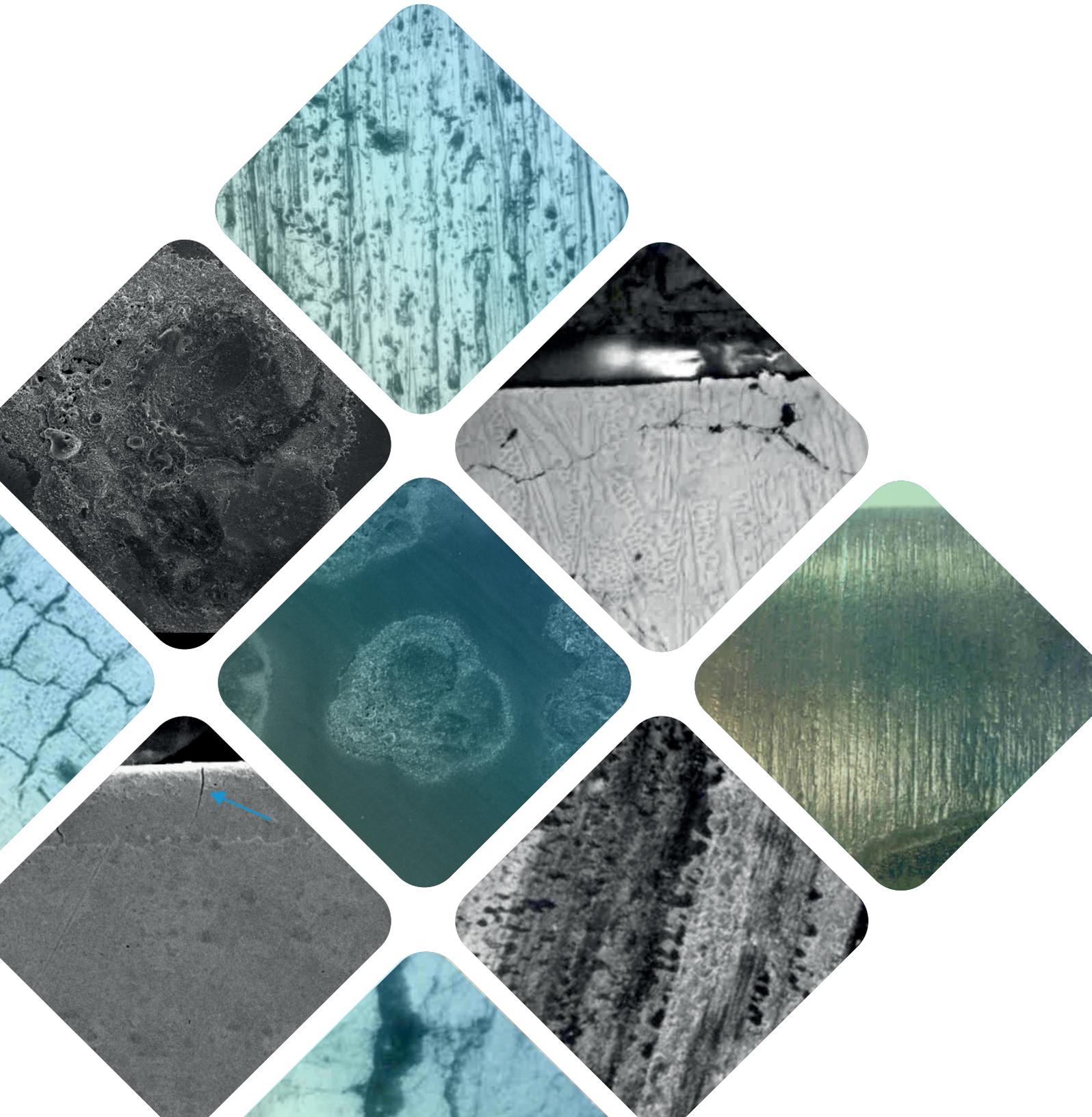


**Solutions tribologiques aux différents types d'usure**





### Le métier d'HEF, l'ingénierie des matériaux de surface :

son positionnement, multi-spécialiste en traitements de surface à façon et composants, intégré verticalement, leader en tribologie, challenger en photonique et émergent sur les technologies de l'hydrogène.

Le groupe HEF adresse prioritairement 5 secteurs cibles : **la mobilité, la construction, les énergies décarbonées, la défense et le spatial et le médical.**

# PROBLÈMES TRIBOLOGIQUES ET SOLUTIONS USURE par ADHÉSION/GRIPPAGE

Sous l'effet de hautes températures et/ou de pressions et vitesses de travail élevées, des jonctions (points d'adhésion, soudage) peuvent apparaître entre les aspérités des matériaux en contact (1).

