recherché
3. Essai à position fixe

Phase de rodage spécifique

Tribomètre Grande Vitesse

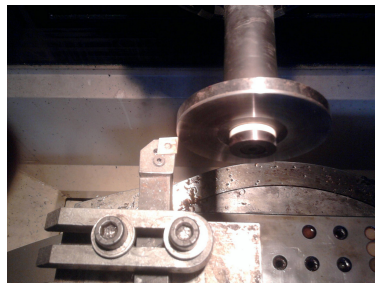
Modèles thermiques inverses

Phase de rodage

Fraisage du pion



Rectification du disque



Paramètres de coupe :

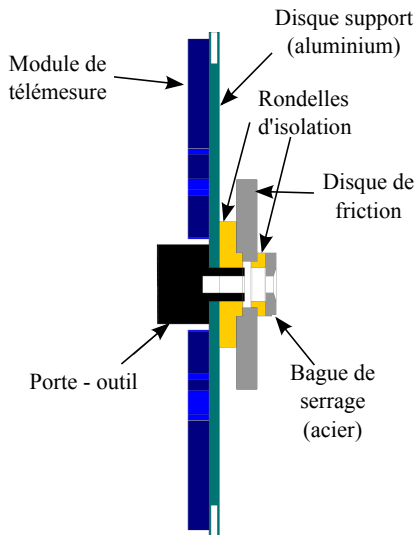
 $1700 \text{ trs.min}^{-1}$ 240 mm.min^{-1}

Parallélisme des faces en contact

Tribomètre Grande Vitesse

Modèles thermiques inverses

Mesure thermique dans le disque



Modules de télémessure pour thermocouples type K

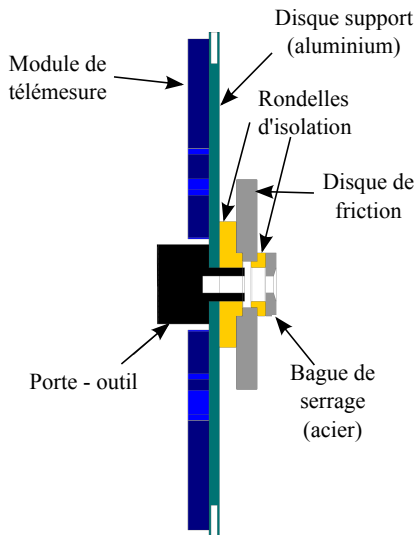
Disque support en aluminium
Protection thermique par les rondelles de zircon

Isolation thermique du disque pour le modèle

Tribomètre Grande Vitesse

Modèles thermiques inverses

Mesure thermique dans le disque



Modules de télémessure pour thermocouples type K

Disque support en aluminium
Protection thermique par les rondelles de zircon

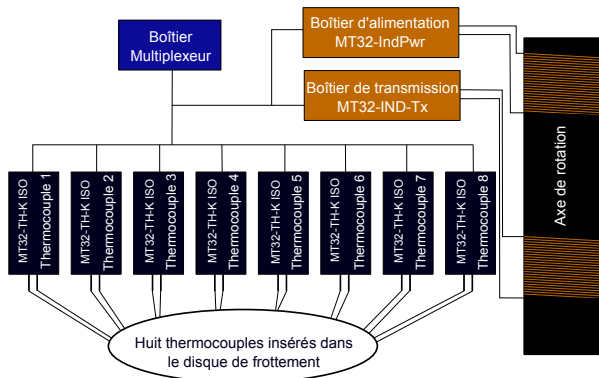
Isolation thermique du disque pour le modèle

Tribomètre Grande Vitesse

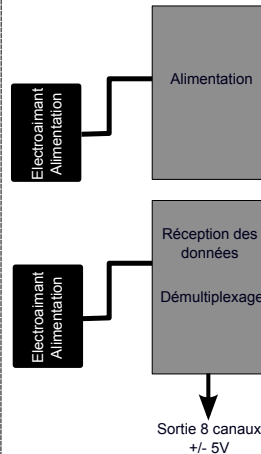
Modèles thermiques inverses

Principe de fonctionnement du système télémetrique

PARTIE EMBARQUEE



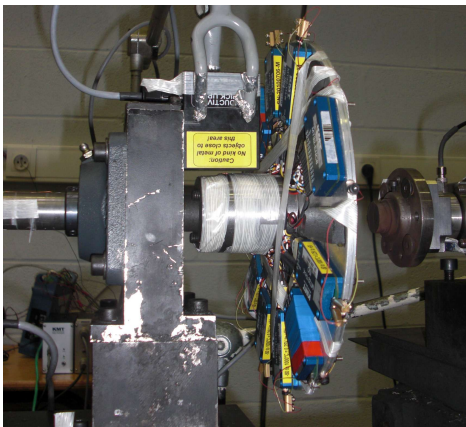
PARTIE EXTERNE



Tribomètre Grande Vitesse

Modèles thermiques inverses

Calibration sur tribomètre basse vitesse



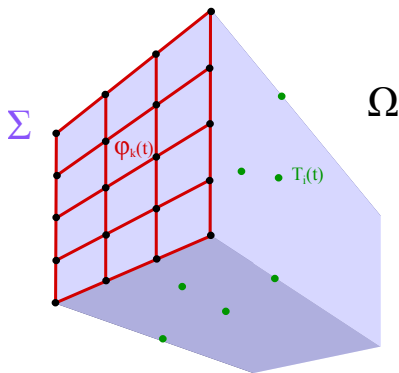
Phase de calibration pour de faibles vitesses de rotation

$$\omega_{MAX} = 750 \text{ tr.min}^{-1}$$

Sensibilité et faisabilité des mesures dans le disque

Transfert vers le HST

Connaissance de la température de contact



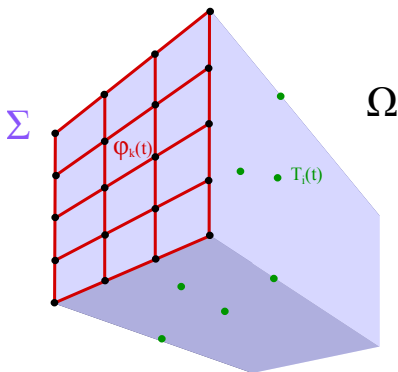
Températures mesurées hors de la zone de contact

Identification par méthode inverse

Flux inconnus sur Σ
Températures connues dans Ω

Calcul simultané du flux et de la température sur Σ

Connaissance de la température de contact



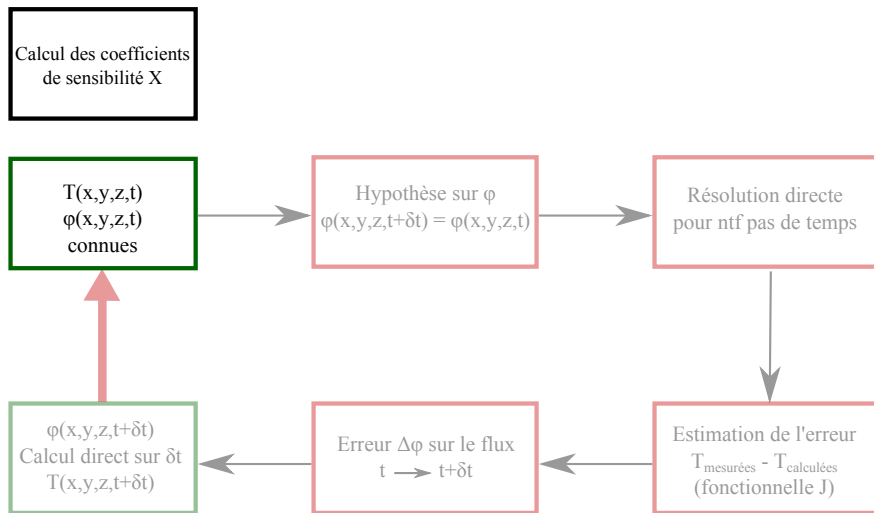
Températures mesurées hors de la zone de contact

Identification par méthode inverse

Flux inconnus sur Σ
Températures connues dans Ω

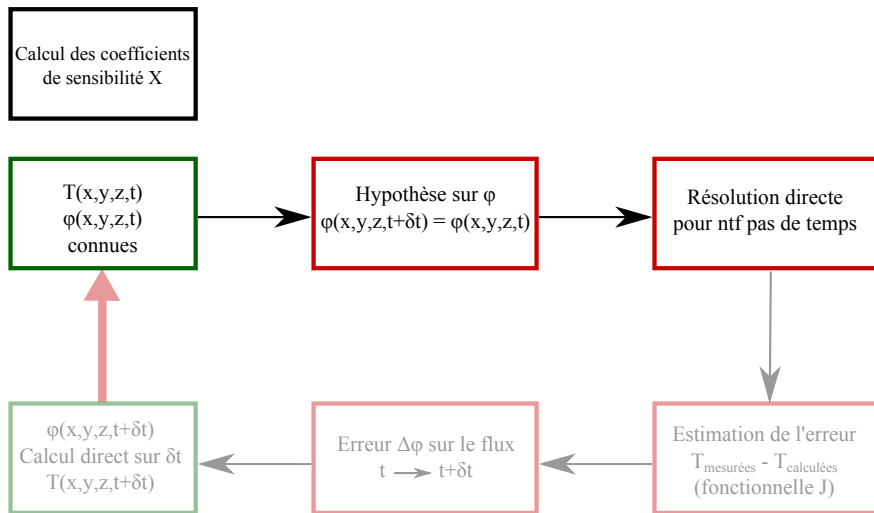
Calcul simultané du flux et de la température sur Σ

Méthode inverse de spécification de fonction



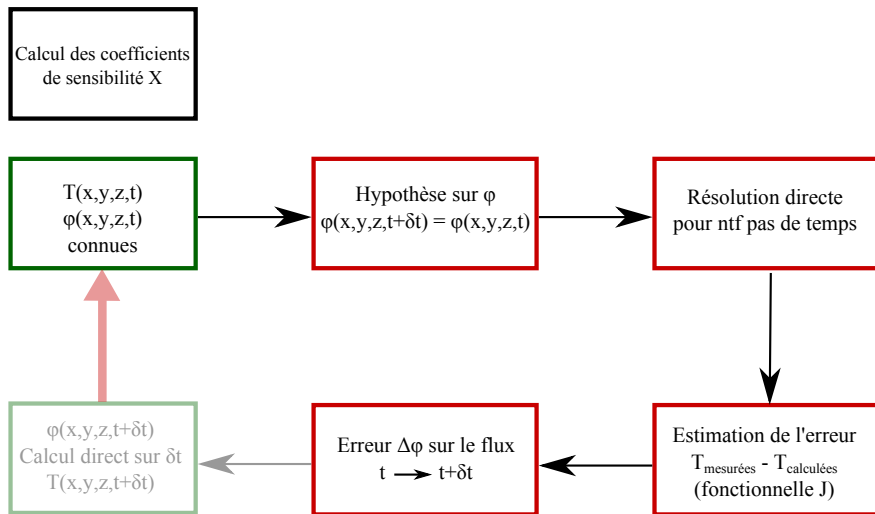
J-V. Beck & al., *Inverse heat conduction : ill-posed problems*, Wiley (1985)

Méthode inverse de spécification de fonction



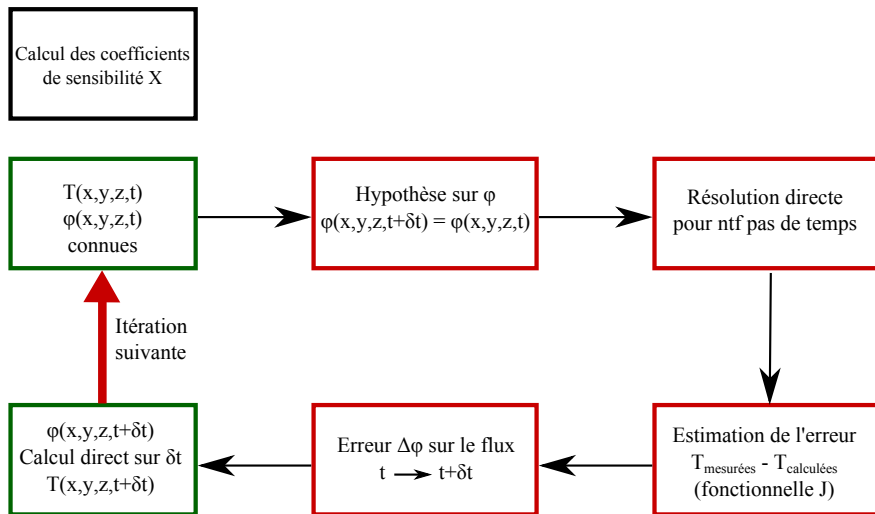
J-V. Beck & al., *Inverse heat conduction : ill-posed problems*, Wiley (1985)

