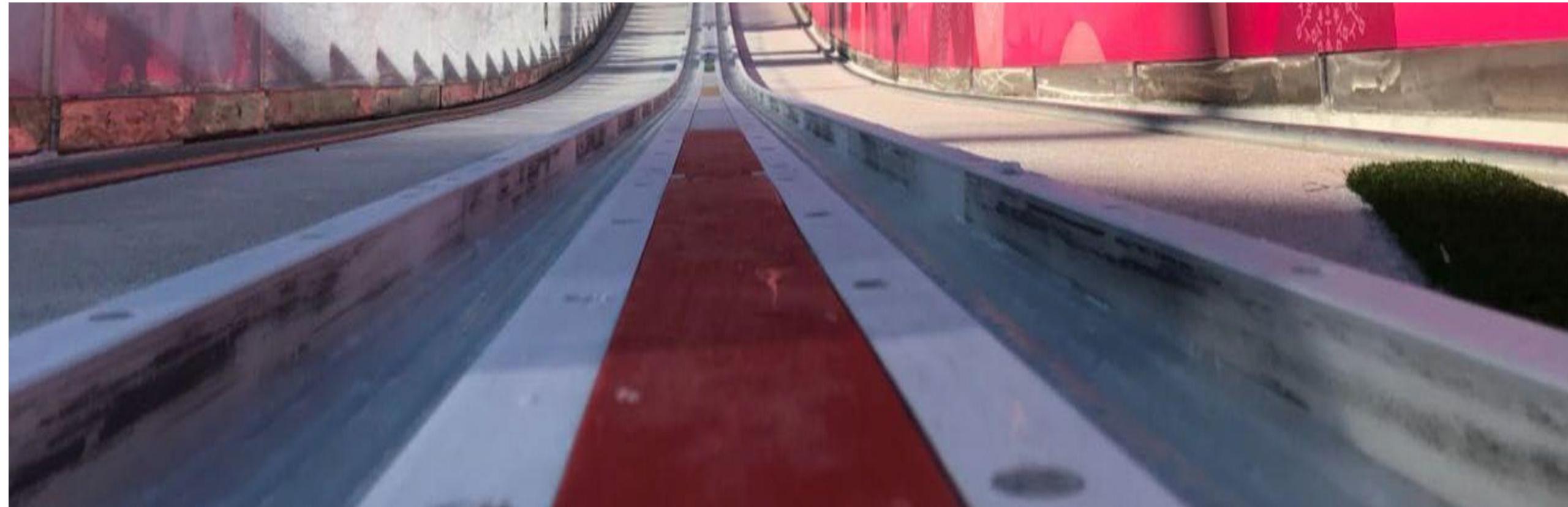
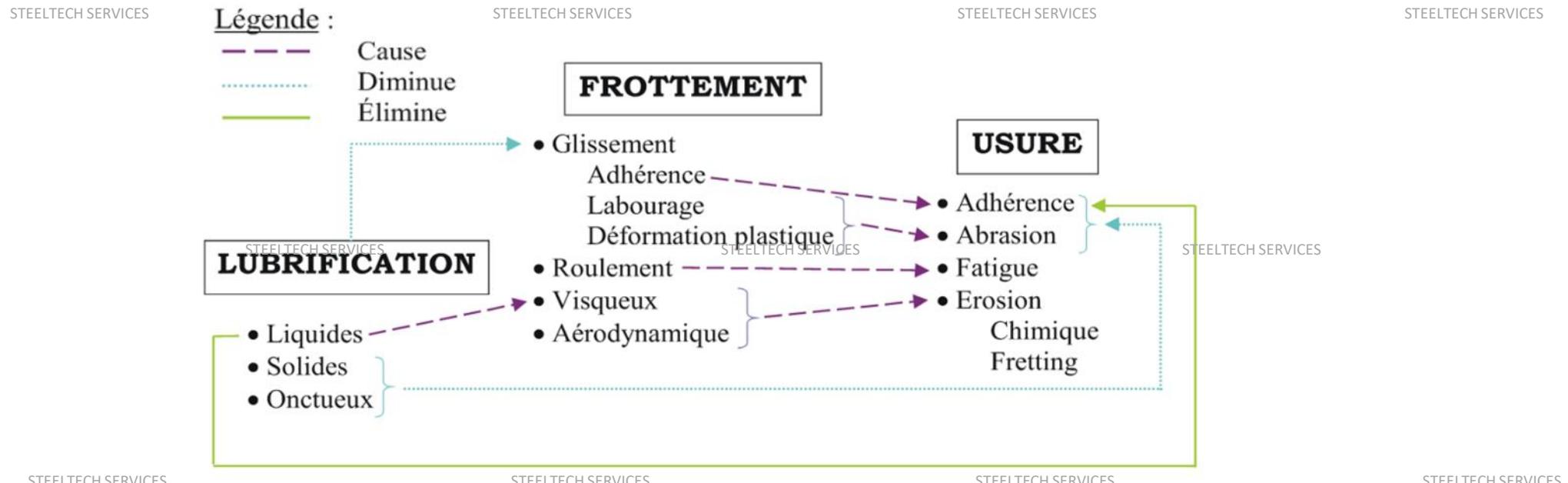