Dans ce cas, la poursuite du mouvement nécessite :

- Le cisaillement et la rupture des jonctions nouvellement formées (cas le plus favorable, entraînant une usure moins importante) (1b)
- Ou, si les jonctions sont suffisamment résistantes, la rupture des fragments d'un des matériaux en contact, provoquant des dégâts plus importants. (1c)

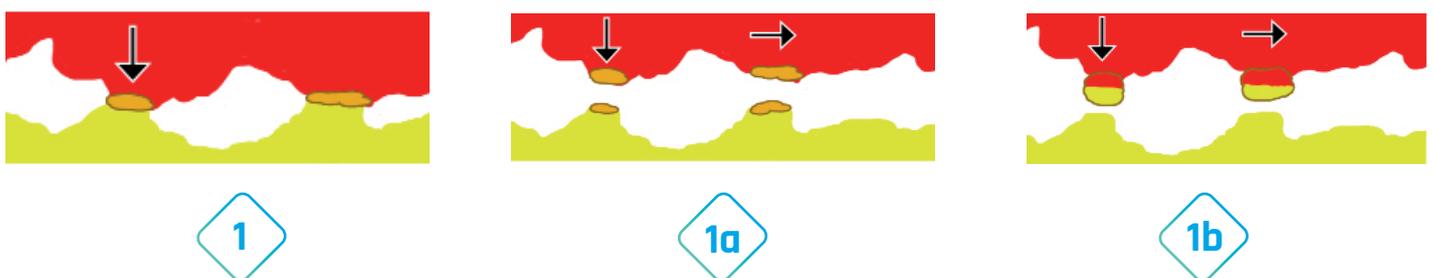
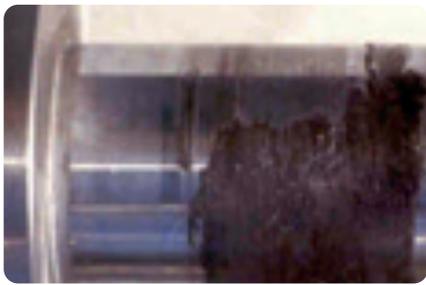


Figure 1 : Le mécanisme d'usure par adhésion

Dans les cas extrêmes, lorsque la densité des jonctions dépasse une valeur critique, le mouvement est bloqué : c'est le phénomène de grippage

En règle générale, l'usure par adhésion est identifiée par le fait que le matériau d'une des surfaces en contact se transfère et reste adhérent à la contrepièce.

Un exemple est illustré ci-après, où un arbre recouvert de chrome dur présenté à une défaillance catastrophique due à l'adhérence de son revêtement sur la surface du palier.



2a



2b

Figures 2 : arbre en acier revêtu de chrome dur (a) et palier présentant des résidus de chrome (b)