Méthode inverse de spécification de fonction



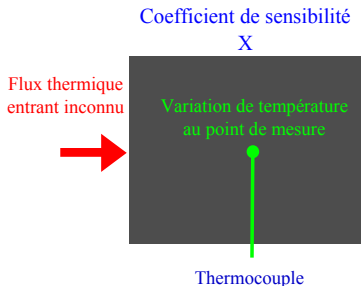
J-V. Beck & al., *Inverse heat conduction : ill-posed problems*, Wiley (1985)

Méthode inverse de spécification de fonction



J-V. Beck & al., *Inverse heat conduction : ill-posed problems*, Wiley (1985)

Notion de coefficient de sensibilité



δT au point de mesure pour une variation unitaire du flux $\delta \varphi_i$

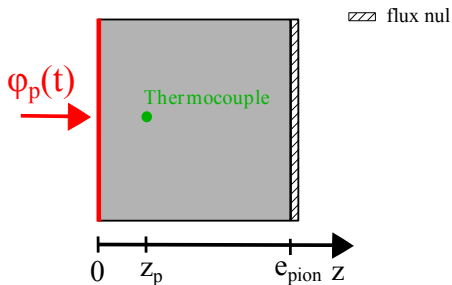
Choix :

du pas de temps

de nombre de temps futurs ntf

de la position des thermocouples

Modèle 1D côté pion



Conditions aux limites

Flux inconnu au contact ($z = 0$)Isolation face arrière ($z = e_{\text{pion}}$)Température mesurée ($z = z_p$)

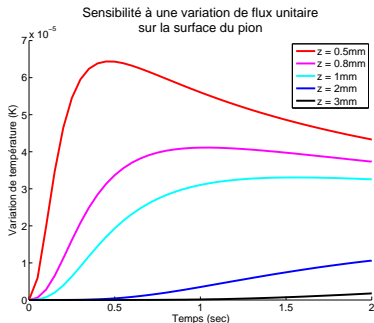
Étude de sensibilité

$$\delta z = 0.1 \text{ mm}, \delta t = 0.1 \text{ s}$$

Sensibilité suffisante à 1 mm pour
instrumenter

Résine : $k = 0.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c_p = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 1450 \text{ kg.m}^{-3}$

Modèle 1D côté pion



Conditions aux limites

Flux inconnu au contact ($z = 0$)Isolation face arrière ($z = e_{pion}$)Température mesurée ($z = z_p$)

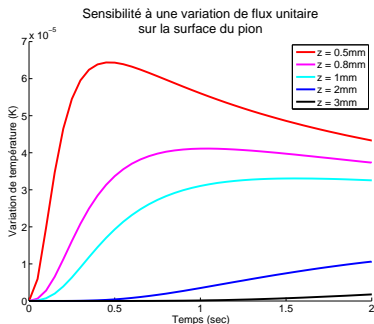
Étude de sensibilité

$$\delta z = 0.1 \text{ mm}, \delta t = 0.1 \text{ s}$$

Sensibilité suffisante à 1 mm pour
instrumenter

Résine : $k = 0.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c_p = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 1450 \text{ kg.m}^{-3}$

Modèle 1D côté pion



Conditions aux limites

Flux inconnu au contact ($z = 0$)Isolation face arrière ($z = e_{pion}$)Température mesurée ($z = z_p$)

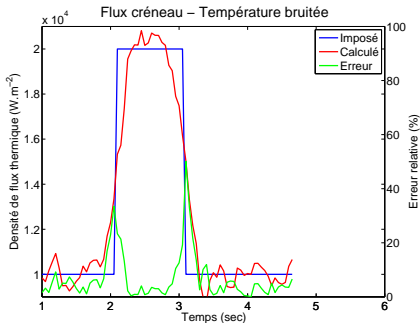
Étude de sensibilité

$$\delta z = 0.1 \text{ mm}, \delta t = 0.1 \text{ s}$$

Sensibilité suffisante à 1 mm pour
instrumenter

Résine : $k = 0.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c_p = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 1450 \text{ kg.m}^{-3}$

Validation numérique



Méthode des fichiers sources

Sans et avec un bruit blanc de $0.05\text{ }^\circ\text{C}$

Variation brutale : flux créneau

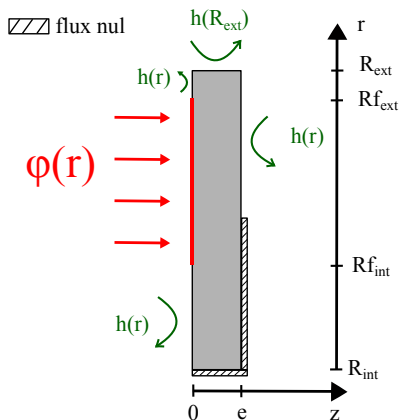
$10 \rightarrow 20\text{ (1s)} \rightarrow 10\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$

Erreur moyenne de 10% pour $\text{ntf} = 7$

Discontinuité : flux triangulaire

Erreur moyenne de 6% pour $\text{ntf} = 7$

Modèle 2D côté disque



Conditions aux limites

Flux inconnu au contact ($z = 0$)
 Isolation aux rondelles de zircon
 Convection avec l'air ambiant

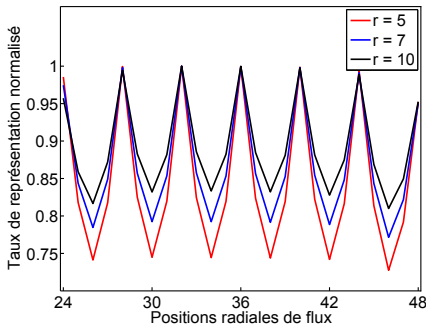
Nombre et positions des
 thermocouples

7 thermocouples K

Positions \rightarrow taux de représentation τ
 Répartis tous les 45° dans le disque
 aux différentes profondeurs
 Soudure décharge capacitive

Acier : $k = 52 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c_p = 480 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 7850 \text{ kg.m}^{-3}$

Modèle 2D côté disque



Conditions aux limites

Flux inconnu au contact ($z = 0$)
Isolation aux rondelles de zircon
Convection avec l'air ambiant

Nombre et positions des thermocouples

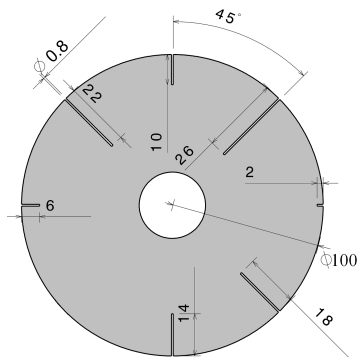
7 thermocouples K

Positions \rightarrow taux de représentation τ

Répartis tous les 45° dans le disque
aux différentes profondeurs
Soudure décharge capacitive

Acier : $k = 52 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c_p = 480 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 7850 \text{ kg.m}^{-3}$

Modèle 2D côté disque



Conditions aux limites

Flux inconnu au contact ($z = 0$)
Isolation aux rondelles de zircone
Convection avec l'air ambiant

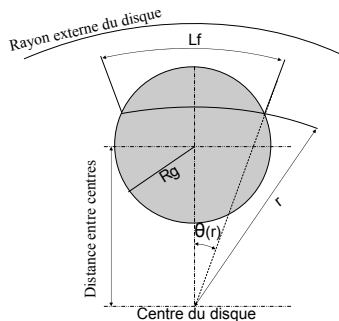
Nombre et positions des thermocouples

7 thermocouples K

Positions \rightarrow taux de représentation τ
Répartis tous les 45° dans le disque
aux différentes profondeurs
Soudure décharge capacitive

Acier : $k = 52 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c_p = 480 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 7850 \text{ kg.m}^{-3}$

Validation numérique

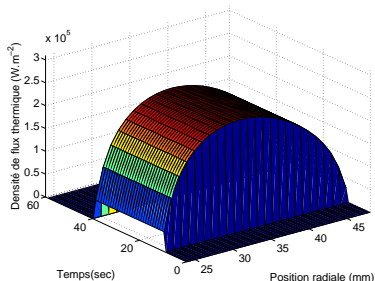


Méthode des fichiers sources

$$\varphi(r) = f \text{ (longueur frottée)}$$

Validation numérique

Flux thermique imposé sur la surface frottée du disque



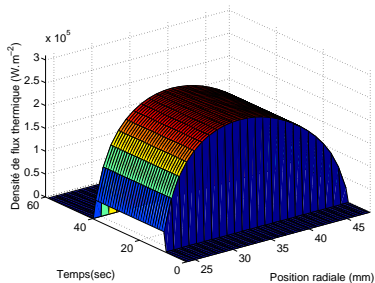
Méthode des fichiers sources

$$\varphi(r) = f(\text{longueur frottée})$$

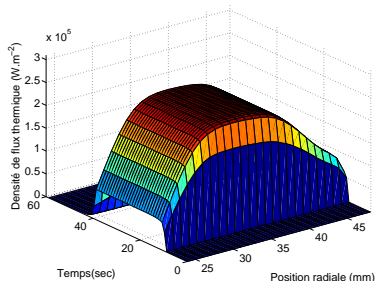
Pression	:	1	MPa
μ	:	0.5	
ω	:	1325	trs.min ⁻¹
α	:	0.9	
Energie	:	1017	W

Validation numérique

Flux thermique imposé sur la surface frottée du disque



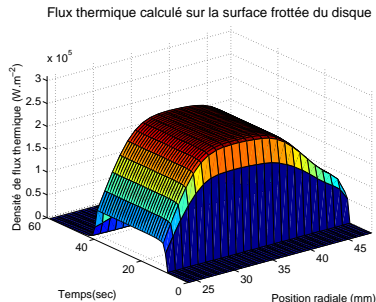
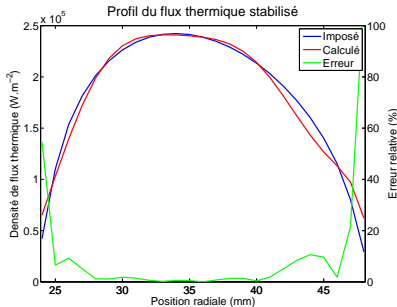
Flux thermique calculé sur la surface frottée du disque



Paramètres de l'inversion : $ntf = 7$, $\beta = 2.7 \cdot 10^{-9}$

Bonne estimation de la répartition

Validation numérique



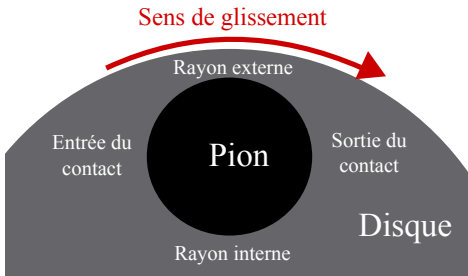
Paramètres de l'inversion : $ntf = 7$, $\beta = 2.7 \cdot 10^{-9}$

Bonne estimation de la répartition

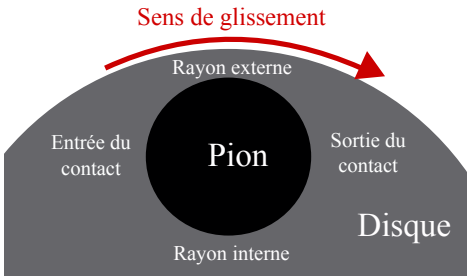
Erreur plus importante aux bords de la piste