# Tribologie des céramiques



# La tribologie

La tribologie est la branche de la mécanique qui étudie le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces en contact entre deux solides. La tribologie s'intéresse principalement aux corps solides ou à l'intersection entre un solide et un lubrifiant liquide (huile), onctueux (graisse) ou granulaire (poudre). Frottement et usure se produisent à la surface entre deux solides en contact. La lubrification permet de séparer les surfaces en contact par un film lubrifiant, et donc de limiter l'usure.



## Schéma décrivant les relations entre le frottement, l'usure et la lubrification

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

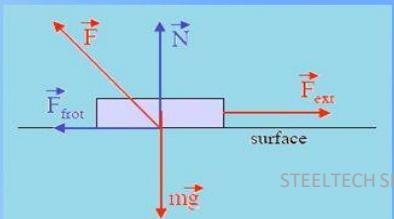
Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

# La force de frottement

## Force de frottement sec

### • Force $F$ exercée par une surface sur un solide

- composante normale à la surface  $N$  = réaction
- composante tangentielle à la surface  $F_{\text{frot}}$  = force de frottement sec



### • Il faut distinguer deux cas:

Lois de Coulomb

$$\begin{aligned} \text{si } v = 0: \quad F_{\text{frot}} &\leq F_{\text{frot}}^{\max} = \mu_s N \\ \text{si } v \neq 0: \quad F_{\text{frot}} &= -\mu_c N \frac{v}{|v|} \end{aligned}$$

$\mu_s$  = coefficient de frottement statique

$\mu_c$  = coefficient de frottement cinétique (ou dynamique).

Dans les machines, la génération de chaleur et les déformations plastiques sont responsables des pertes de rendement, tandis que l'arrachement progressif des particules à la surface des pièces est la cause de l'usure

La force de frottement est une force de réaction, qui s'oppose toujours au mouvement relatif entre deux corps en contact. Cette force augmente de zéro à un maximum avant le début du mouvement macroscopique : **c'est la force de frottement statique.**

Après le début du mouvement, elle diminue jusqu'à une nouvelle valeur qui demeure constante tant que le mouvement persiste.