## Nos solutions

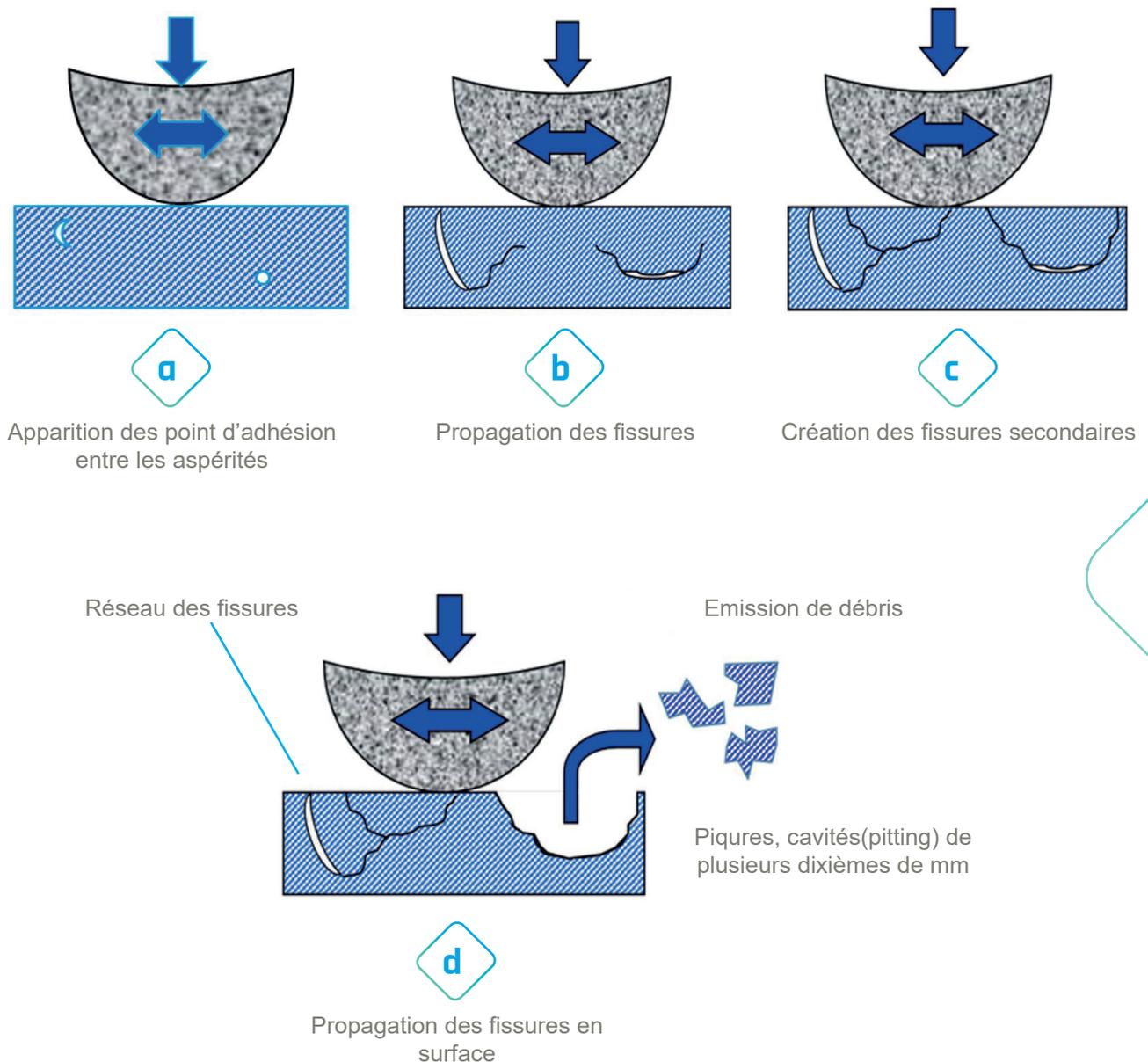
- Sélection de matériaux à faible compatibilité métallurgique pour limiter le risque d'adhésion
- Application de traitements de surface (dépôt, diffusion ou conversion)
- Conception adéquate en termes de topographie, rugosité, jeu et alignement des surfaces
- Emploi de matériaux aux caractéristiques autolubrifiantes
- Application de revêtements à base de lubrifiants solides
- Utilisation de surfaces poreuses imprégnées de lubrifiants
- Amélioration de la lubrification et de la dissipation d'énergie du système

# FATIGUE DES SURFACES

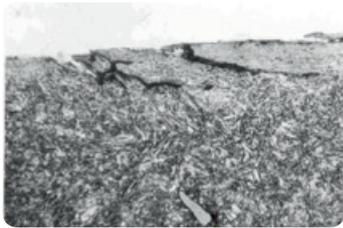
Le phénomène de **fatigue superficielle** est caractéristique des systèmes qui font l'objet de charges cycliques lors de leur fonctionnement, tels que le glissement, le roulement, les chocs (notamment les chemins de roulement, les engrenages, etc.). Cela provoque l'accumulation de tensions à la surface, ou en dessous de celle-ci; il en résulte la génération d'une défaillance consistant en un micro-écaillage des couches superficielles du matériau.

À chaque cycle (du système), les tensions appliquées sur le matériau génèrent, à la surface ou en dessous de celle-ci, une accumulation de microdéformations plastiques. À mesure que les microdéformations s'accumulent, des fissures apparaissent et se propagent. Lorsqu'elles se rejoignent, ces fissures entraînent une défaillance de la surface par apparition de micro-écailles qui se détachent, ces fissures entraîneront une défaillance de la surface due à l'apparition d'écailles (pitting), par le détachement et de l'émission de fragments (débris) de matériau.