Modèle 3D : pion

Estimer la répartition du flux sur le pion



Modèle 3D : pion



Estimer la répartition du flux sur le pion

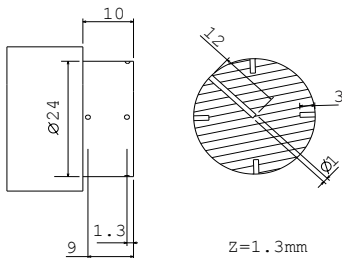
$$\varphi(x, y, t) = \varphi_m(t) * f_R * f_{LT}$$

$$f_{LT} = \frac{X^{P_1+P_2}}{1+P_2}$$

$$f_R = \left(\frac{r(x,y)}{R_m} \right)^{P_3}$$

Identification par algorithme de Levenberg-Marquardt

Modèle 3D : pion



Estimer la répartition du flux sur le pion

Instrumentation du pion avec 6 thermocouples

Cinq à proximité de la zone de contact

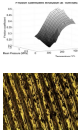
Contrôle de l'hypothèse d'isolation sur la face arrière

1



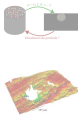
Plateforme High Speed Tribology
Moyens expérimentaux et numériques pour l'étude à l'échelle macroscopique

2



Comportement tribologique et thermique du matériau d'étude en configuration pion - disque

3



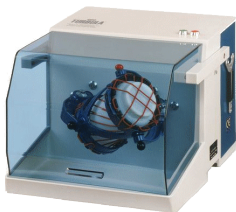
Stratégie de modélisation à l'échelle mésoscopique en vue de la prédiction de l'arrachement d'une particule

Conditions d'essai

Transferts thermiques

Comportement tribologique

Matériaux d'étude



Matériaux

Disque acier AISI1015

Résine phénolique pure

Résine renforcée (20%)

 $\varnothing_{bille} \sim 250 \mu\text{m}$

Compression à chaud

Homogénéisation (Turbula)

150 °C - 5 MPa

Conditions d'essai

Transferts thermiques

Comportement tribologique

Conditions d'essai

Vitesses de glissement

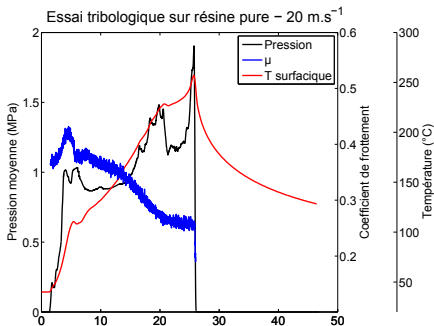
5 - 10 - 20 m.s⁻¹

Pressions initiales

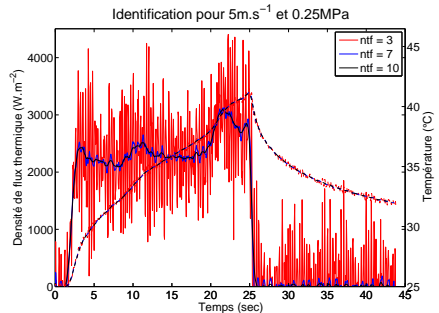
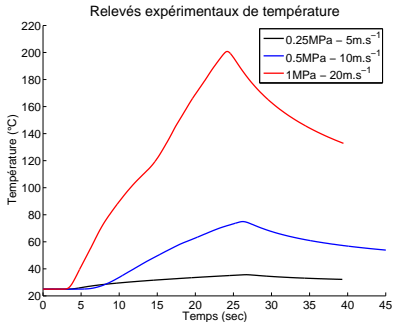
0.25 - 0.5 - 1 MPa

Durée

20 sec → 3 min

Variations d'effort normal importantes
pendant un essaiCompétition usure - dilatation :
Propre à la rigidité du montage

Identification thermique monodimensionnelle dans le pion

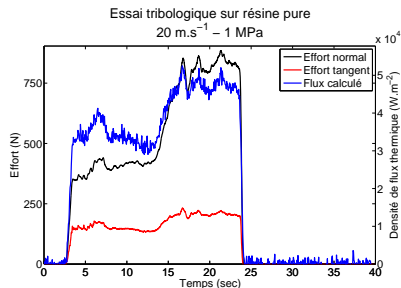
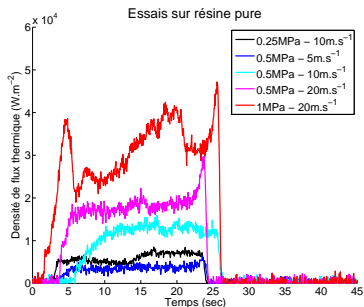


Élévation de température de 10 à 250 °C

Identification pour $ntf = 7$ pour conditions peu sévères

$ntf = 5$ suffisant pour les autres conditions

Identification thermique monodimensionnelle dans le pion

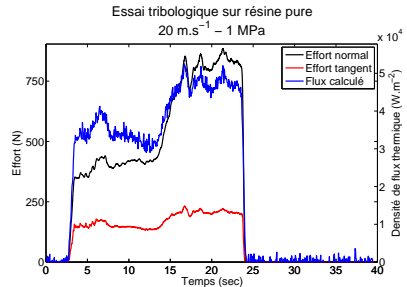
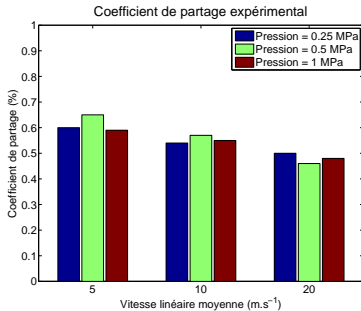


Flux thermiques calculés pour les différentes conditions de vitesses et pression

Variation importante au cours du temps pour certains essais

Coincident avec les fluctuations des efforts FT et FN

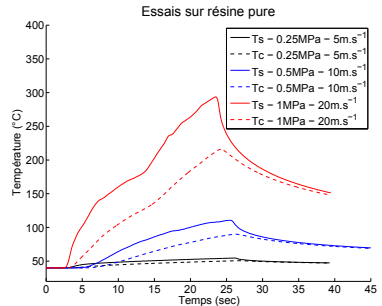
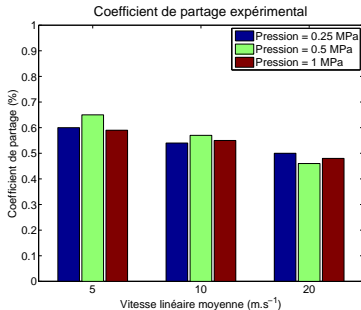
Identification thermique monodimensionnelle dans le pion



$$\alpha_{exp} = \frac{\varphi_{pion} * S_{pion}}{F_T * v_{glissement}}$$

$$\alpha_{exp} \sim \alpha_{theorique}$$

Identification thermique monodimensionnelle dans le pion

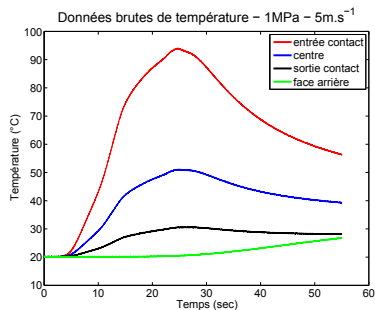
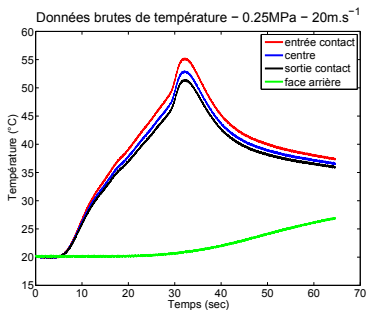


$$\alpha_{exp} = \frac{\varphi_{pion} * S_{pion}}{F_T * v_{glissement}}$$

$$\alpha_{exp} \sim \alpha_{theorique}$$

Nécessité d'identifier la température de contact étant donné l'écart avec la valeur au point de mesure

Distribution sur la surface du pion

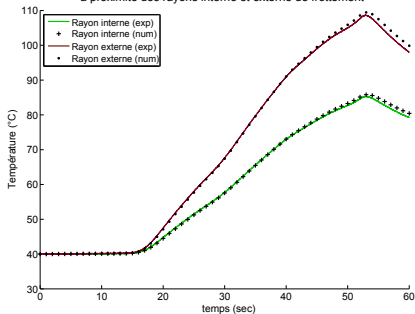


Écarts de température observables pour plusieurs thermocouples dans le pion

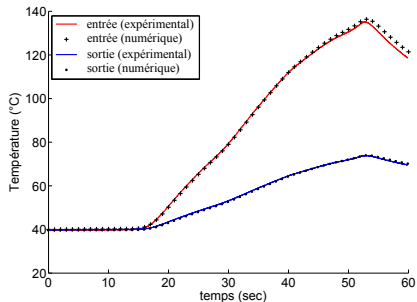
Gradient dépendant de la condition d'essai (Pression - Vitesse)

Distribution sur la surface du pion

Comparaison des données expérimentales et numériques de température à proximité des rayons interne et externe de frottement



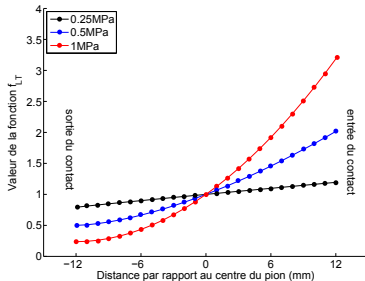
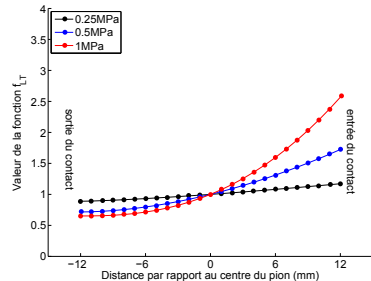
Comparaison des données expérimentales et numériques de températures à proximité de l'entrée et la sortie de contact



Comparaison températures mesurées et calculés avec la fonction f_{LT}

Bonne corrélation sur la majorité des essais

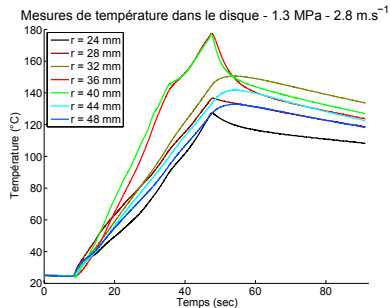
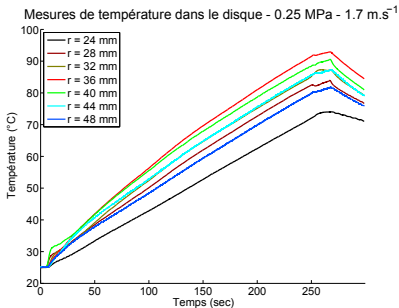
Distribution sur la surface du pion

Evolution de la fonction $f_{LT} - 5m.s^{-1}$ Evolution de la fonction $f_{LT} - 20m.s^{-1}$ 

Concentration du flux en entrée de contact

Localisation croissante avec la pression, décroissante avec la vitesse

Identification thermique dans le disque



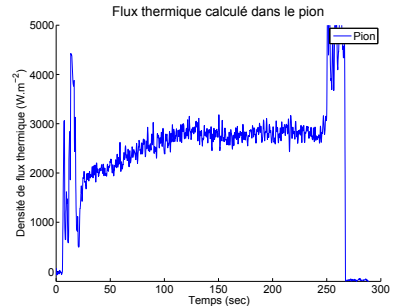
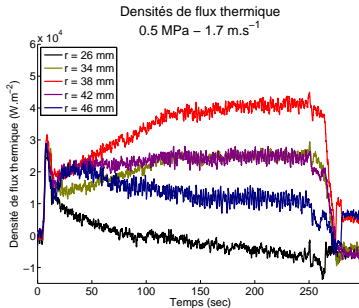
Signaux mesurés dans le disque (Tribomètre Basse Vitesse)

Densité de flux variable avec le position radiale

Calcul monodimensionnel simultanément dans le pion

$$0.45 < \alpha < 0.75$$

Identification thermique dans le disque



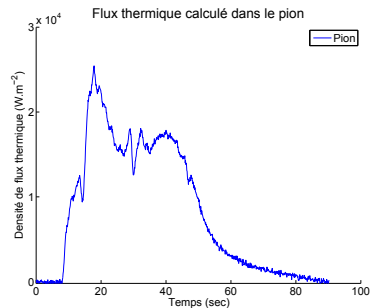
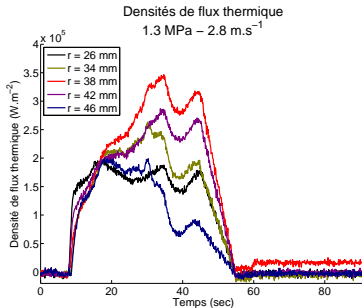
Signaux mesurés dans le disque (Tribomètre Basse Vitesse)