**C'est la force de frottement dynamique.**

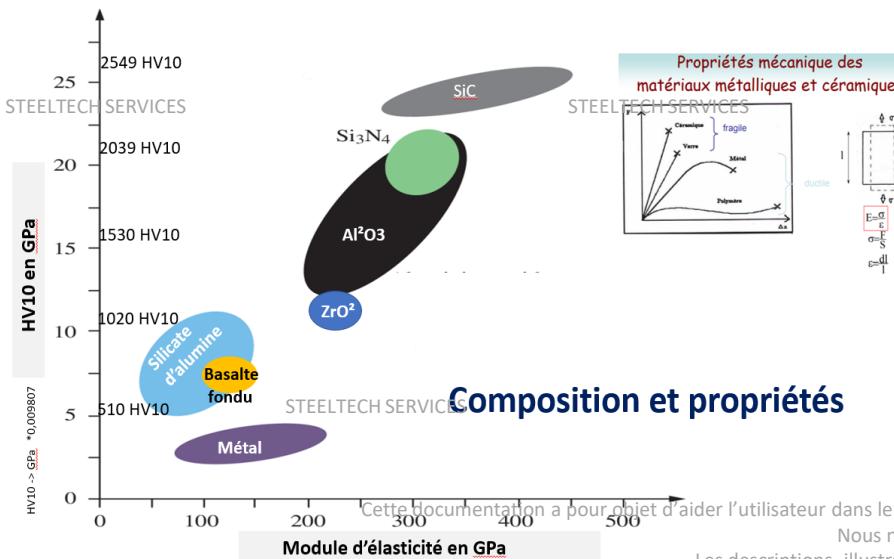
Le travail effectué par les forces de frottement a un **triple effet** :

- **de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur**
- **des déformations plastiques sont générées**
- **des particules solides sont arrachées sur les surfaces de contact**

# Tribologie des céramiques

STEELTECH SERVICES STEELTECH SERVICES STEELTECH SERVICES STEELTECH SERVICES  
Les céramiques sont souvent utilisées pour leur faible usure lors du frottement, puisqu'il est communément observé que leur dureté élevée entraîne une résistance à l'usure plus importante que celle des matériaux métalliques. Cependant, dans certaines conditions plus sévères, des phénomènes d'usure peuvent apparaître, qui sont alors aggravés par leur fragilité.

En tribologie, l'état de surface des corps en contact possède une importance critique. En effet, la nature et les défauts des surfaces génèrent **adhérence, abrasion, fatigue et érosion**.



## Composition et propriétés

d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine. Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques et les prix de nos produits et services. Bonne résistance à l'abrasion jusqu'à 1200°C Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies autrement et ne peuvent engager la responsabilité de notre part avec vérification de t°

## Céramiques



## Le basalte fondu



## L'oxyde d'alumine



## L'oxyde de zirconium



STEELTECH SER

## Usures



STEELETECH SERVICES  
Excellente résistance à l'abrasion-corrosion jusqu'à 350°C



Excellente résistance à l'abrasion extrême jusqu'à 1550°C



Bonne résistance à l'abrasion-impact-températures jusqu'à 1000°C

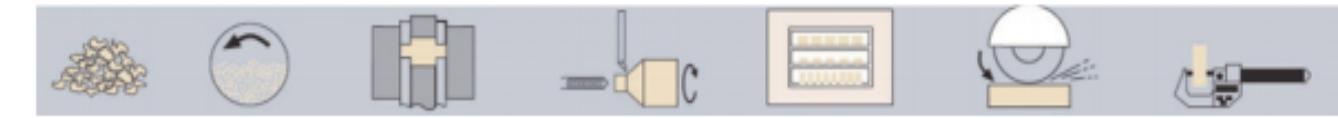


STEELTECH SERVICES  
Excellente résistance à l'abrasion-températures  
jusqu'à 1700°C avec variation de t° extrêmes

Il est adapté aux applications auxquelles il le destine.  
**Bonne résistance à l'abrasion jusqu'à 1200°C**  
notamment  
**avec variation de t°**

# Critères de rupture

Les propriétés des céramiques dépendent, d'une manière générale, de leur technique de mise en œuvre.