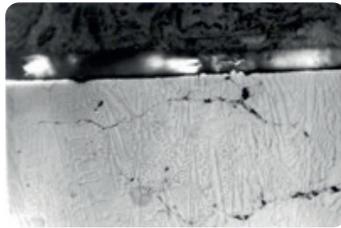
La Figure 3 ci-après illustre ce processus : fatigue superficielle et pitting



Figures : fatigue superficielle initiée de manière superficielle (a) et en sous-couche (b)  
Figure c : écailles de pitting sur les dents d'un engrenage



a



b



c

## Nos solutions

- Diminution des pressions de contact
- Sélection de matériaux présentant des propriétés mécaniques appropriées
- Introduction d'un champ de contraintes résiduelles de compression à la surface : opérations d'écaillage mécanique (grenailage, galetage) ou traitements de diffusion (nitruration, cémentation)
- Conception adéquate en termes de topographie, rugosité, jeu et alignement des surfaces
- Application de traitements superficiels pour la réduction du coefficient de frottement du système
- Amélioration de la lubrification du système
- Utilisation de traitements de surface retenant les lubrifiants
- Sélection de matériaux présentant des microstructures homogènes et sans défauts

# ABRASION

L'usure par abrasion peut survenir dans le cadre de deux mécanismes différents :

Abrasion à deux corps et abrasion à trois corps.

Dans le premier cas, l'abrasion est due à l'action des irrégularités ou des aspérités présentes sur une surface qui «grattent» l'autre surface lors du mouvement relatif.

Dans le second cas, l'effet est causé par la présence d'un troisième corps (souvent des débris, poussières, ou particules abrasives) entre les surfaces en mouvement.

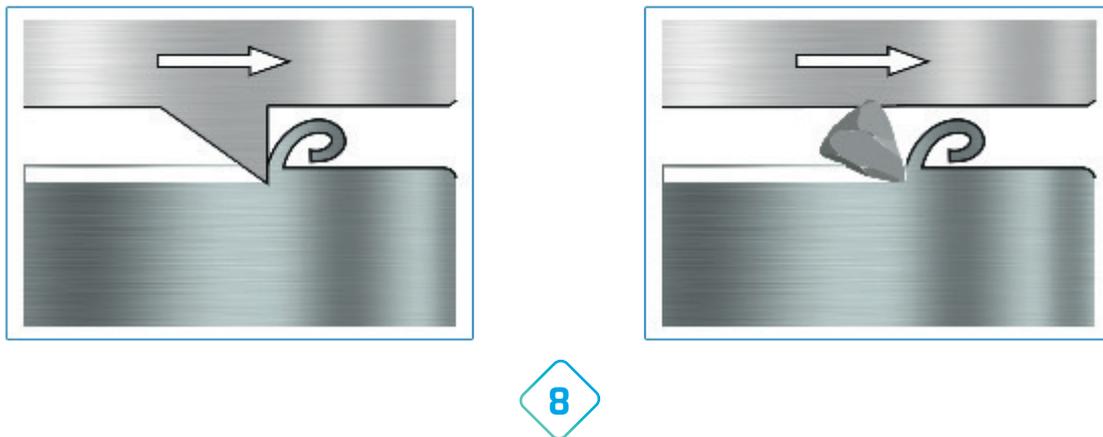


Figure 8 : abrasion à deux corps et abrasion à trois corps

Il est donc possible que le troisième corps soit composé de fragments (débris) générés par le processus d'abrasion à deux corps. Dans ce cas, le système, qui commence avec un processus d'abrasion à deux corps, évolue en un système d'abrasion à trois corps.

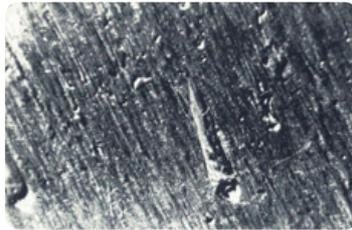
En fonction des caractéristiques du système (environnement, nature des matériaux, caractéristiques des surfaces, etc.), deux modes de défaillances peuvent être observés :

- **Déformation plastique du matériau due à l'action de l'abrasif :**  
Il s'agit d'une abrasion par déformation (Figure 9).
- **Déchirement du matériau par « usinage » de la surface :**  
Il s'agit d'une abrasion par enlèvement (Figure 10).

Dans les deux cas, les stries de l'abrasion sont parfois isolées, de longueur variable et peuvent s'interrompre brusquement. Dans le cadre de l'abrasion par enlèvement, les stries peuvent s'interrompre et rayer de manière généralisée la surface du matériau. Un exemple de ce cas est présenté en Figure 11.