Densité de flux variable avec le position radiale

Calcul monodimensionnel simultané dans le pion

$$0.45 < \alpha < 0.75$$

Identification thermique dans le disque



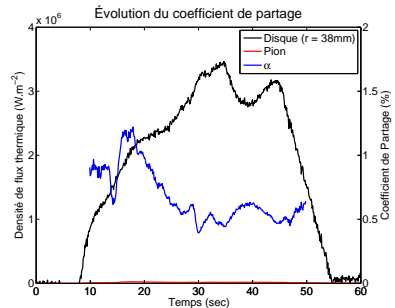
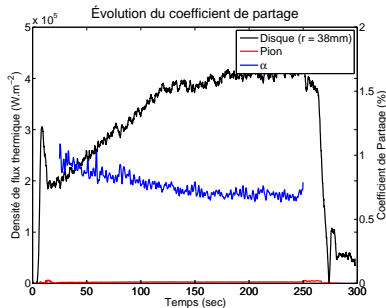
Signaux mesurés dans le disque (Tribomètre Basse Vitesse)

Densité de flux variable avec le position radiale

Calcul monodimensionnel simultané dans le pion

$$0.45 < \alpha < 0.75$$

Identification thermique dans le disque



Signaux mesurés dans le disque (Tribomètre Basse Vitesse)

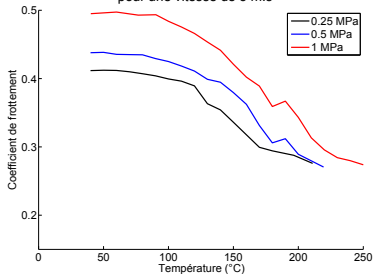
Densité de flux variable avec le position radiale

Calcul monodimensionnel simultané dans le pion

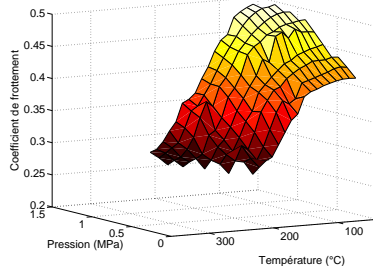
$$0.45 < \alpha < 0.75$$

Résine : comportement en frottement

Évolution du coefficient de frottement pour une vitesse de 5 m.s^{-1}



Évolution du coefficient de frottement pour une vitesse de 5 m.s^{-1}



Influence de T , P et $v_{\text{glissement}}$ sur $\mu_{\text{résine}}$

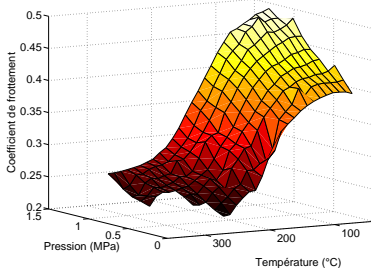
Température facteur prépondérant ($> 120 \text{ °C}$)

Attribué à une dégradation des propriétés mécaniques

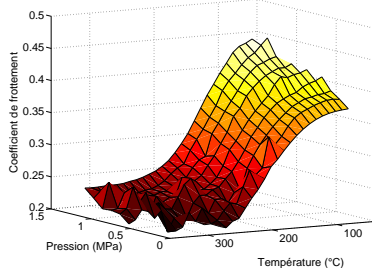
Effet de la pression et de la vitesse observables

Résine : comportement en frottement

Évolution du coefficient de frottement
pour une vitesse de 10 m.s^{-1}



Évolution du coefficient de frottement
pour une vitesse de 20 m.s^{-1}

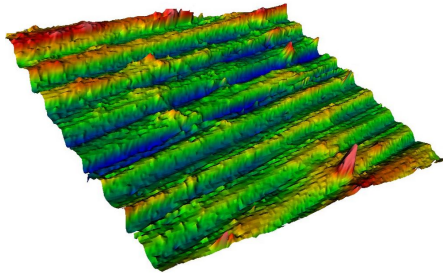


Influence de T , P et $v_{\text{glissement}}$ sur $\mu_{\text{résine}}$

Température facteur prépondérant ($> 120 \text{ }^\circ\text{C}$)

Attribué à une dégradation des propriétés mécaniques

Effet de la pression et de la vitesse observables

État de surface : Basse température ($T_S < 50\text{ }^\circ\text{C}$)

x,y - $0.5\text{ }\mu\text{m}$
z - 0.1 nm

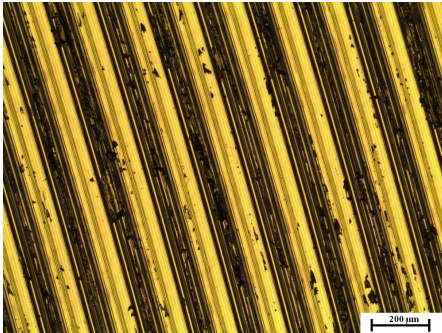


Usure régulière abrasive ($R_A \sim 0.6\text{ }\mu\text{m}$)

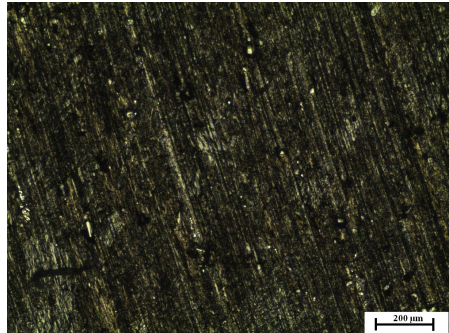
Labourage de la résine par la rugosité du disque ($R_A \sim 1.3\text{ }\mu\text{m}$)

Faible dépôt de matière sur le disque

État de surface : Basse température ($T_S < 50\text{ °C}$)



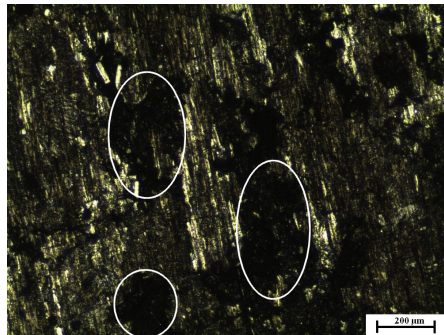
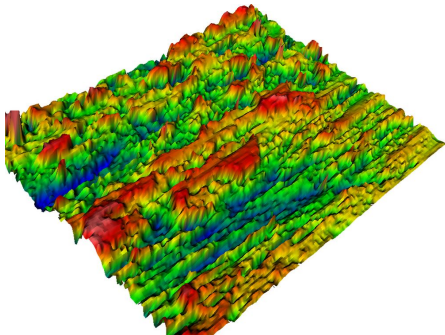
Usure régulière abrasive ($R_A \sim 0.6\text{ }\mu\text{m}$)



Labourage de la résine par la rugosité du disque ($R_A \sim 1.3\text{ }\mu\text{m}$)

Faible dépôt de matière sur le disque

État de surface : Haute température ($T_s > 300\text{ °C}$)

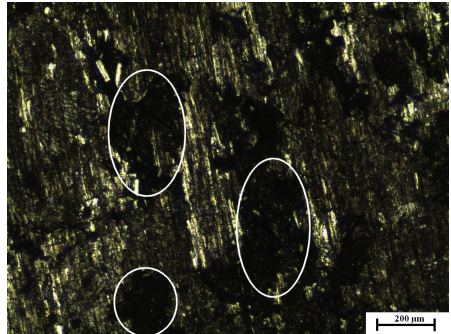
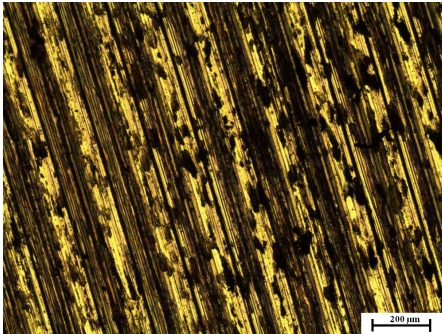


État de surface irrégulier (cavités et plateaux de contact)

Départ important de plaques de matière par délamination

Observables sur le disque : dépôt important

État de surface : Haute température ($T_s > 300\text{ °C}$)



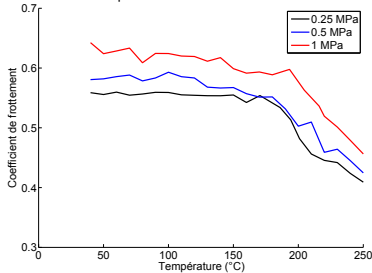
État de surface irrégulier (cavités et plateaux de contact)

Départ important de plaques de matière par délamination

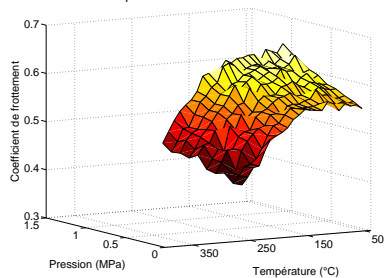
Observables sur le disque : dépôt important

Renforcé : comportement en frottement

Évolution du coefficient de frottement
pour une vitesse de 5 m.s^{-1}



Évolution du coefficient de frottement
pour une vitesse de 5 m.s^{-1}



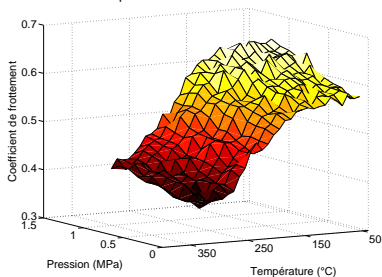
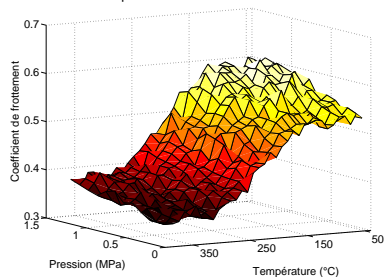
Température également le facteur le plus influant

Chute brutale repoussée au delà de 200 °C

Effet bénéfique du renforcement sur la stabilité de μ

Effet de la pression et de la vitesse similaires

Renforcé : comportement en frottement

Évolution du coefficient de frottement
pour une vitesse de 10 m.s^{-1} Évolution du coefficient de frottement
pour une vitesse de 20 m.s^{-1} 

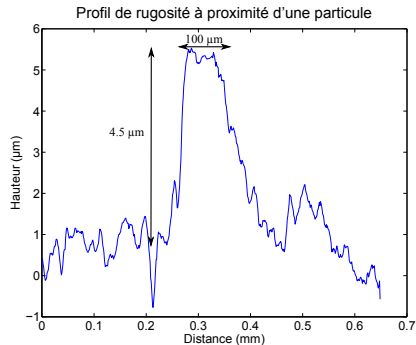
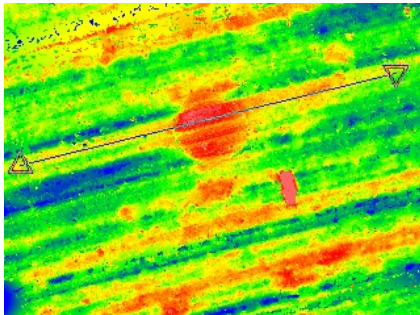
Température également le facteur le plus influant

Chute brutale repoussée au delà de 200 °C

Effet bénéfique du renforcement sur la stabilité de μ

Effet de la pression et de la vitesse similaires

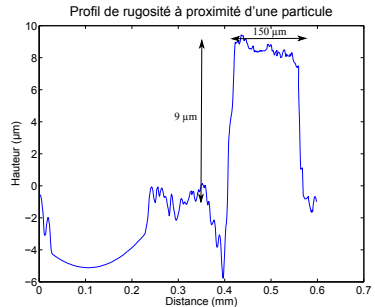
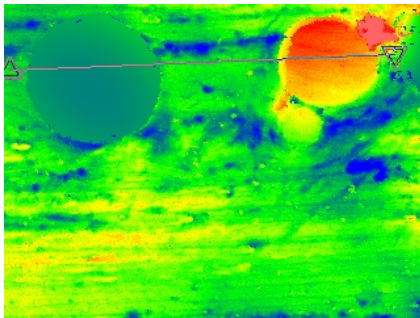
État de surface : Basse Température ($T_S < 50\text{ °C}$)