STEELTECH SERVICES

Poudre

Préparation  
des masses

STEELTECH SERVICES

Formage

Travail du  
produit vert

STEELTECH SERVICES

Frittage

Finition

STEELTECH SERVICES

Assurance  
qualité

STEELTECH SERVICES

Matière première

Moudre

Pressage à sec

Fraisage

Déliaison

Meulage

Contrôle

Mélanger

Extrusion

Tourner

Cuisson

Honage

Optique

Filtrer

Pulvériser

Forer

900-1750°C

Polissage

Dimensionnel

Granuler

Presse isostatique

Forer

Bordage

Métalliser

Fissuration

Plastifier

Scier

Glacer

Glacer

Force

STEELTECH SERVICES

Séchage par pulvérisation

STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

Le carbure de silicium, par exemple, a différentes valeurs de dureté selon que l'on presse à chaud, ou que l'on le forme par une autre technique. **Le mode d'obtention de la céramique conditionne également la microstructure et la pureté du matériau, qui a une influence sur son comportement à la rupture.**

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société.

# STEELTECH SERVICES

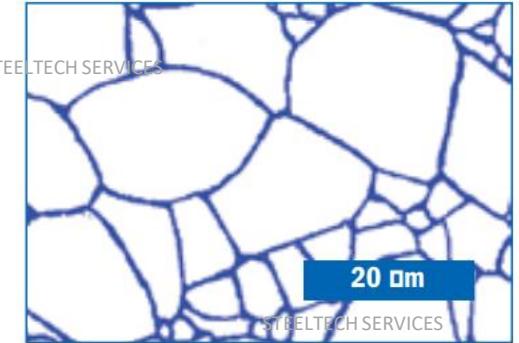
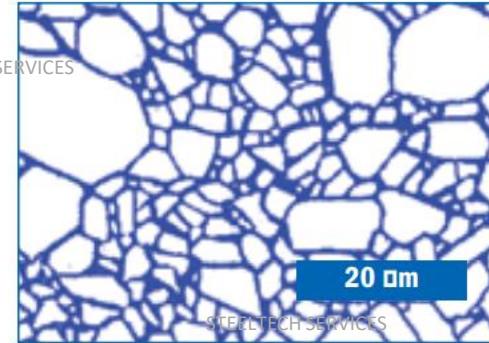
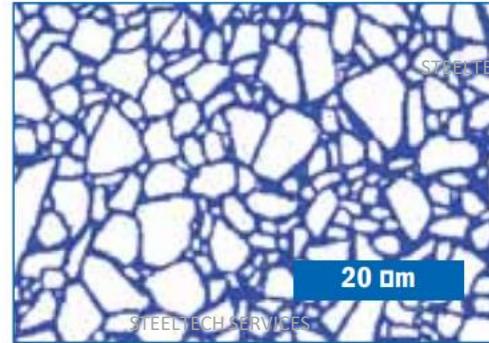
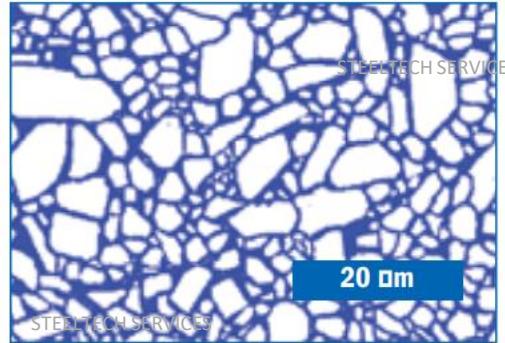
# STEELTECH SERVICES