9



10



11

Figures 9 et 10 : abrasion par déformation (9) et abrasion par enlèvement (10)  
Figure 11 : surface complètement rayée par le processus abrasif

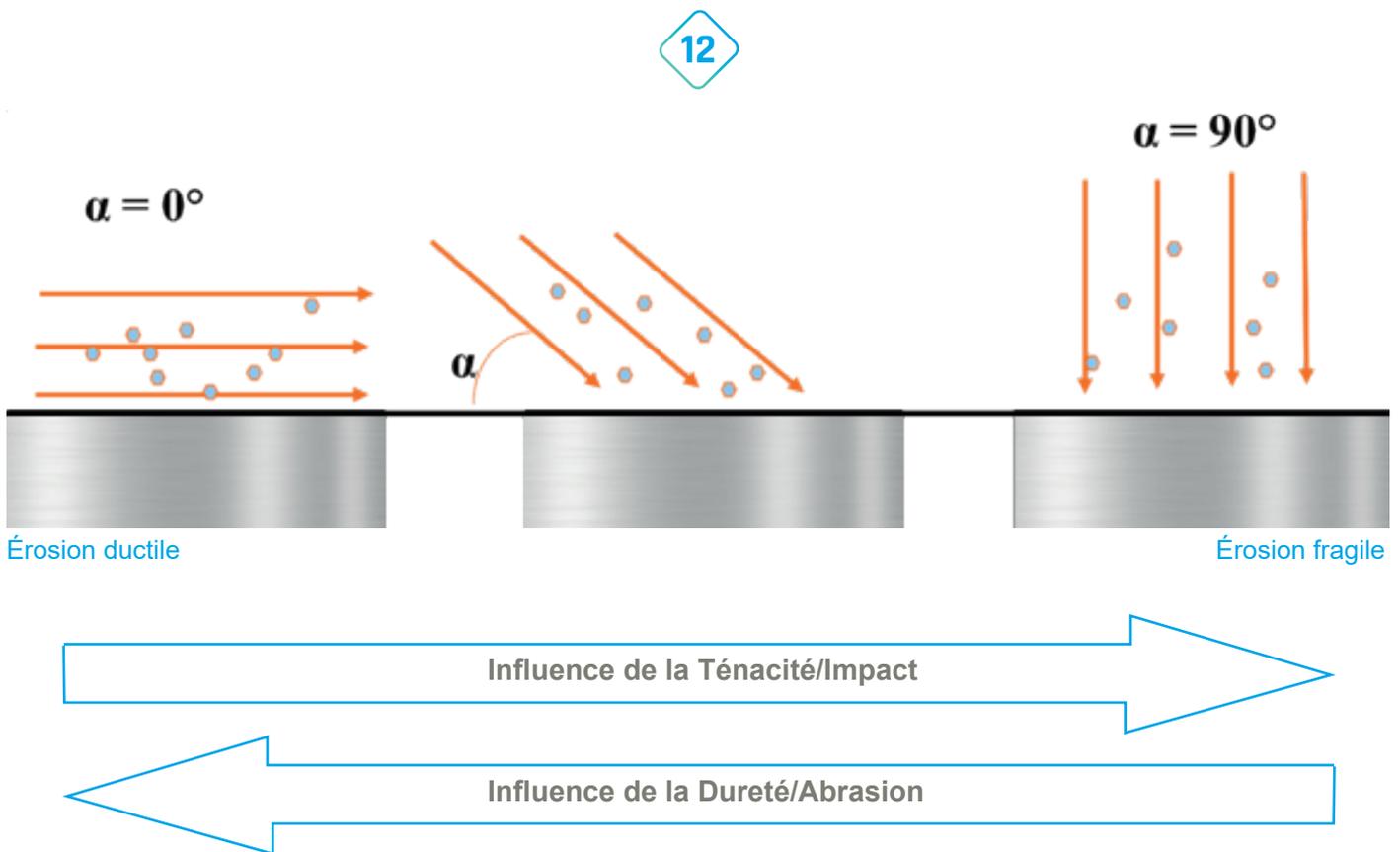
## Nos solutions

- Prévention de l'entrée du matériau abrasif dans le système
- Design avec des gorges / cavités pour le piégeage des fragments et leur élimination de la zone de contact
- Conception adéquate en termes de topographie, rugosité, jeu et alignement des surfaces
- Sélection de matériaux durs ou utilisation de traitements thermiques de durcissement
- Application de traitements thermiques et/ou thermo-chimiques augmentant de manière significative la dureté des surfaces
- Sélection de matériaux déformables et/ou élastiques, en fonction du cas