Formation de zones de contact privilégiées (particules)

Hauteur moyenne : 4-6 μm

Diamètre débouchant : 80-230 μm

État de surface : Haute Température ($T_s > 300\text{ °C}$)

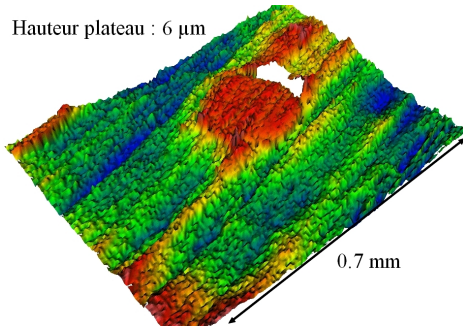
Hauteur du plateau plus importante : 8-15 μm

Présence de cavités témoignant du départ de particules

Diamètre de la cavité : 150-300 μm

Conclusion

Hauteur plateau : 6 μm



Répartition hétérogène de la pression

Échelle macroscopique
Échelle mésoscopique

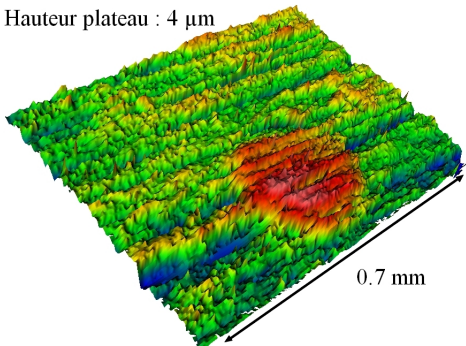
Localisation des phénomènes thermiques et de l'usure

Usure conditionnée par la tenue des renforts dans la matrice

Modélisation à l'échelle mésoscopique

Conclusion

Hauteur plateau : $4 \mu\text{m}$



Répartition hétérogène de la pression

Échelle macroscopique
Échelle mésoscopique

Localisation des phénomènes thermiques et de l'usure

Usure conditionnée par la tenue des renforts dans la matrice

Modélisation à l'échelle mésoscopique

Conclusion

Répartition hétérogène de la pression

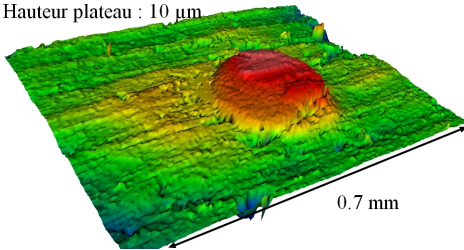
Échelle macroscopique
Échelle mésoscopique

Localisation des phénomènes thermiques et de l'usure

Usure conditionnée par la tenue des renforts dans la matrice

Modélisation à l'échelle mésoscopique

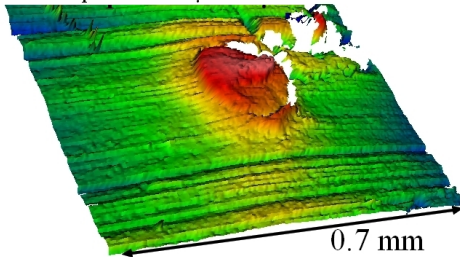
Hauteur plateau : 10 μm



0.7 mm

Conclusion

Hauteur plateau : 13 μm



Répartition hétérogène de la pression

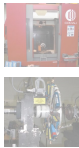
Échelle macroscopique
Échelle mésoscopique

Localisation des phénomènes thermiques et de l'usure

Usure conditionnée par la tenue des renforts dans la matrice

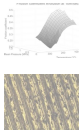
Modélisation à l'échelle mésoscopique

1



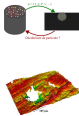
Plateforme High Speed Tribology
Moyens expérimentaux et numériques pour l'étude à l'échelle macroscopique

2



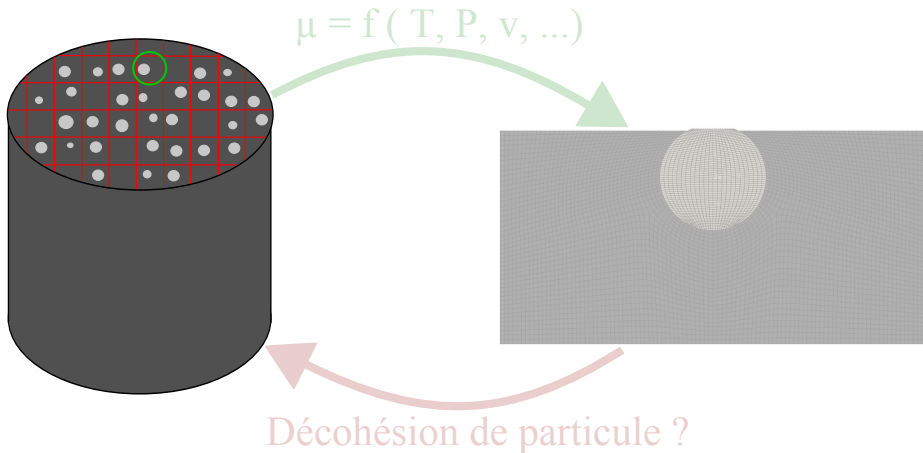
Comportement tribologique et thermique du matériau d'étude en configuration pion - disque

3

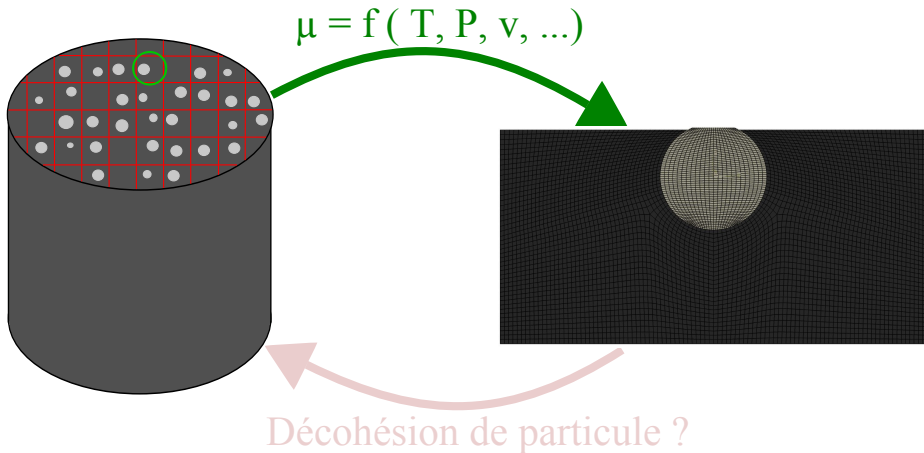


Stratégie de modélisation à l'échelle mésoscopique en vue de la prédiction de l'arrachement d'une particule

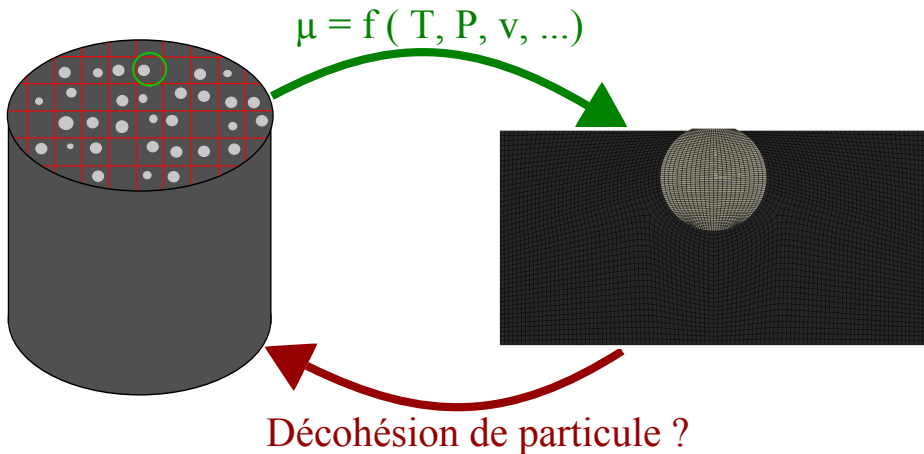
Stratégie numérique



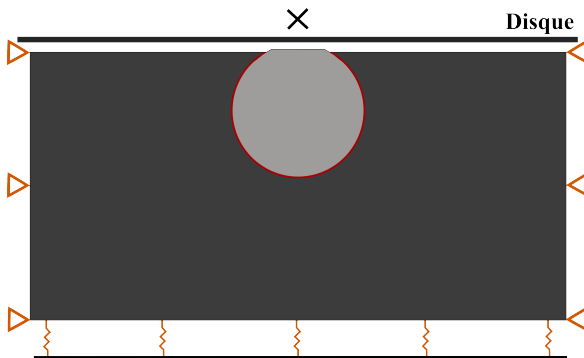
Stratégie numérique



Stratégie numérique



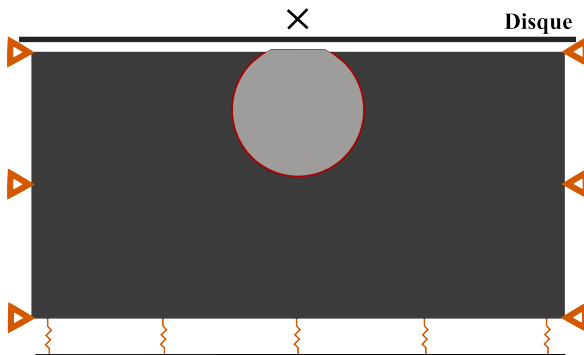
Volume Local d'Étude



Particule dans un volume de résine

Conditions aux Limites

Volume Local d'Étude

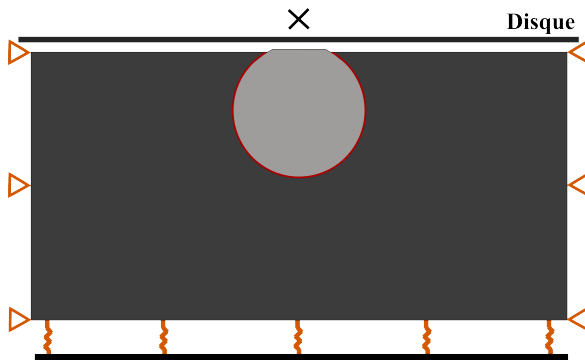


Particule dans un volume de résine

Conditions aux Limites

Symétrie : périodicité du VLE, contraintes planes

Volume Local d'Étude

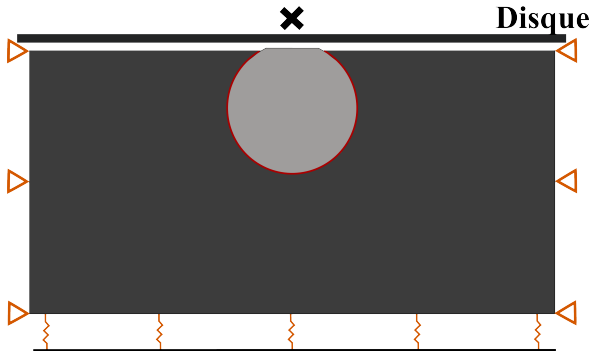


Particule dans un volume de résine

Conditions aux Limites

Rigidité sur la face arrière : éléments de connection reliés à une surface rigide