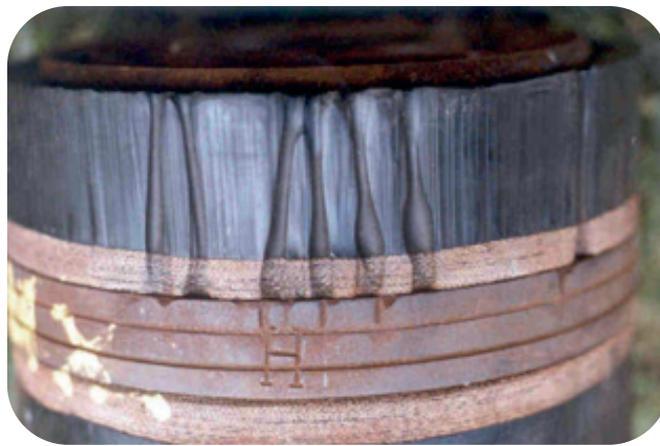
# ÉROSION

Le phénomène d'érosion est relativement semblable à celui d'abrasion à trois corps. En effet la défaillance de la surface est causée par l'impact d'un troisième corps en mouvement par rapport à la surface attaquée. La principale différence est que l'érosion survient lorsque le matériau abrasif est transporté par un fluide. La nature et la gravité du phénomène dépendent de divers facteurs, tels que la taille des particules, leur forme, la dureté, etc.

Un facteur important des phénomènes d'érosion est l'angle d'incidence des particules par rapport à la surface attaquée. Il peut favoriser l'effet de rayure de la surface (érosion ductile) dans le cas d'angle d'incidence bas ou l'impact des particules contre la surface (érosion fragile) pour les angles élevés. Dans le premier cas, la dureté de la surface attaquée est le facteur déterminant pour la résistance du système. Dans le second cas, un matériau à haute ténacité est à privilégier pour supporter l'impact des particules érosives.



La Figure 12 illustre ces situations.



13

La Figure 13 montre un piston de pompe endommagé par l'érosion. Dans cet exemple, une pompe opérant en déplaçant un fluide chargé en alumine.

## Nos solutions

- Prévention de l'entrée du matériau érosif dans le système
- Utilisation de traitements thermiques et/ou thermochimiques pour augmenter la dureté de la surface attaquée
- Sélection de matériaux présentant une dureté élevée, en fonction du cas
- Modification de la vitesse et/ou de l'angle d'attaque des particules érosives
- Sélection de matériaux déformables et/ou élastiques, en fonction du cas

# CAVITATION

L'usure par cavitation se caractérise par la présence d'accumulation de micro-cavités à la surface. La cavitation peut s'avérer destructrice lorsque les cavités débouchent de l'autre côté de la pièce (formation de trous).

Le phénomène survient lorsque des pièces sont en contact avec des **fluides** et en **mouvement relatif**. En fonction des caractéristiques géométriques du système, le fluide peut se trouver localement en dépression. Du gaz dissout à l'intérieur du fluide peut alors créer des bulles qui se fixent sur la surface. Lorsque celles-ci implosent, elles exercent une contrainte de traction, ce qui peut entraîner à la longue une rupture locale du matériau avec un lèvement de matière en «coup de cuillère».



14

Figure 14 : cavitation dans une chemise de piston

## Nos solutions

- Prévention de la présence d'impuretés à l'état solide dans les lubrifiants
- Prévention d'évolutions brusques de la pression et/ou de la température (travail sur la géométrie des pièces)
- Prévention de l'effervescence dans le liquide/lubrifiant
- Emploi de traitements pour augmenter la dureté de la surface attaquée
- Application de revêtements élastiques épais

# USURE DE CONTACT (USURE/CORROSION/FATIGUE PAR USURE DE CONTACT)

Le phénomène d'usure par contact ou fretting en anglais, est typique des systèmes opérant avec des mouvements relatifs de haute fréquence et basse amplitude.

Même la déformation élastique de certains composants du système peut suffire à causer une usure de ce type. Un bon exemple est la corrosion survenant entre les lames d'un ressort à lames, qui est causée par le mouvement relatif des surfaces des lames en contact, en conséquence de leur déformation élastique lors du fonctionnement. L'usure par fretting est particulièrement importante pour les structures et équipements soumis à des vibrations, une question particulièrement cruciale pour l'industrie aéronautique.

L'effet de l'usure de contact peut avoir différentes conséquences, en fonction des matériaux, des conditions du système et du moyen d'opération :

- **Usure par fretting** : lorsque les surfaces en contact génèrent des fragments/débris (usure par abrasion ou adhérence) qui, en l'absence d'une issue, restent dans le système et causent une usure abrasive.
- **Corrosion par fretting/corrosion de contact** : dans ce cas, les débris formés sont soumis à des transformations mécaniques et physico-chimiques en raison des conditions de fonctionnement du système. Ils deviennent des particules d'oxyde (généralement bien plus durs que le matériau d'origine) qui entraîneront l'usure accélérée et l'oxydation des surfaces.
- **Fatigue par fretting** : les efforts causés sur la surface en raison du phénomène d'usure de contact peuvent induire l'apparition de fissures qui, du fait de la répétition cyclique des mouvements du système, vont se propager dans différentes directions dans le matériau, entraînant ainsi l'apparition de micro-écailles à la surface des composants.



15

Figure 15 : corrosion par fretting sur un moyeu d'accouplement

## Nos solutions

- Élimination des vibrations et des mouvements relatifs à la microéchelle
- Emploi de traitements superficiels introduisant des contraintes de compression sur la surface
- Sélection de traitements superficiels abaisant le frottement
- Sélection de traitements superficiels adéquats pour éviter l'oxydation des fragments/débris
- Topographie conçue pour le piégeage ou l'évacuation des fragments/débris

# USURE PAR SURCONTRAINTE

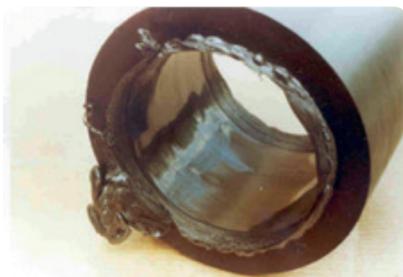
L'usure par surcontrainte se produit lorsque les charges appliquées à la surface dépassent la capacité de résistance du matériau. Cela entraîne des défaillances qui, en règle générale, sont facilement identifiables. Souvent, ce type d'usure entraîne des défaillances catastrophiques diminuant considérablement l'efficacité du système, ou en interrompant complètement le fonctionnement.

Ce type d'usure peut survenir de manière subite, influencé par l'altération d'une quelconque variable du système (par exemple, l'interruption des systèmes de lubrification ou de réfrigération), ou peut être la conséquence d'un effet cumulatif sur le long terme du fonctionnement des composants.

Il existe essentiellement deux types d'usure par surcontrainte, présentés à la page suivante :

- Déformation plastique et fluage : cause des modifications géométriques et de dimensions des matériaux (généralement sans perte de masse). Cela se produit généralement lorsqu'une pression moyenne de contact dans le système est élevée ou en présence d'une pression excessivement haute située à un point spécifique du système. Dans les deux cas, un excès de pression dépasse la limite élastique du matériau, et peut résulter d'une augmentation du coefficient de frottement ou de la température du système. Une déformation plastique de la surface du matériau peut donc causer sa fragilisation (écrouissage), réduisant la résistance à la fatigue du composant.
- Fracture et perte de matière : se caractérise par l'apparition de fissures, l'émission de fragments/débris et la détérioration de la surface. Dans ce cas, les tensions appliquées à la surface sont excessives par rapport à la résistance mécanique du matériau.

Les Figures 16 et 17 présentent deux exemples relativement courants de systèmes en défaillance en raison de l'excès de tension.



16



17

Figures 16 et 17 : palier en polymère présentant une déformation plastique par tension excessive (16) et piste de roulement en acier revêtu de chrome dur, avec des fissures et le décapage de la couche de chrome (17)

## Nos solutions

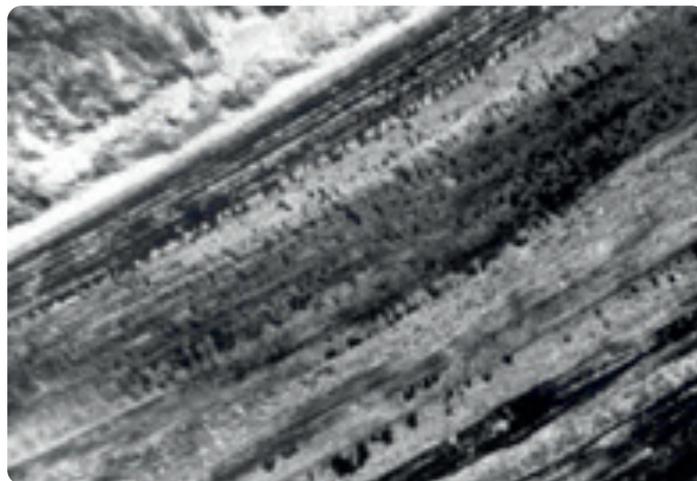
- Sélection de matériaux présentant des propriétés mécaniques adéquates à la sollicitation
- Réduction de la pression de contact
- Conception adéquate en termes de jeu et d'alignement des surfaces
- Traitements favorisant la conformation des surfaces
- Traitements de surface pour réduire le coefficient de frottement
- Amélioration de la lubrification et de la dissipation d'énergie du système

# TRIBOCORROSION

La tribocorrosion est un phénomène qui survient lorsque les surfaces frottantes se trouvent dans un environnement favorisant une corrosion ou une oxydation.