Volume Local d'Étude

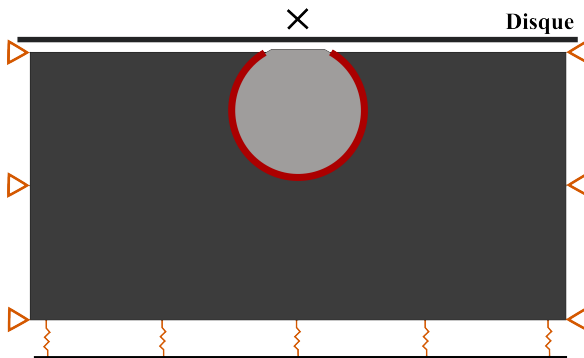


Particule dans un volume de résine

Conditions aux Limites

Disque : surface rigide guidée par un noeud de référence

Volume Local d'Étude

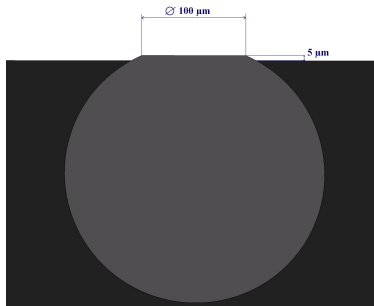


Particule dans un volume de résine

Conditions aux Limites

Liaison particule - résine : éléments cohésifs

Configurations mésoscopiques



4 configurations

Hauteur : 5 - 12 μm

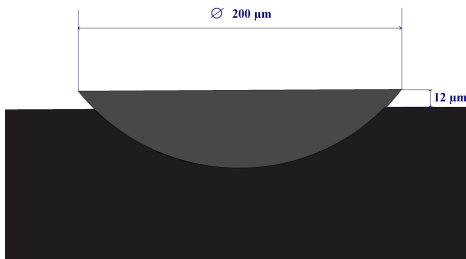
Particule peu usée
Diamètre : 100 μm

Particule usée
Diamètre : 200 μm

Conditions testées

	Min	Max
Température	20 °C	350 °C
Pression	0.25 MPa	5 MPa
μ	0.2	0.65

Configurations mésoscopiques



4 configurations

Hauteur : 5 - 12 μm

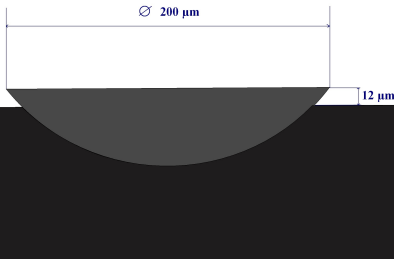
Particule peu usée
Diamètre : 100 μm

Particule usée
Diamètre : 200 μm

Conditions testées

	Min	Max
Température	20 °C	350 °C
Pression	0.25 MPa	5 MPa
μ	0.2	0.65

Configurations mésoscopiques



4 configurations

Hauteur : 5 - 12 μm

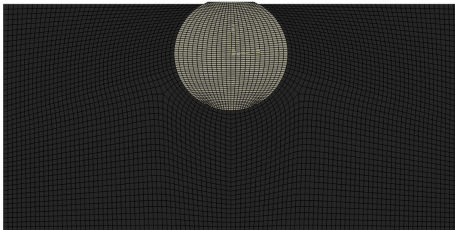
Particule peu usée
Diamètre : 100 μm

Particule usée
Diamètre : 200 μm

Conditions testées

	Min	Max
Température	20 °C	350 °C
Pression	0.25 MPa	5 MPa
μ	0.2	0.65

Volume Local d'Étude



Dimensions

Largeur : 1 mm

Hauteur : 0.5 mm

Éléments

Résine : 5100 - 6600

Particule : 500 - 1300

Interface : 42 - 132

Temps de calcul : 3 - 10 min

Paramètres matériaux

Comportement rhéologique de la résine dépendant de la température

À identifier dans la gamme rencontrée

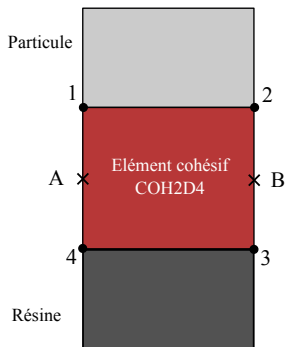
Nécessité d'une loi pour l'interface résine - particule

Particules : comportement élastique

E	ν
210 GPa	0.29

Modélisation de l'interface résine - particule

Loi de comportement cohésive



Élément à 4 noeuds
2 points d'intégration
Comportement $U - \sigma$

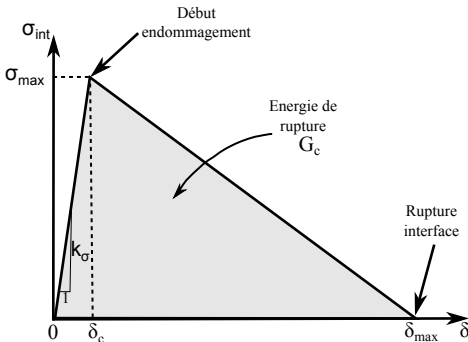
Rigidité de l'interface k_{σ}

Contrainte seuil σ_{max}

Énergie de rupture G_c

Modélisation de l'interface résine - particule

Loi de comportement cohésive



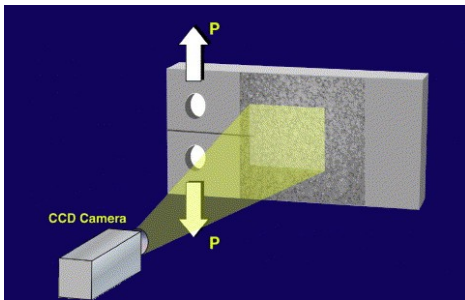
Élément à 4 noeuds
2 points d'intégration
Comportement U - σ

Rigidité de l'interface k_{σ}

Contrainte seuil σ_{max}

Énergie de rupture G_c

Identification expérimentale de la loi cohésive



Loi de comportement
mésoscopique à partir du
comportement macroscopique

Propagation d'une fissure : contrainte
hydrostatique de traction

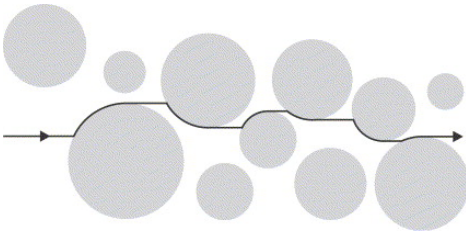
$$k_{\sigma} = f(E_m, \nu_m, E_p, \nu_p, f_p, \phi_p, \bar{K})$$

$$\sigma_{max} \simeq \bar{\sigma}$$

$$\bar{G} = G_c * A_c + G_m * A_m$$

Identification expérimentale de la loi cohésive

Loi de comportement
mésoscopique à partir du
comportement macroscopique



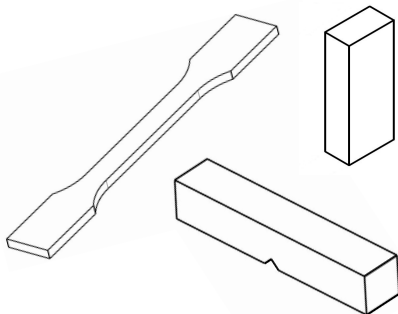
Propagation d'une fissure : contrainte
hydrostatique de traction

$$k_{\sigma} = f(E_m, \nu_m, E_p, \nu_p, f_p, \varnothing_p, \bar{K})$$

$$\sigma_{max} \simeq \bar{\sigma}$$

$$\bar{G} = G_c * A_c + G_m * A_m$$

Essais de caractérisation



Traction : ASTM D638

Compression : ASTM D695

Flexion : ASTM D5045

Compaction de plaques sous étuve

160 °C - 5 MPa

Découpe par jet d'eau

Essais de caractérisation



Traction : ASTM D638

Compression : ASTM D695

Flexion : ASTM D5045

Compaction de plaques sous étuve

160 °C - 5 MPa

Découpe par jet d'eau

Essais de caractérisation



Traction : ASTM D638
Compression : ASTM D695
Flexion : ASTM D5045

Compaction de plaques sous étuve

160 °C - 5 MPa
Découpe par jet d'eau

Rhéologie de la résine

Traction uniaxiale

Compression uniaxiale

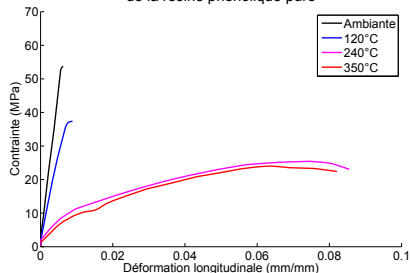
Augmentation de la ductilité avec la température

Thermodépendance importante

E

20 °C 8.0 GPa
350 °C 0.8 GPa

Comportement en traction uniaxiale de la résine phénolique pure



Rhéologie de la résine

Traction uniaxiale

Compression uniaxiale

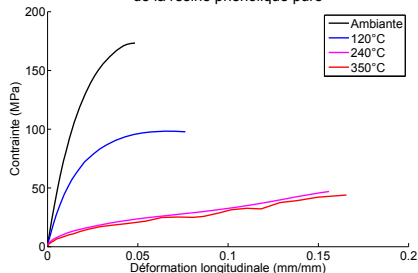
Augmentation de la ductilité avec la température

Thermodépendance importante

E

20 °C 8.0 GPa
350 °C 0.8 GPa

Comportement en compression uniaxiale de la résine phénolique pure



Rhéologie de la résine

Traction uniaxiale

Compression uniaxiale

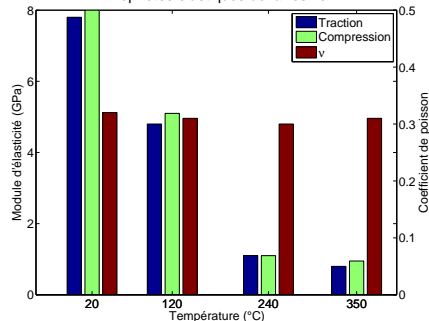
Augmentation de la ductilité avec la température

Thermodépendance importante

E

20 °C 8.0 GPa
350 °C 0.8 GPa

Propriétés élastiques de la résine



Flexion 3 points sur éprouvettes entaillées

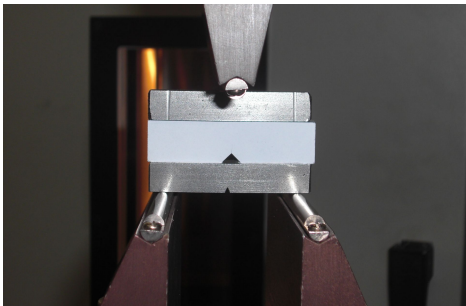
Préfissuration par essai sandwich

Initiation de la fissure
pour matériau fragile

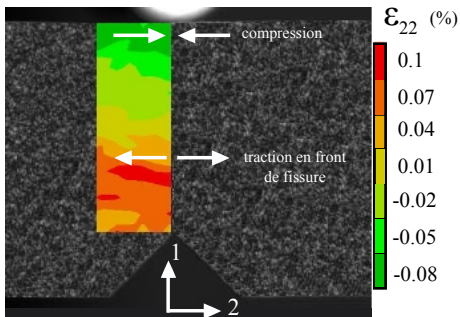
Mesure de la déformation à
proximité de la pointe de la fissure

Calcul de l'énergie de rupture

Résine pure
Composite



Flexion 3 points sur éprouvettes entaillées



Préfissuration par essai sandwich

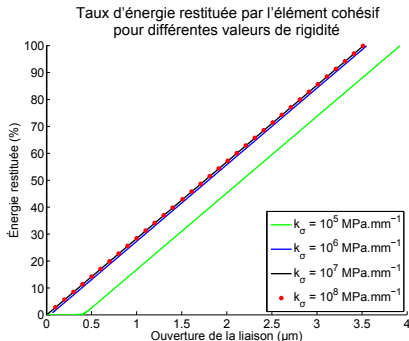
Initiation de la fissure
pour matériau fragile

Mesure de la déformation à
proximité de la pointe de la fissure

Calcul de l'énergie de rupture

Résine pure
Composite

Loi cohésive

Identification de k_{σ}

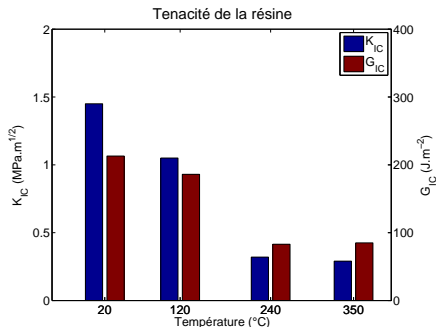
Module de d'élasticité isostatique du composite \bar{K} inconnu