Les sollicitations favorisent l'usure de la surface en enlevant de manière continue ou intermittente le film d'oxyde superficiel dont elle est revêtue à l'origine. À partir de ce point, le phénomène est gouverné par la compétition entre la formation d'un nouveau film d'oxyde superficiel et la réexposition du matériau de base suite à l'enlèvement du film par l'usure. Ce phénomène peut avoir des conséquences négatives pour le système, telles que l'enlèvement du matériau de la surface (dégradation de la condition superficielle, production de fragments/débris, accélérant l'usure) ou l'accélération de la dégradation par corrosion (principalement dans le cas où le film enlevé présentait une fonction de passivation).

La Figure 18 présente un exemple typique d'usure par **tribocorrosion**, où une soupape du moteur fait l'objet d'oxydation par l'action des gaz de combustion et, par conséquent, est endommagée par les fragments/débris durs formés à partir des oxydes.



18

Figure 18 : tribocorrosion sur une soupape de moteur

## Nos solutions

- Sélection d'un revêtement ou traitement superficiel résistant à l'environnement chimique
- Utilisation de revêtements tribologiques pour protéger contre l'usure et réduire le frottement
- Amélioration de la lubrification et de la dissipation d'énergie du système
- Sélection adéquate du lubrifiant en cas de contact lubrifié
- Conception adéquate en termes de topographie, rugosité, jeu et alignement des surfaces

# CORROSION

Le phénomène de destruction d'un métal par action chimique ou électrochimique est appelé corrosion.

Elle peut être provoquée par un large éventail de causes. Les principales formes de corrosion peuvent être classées comme suit :

- Corrosion uniforme : se caractérise par une attaque de l'ensemble de la surface du métal. Des exemples de corrosion uniforme sont la rouille suite d'un acier de construction immergé dans de l'eau ou l'oxydation des aciers exposés à de hautes températures.
- Corrosion par piqûres : se manifeste à travers des points très fins et dispersés sur la surface attaquée, se développe principalement en profondeur (vers le noyau du matériau) au lieu de se diffuser latéralement sur la surface. Un exemple type de corrosion par piqûres est celui des aciers inoxydables exposés à l'écume ou l'eau de mer.
- Corrosion intergranulaire : localisée de manière similaire à la corrosion par piqûres, consiste à l'attaque sélective des contours des grains de la structure du métal. Le matériau attaqué prend un aspect opaque, perd sa sonorité de métal et devient fragile.
- Corrosion sous tension : se produit au sein de pièces soumises à des tensions mécaniques et exposées à un milieu corrosif, générant des fissures à propagation lente. Ce type de corrosion intervient plus fréquemment dans les aciers inoxydables, ainsi que dans le laiton et les alliages légers.
- Corrosion par aération différentielle : survient lorsqu'une zone du métal est exposée à différentes concentrations d'oxygène ou de gaz dissous, cela provoque une différence de potentiel entre les parties aérées différemment, causant une corrosion du métal. Ce type de corrosion est communément observée dans les structures métalliques présentant des parties immergées ou des zones confinées.

Voici les facteurs interférant avec les phénomènes de corrosion et leur classification en quatre groupes :

- Facteurs chimiques : concentration du réactif, teneur en oxygène, pH, température, etc.
- Facteurs électrochimiques : différences de potentiel entre les matériaux et l'environnement, la combinaison de matériaux, etc.
- Facteurs métallurgiques ou structurels : composition du métal ou de l'alliage, processus d'élaboration, impuretés, traitements thermiques, écrouissage, etc.
- Facteurs mécaniques : tensions résiduelles, sollicitations mécaniques, conditions de la surface, etc.

## Nos solutions

- Sélection des bons matériaux (pour les hautes températures, environnements chimiquement agressifs, etc.)
- Sélection adéquate des traitements de surface
- Utilisation de revêtements aux propriétés anticorrosives
- Sélection adéquate du processus de traitement thermique à réaliser



## Contact

ZI Sud,  
Avenue Benoit Fourneyron  
42160 Andrézieux-Bouthéon  
Tel : +33 4 77 55 52 22  
Fax : +33 4 77 55 52 00  
sales.france@hef.fr  
Site Web : [www.HEF.fr](http://www.HEF.fr)