Étude de sensibilité et comparaison bibliographique

$$k_{\sigma} = 1.10^6 \text{ MPa.mm}^{-1}$$

Température (°C)	k_{σ} (MPa.mm ⁻¹)	σ_{max} (MPa)	G_c (J.m ⁻²)
20	1.10^6	41.0	72
350	1.10^6	12.1	24.8

Loi cohésive



Taux de restitution d'énergie de la résine

Nécessaire pour découpler la part d'énergie restituée par la matrice et l'interface dans le composite

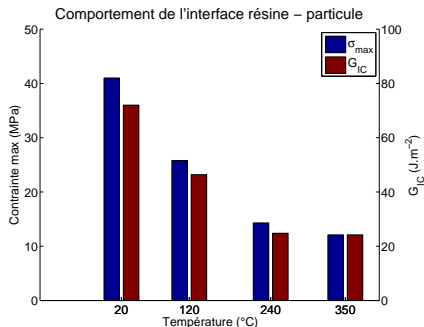
G_m décroissante avec la température

$$G_m(20^\circ\text{C}) = 215 \text{ J.m}^{-2}$$

$$G_m(350^\circ\text{C}) = 85 \text{ J.m}^{-2}$$

Température (°C)	k_σ (MPa.mm ⁻¹)	σ_{max} (MPa)	G_c (J.m ⁻²)
20	1.10^6	41.0	72
350	1.10^6	12.1	24.8

Loi cohésive



Contrainte seuil σ_{max}

Évaluée avec la déformation
($\bar{E} = 42.6 - 48.4$ GPa)

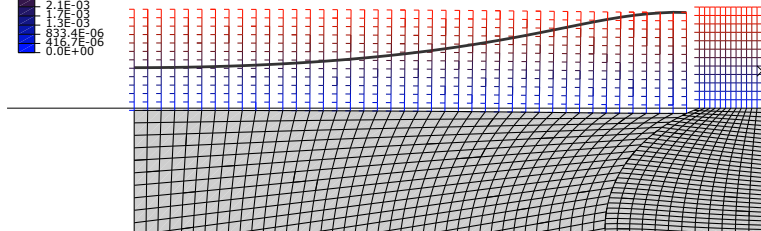
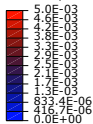
Taux de restitution d'énergie de
l'interface G_c

Aire de l'interface : 20%

Température (°C)	k_{σ} (MPa.mm ⁻¹)	σ_{max} (MPa)	G_c (J.m ⁻²)
20	1.10^6	41.0	72
350	1.10^6	12.1	24.8

Formation de plateaux de contact

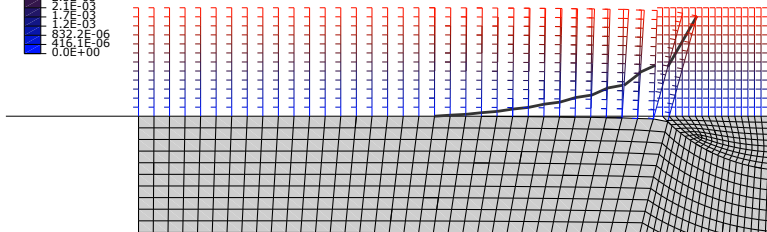
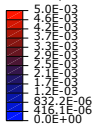
Distance disque - résine (mm)



Élévation de température et la perte de rigidité de la matrice permet d'expliquer la formation de plateau et des différences de hauteur

Formation de plateaux de contact

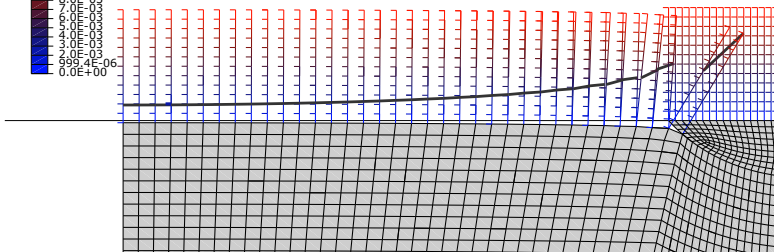
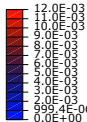
Distance disque - résine (mm)



Élévation de température et la perte de rigidité de la matrice permet d'expliquer la formation de plateau et des différences de hauteur

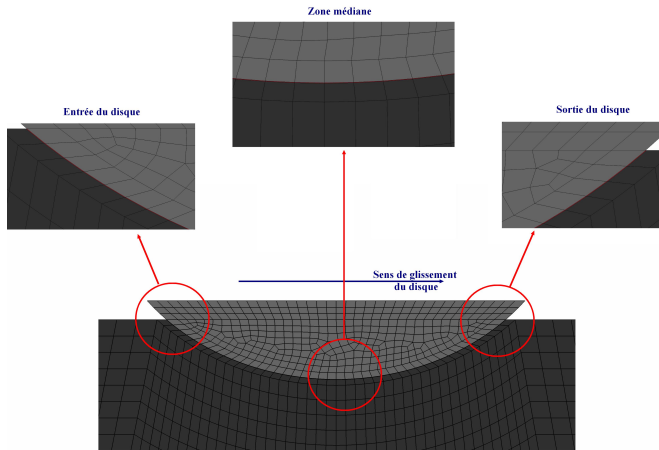
Formation de plateaux de contact

Distance disque - résine (mm)



Élévation de température et la perte de rigidité de la matrice permet d'expliquer la formation de plateau et des différences de hauteur

Zones d'intérêt

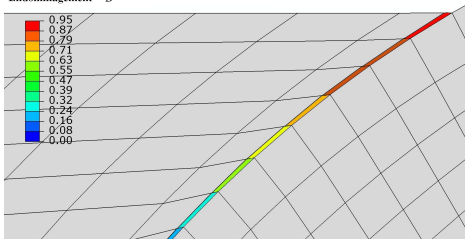


Zone médiane
en compression

Entrée - sortie
cisailées

Particule peu utilisée

Endommagement D



Endommagement faible

Entrée - Sortie

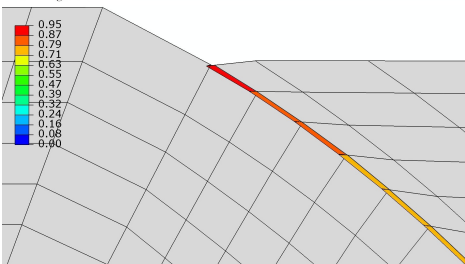
Aucune énergie restituée
à faible pression

↗ Température, ↗ Énergie

4% au maximum

Particule peu utilisée

Endommagement D



Endommagement faible

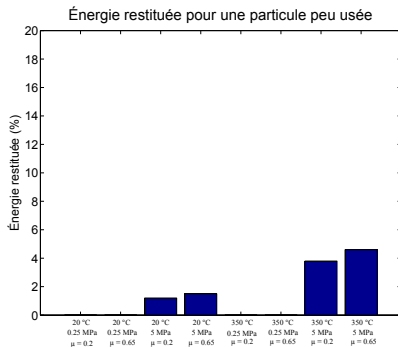
Entrée - Sortie

Aucune énergie restituée
à faible pression

↗ Température, ↗ Énergie

4% au maximum

Particule peu usée



Endommagement faible

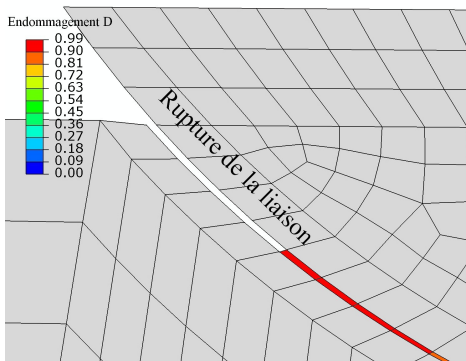
Entrée - Sortie

Aucune énergie restituée
à faible pression

↗ Température, ↗ Énergie

4% au maximum

Particule utilisée



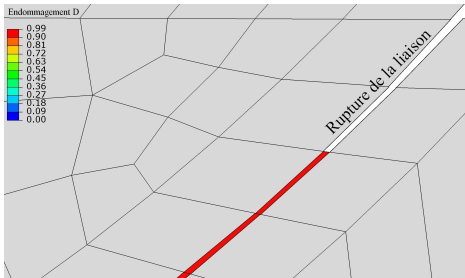
Comportement similaire
localisation entrée - sortie
avec rupture d'éléments

Initiation zone médiane

Énergie restituée ↗
quand T ↗ et P ↗

18% au maximum

Particule utilisée



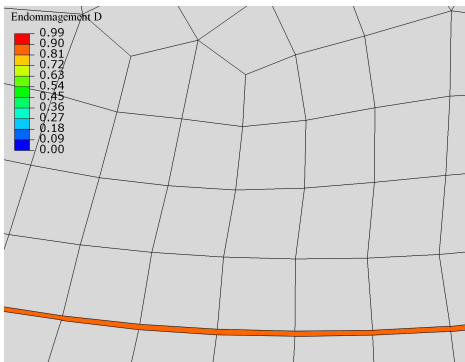
Comportement similaire
localisation entrée - sortie
avec rupture d'éléments

Initiation zone médiane

Énergie restituée ↗
quand T ↗ et P ↗

18% au maximum

Particule utilisée



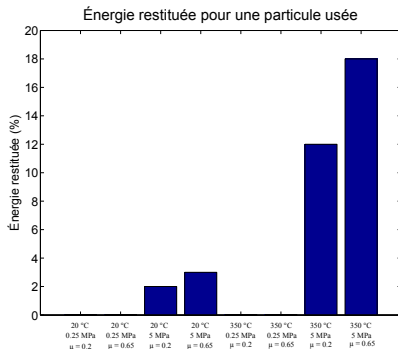
Comportement similaire
localisation entrée - sortie
avec rupture d'éléments

Initiation zone médiane

Énergie restituée ↗
quand T ↗ et P ↗

18% au maximum

Particule usée



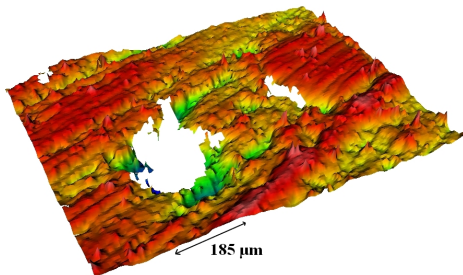
Comportement similaire
localisation entrée - sortie
avec rupture d'éléments

Initiation zone médiane

Énergie restituée ↗
quand T ↗ et P ↗

18% au maximum

Corrélations



Numérique

Pas d'arrachement

Dégradation importante hautes T et P

Expérimental

Nombre de particules arrachées ↗

Conditions sévères :

$T_S > 300 \text{ °C}$, $P_{\text{moy}} > 1 \text{ MPa}$

Prise en compte des aspects dynamiques, fatigue, ...

Corrélations

Numérique

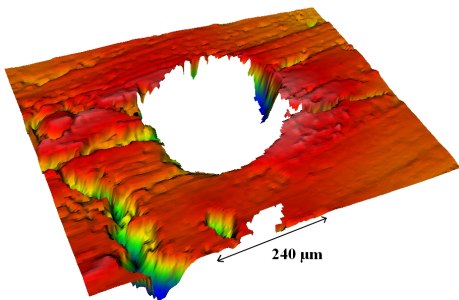
Pas d'arrachement

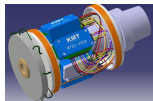
Dégradation importante hautes T et P

Expérimental

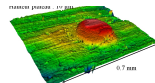
Nombre de particules arrachées ↗

Conditions sévères :

 $T_S > 300 \text{ °C}$, $P_{\text{moy}} > 1 \text{ MPa}$ Prise en compte des
aspects dynamiques, fatigue, ...



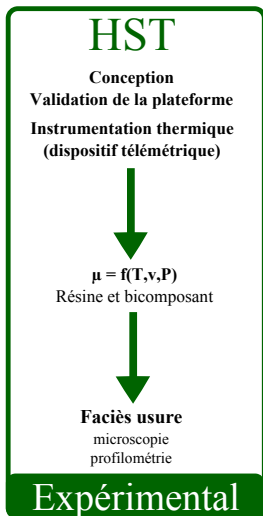
Conclusions et perspectives



Apport des travaux

Perspectives d'études

Conclusions



Tribomètre grande vitesse

Loi de comportement en frottement

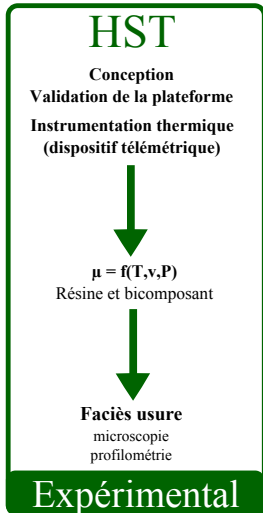
$$\mu = f(T, P, v)$$

Étude sur un matériau
de composition simplifiéeCorrespondance mode d'usure -
propriétés mécaniques avec
température

Apport des travaux

Perspectives d'études

Conclusions



Modèles inverses

Localisation thermique sur le pion
Attribuée à une localisation de l'effort
Partage de flux dans disque et pion

Dispositif télémétrique pour
mesure sur système tournant

Répartition du flux thermique
sur le disque

Apport des travaux

Perspectives d'études

Conclusions

Modélisation à l'échelle des renforts

Formation des plateaux

Probabilité de décohésion

Haute pression

Haute température

Particule usée

Modèle local



Comportement
volumique
thermodépendant

Configurations géométriques

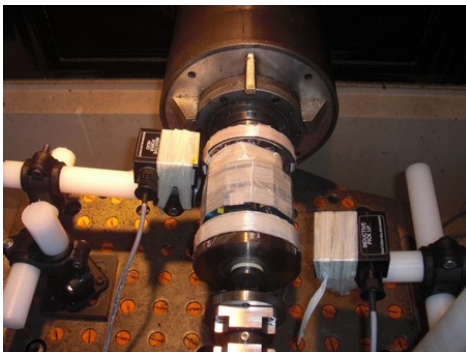
Sollicitations
thermomécaniques
représentatives



Décohésion
d'une particule ?

Numérique

Plateforme High Speed Tribology



Atteindre des vitesses de 50 m.s^{-1}

Transfert du dispositif
téléométrique sur HST

Validation à $4000 \text{ trs.min}^{-1}$
(15 m.s^{-1})

Flux thermiques identifiables sur
la partie tournante

Partage de flux

Résistance thermique

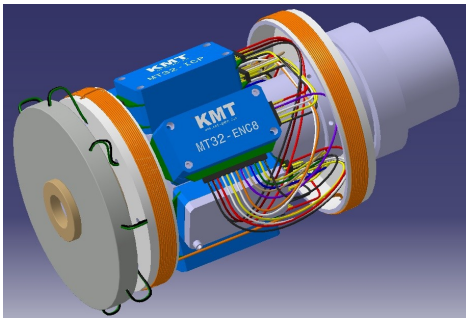
Distribution sur la surface

Plateforme High Speed Tribology

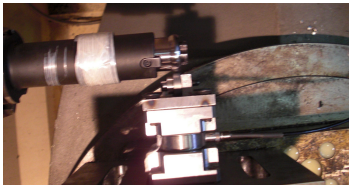
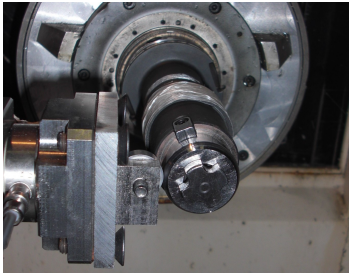
Investiguer le rôle des
phénomènes vibratoires μ

Adapter des accéléromètres à la
télémessure

Lois de frottement identifiés sur
plaquettes (thèse A.Eussaf)



Plateforme High Speed Tribology



Investiguer le rôle des phénomènes vibratoires μ

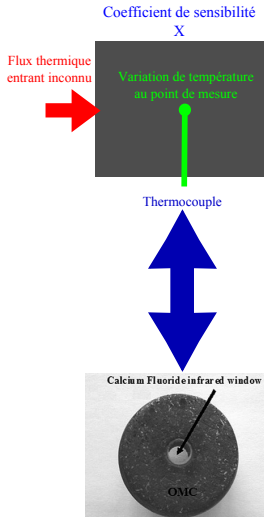
Adapter des accéléromètres à la télémessure

Lois de frottement identifiés sur plaquettes (thèse A.Eussaf)

Étudier le contact pour d'autres applications

Essais préliminaires en conditions d'usinage

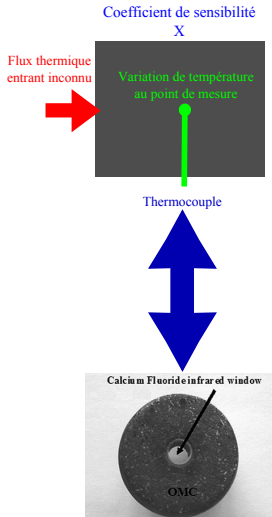
Thermique du contact



Couplage des méthodes inverses à une technique optique locale

Mesure dans le contact
Pyromètre bichromatique
Fluorine transparent aux IR

Thermique du contact



Accès simultané à :

Température du disque dans le contact

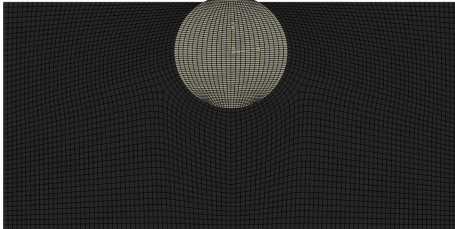
Émissivité

Partage de flux

Résistance thermique

Modélisation à l'échelle des particules

Évolution du modèle VLE



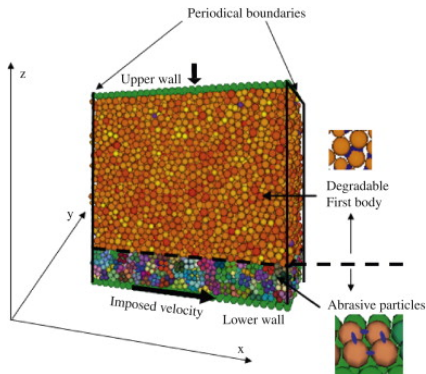
Effets dynamiques

Endommagement

Dilatations de l'interface
(gradients thermiques)

Identification de lois cohésives sous
diverses sollicitations

Modélisation à l'échelle des particules



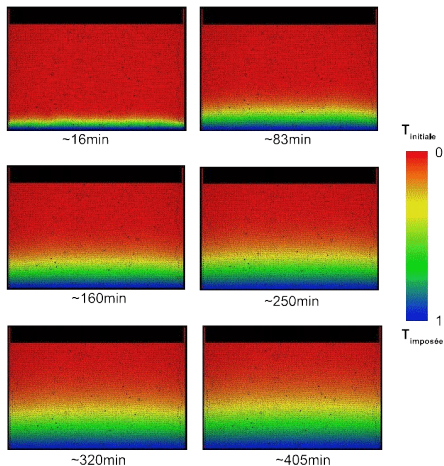
Apport de la DEM pour la
compréhension de mécanismes
locaux

Circulation et interactions
entre débris

Prédiction d'usure

I.Iordanoff & al., A discrete element model to investigate sub-surface damage due to surface polishing,
Tribology International 41 (2008), 957-964

Modélisation à l'échelle des particules



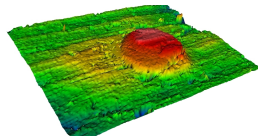
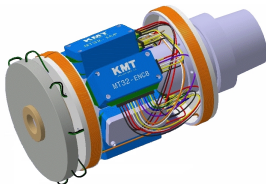
Apport de la DEM pour la
compréhension de mécanismes
locaux

Circulation et interactions
entre débris

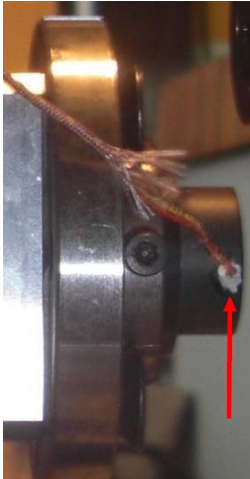
Prédiction d'usure

Transfert de l'énergie
dans un milieu discret

Merci pour votre attention



Instrumentation des thermocouples



Pion

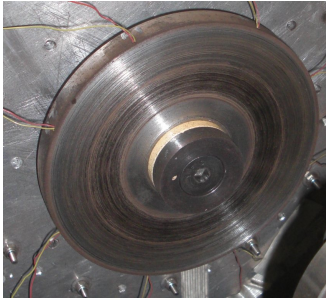
Profondeur : +/- 0.1 mm

Épaisseur : mesure après perçage

Fixation et remplissage du trou
avec une pâte ciment

Conductivité et diffusivité thermique
du même ordre de grandeur

Instrumentation des thermocouples



Disque

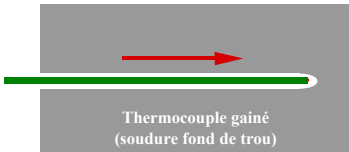
Profondeur : +/- 0.1 mm

Épaisseur : +/- 0.05 mm

Soudure par décharge capacitive

Approche du TC gainé

Contact en fond de trou

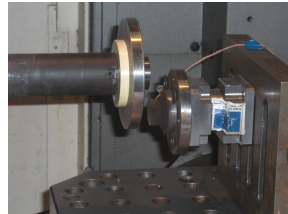


Dimensionnement à échelle réduite

Échelle réelle



Échelle réduite



$$\Delta\theta(\tau) = \frac{2}{\epsilon_{disque} \sqrt{\pi}} \varphi_{disque} \sqrt{t_f} \left(1 - \frac{2}{3} * \tau\right) \sqrt{\tau} \quad (\text{Newcomb})$$

$$\frac{S_{disque}^{reel}}{S_{disque}^{reduit}} = \frac{S_{garniture}^{reel}}{S_{garniture}^{reduit}} = \frac{E_{cinetique}^{reel}}{E_{cinetique}^{reduit}} = k$$

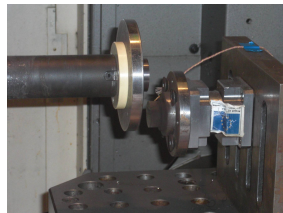
$$k = 5$$

Dimensionnement à échelle réduite

Échelle réelle


 $\varnothing_{\text{disque}} \sim 290 \text{ mm}$
 $\text{Épaisseur}_{\text{disque}} \sim 10 \text{ mm}$
 $R_{\text{moy}_{\text{disque}}} \sim 128 \text{ mm}$
 $S_{\text{plaquette}} \sim 2300 \text{ mm}^2$
 $\text{Rapport surface} \sim 8\text{-}10 \%$

Échelle réduite


 $\varnothing_{\text{disque}} \sim 100 \text{ mm}$
 $\text{Épaisseur}_{\text{disque}} \sim 10 \text{ mm}$
 $R_{\text{moy}_{\text{disque}}} \sim 36 \text{ mm}$
 $\varnothing_{\text{pion}} \sim 450 \text{ mm}^2$
 $\text{Rapport surface} \sim 8.3 \%$

Dimensionnement à échelle réduite

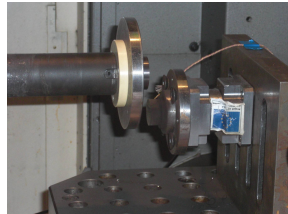
Échelle réelle



Équivalence Vitesse

5	m.s^{-1}	→	35	km.h^{-1}
10	m.s^{-1}	→	70	km.h^{-1}
20	m.s^{-1}	→	140	km.h^{-1}

Échelle réduite



Équivalence Pression

0.25	MPa	→	16	bar
0.5	MPa	→	33	bar
1	MPa	→	65	bar

Identification loi cohésive

Équivalence des contraintes

Particules \varnothing 200-300 μm

$$\alpha_N = \frac{3(1-\nu_m)}{2E_m \left(\frac{1}{k_{\sigma} a_N} + \frac{1-2\nu_p}{E_p} + \frac{1}{4\mu_m} \right)}$$

$$\sigma^{int} = \alpha_N * \sigma^m$$

$$\alpha_N = 0.96-1.17$$

Répartition des charges



Rapport des surfaces
18-24% selon essai