# STEELTECH SERVICES

# STEELTECH SERVICES

# Microstructure et pureté

STEELTECH SERVICES



## Exemple pour l'alumine – Al<sup>2</sup>O<sub>3</sub>.

<b>Content Al<sup>2</sup>O<sub>3</sub></b>	<b>&gt;92%</b>	<b>&gt;96%</b>	<b>&gt;98%</b>	<b>&gt;99,7%</b>
Density	>3,64 g/cm <sup>3</sup>	>3,75 g/cm <sup>3</sup>	>3,8 g/cm <sup>3</sup>	>3,95 g/cm <sup>3</sup>
Open Porosity	Vol 0%	Vol 0%	Vol 0%	Vol 0%
Bending Strength	>320Mpa	>340Mpa	>360Mpa	>380Mpa
Fracture Toughness	3-4MPam <sup>½</sup>	3-4MPam <sup>½</sup>	3-4MPam <sup>½</sup>	3-4MPam <sup>½</sup>
Hardness HV1	>12Gpa	>13,5Gpa	>14,5Gpa	>16Gpa
Max. Working Temp.	800°C	1000°C	1200°C	1600°C
Roughness as fired Ra	1,9μm	1,1μm	1,1μm	0,5μm
Volume Wear	0,8cm <sup>3</sup>	1,0cm <sup>3</sup>	1,1cm <sup>3</sup>	1,44cm <sup>3</sup>

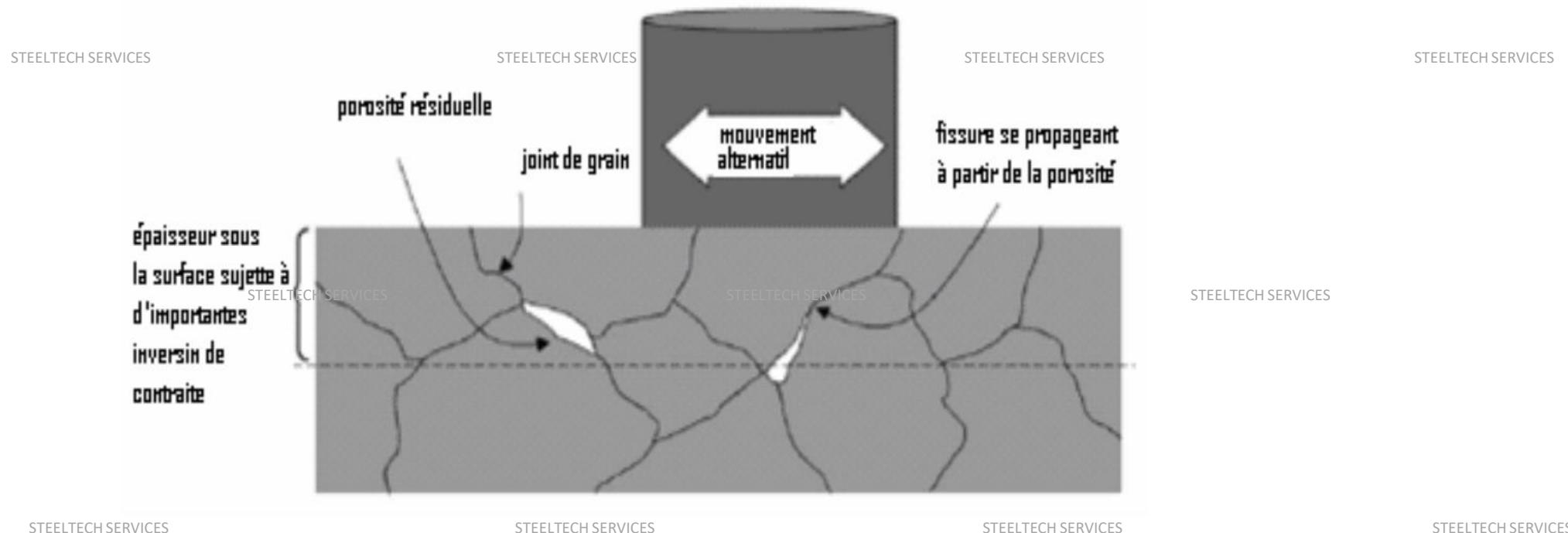
Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

# Microstructure et pureté

La fracturation d'un matériau a toujours un défaut préexistant comme origine. Une raison de plus à bien choisir son matériau en fonction de ses propriétés ! L'application d'une contrainte au matériau induit l'apparition d'une contrainte au niveau de ce défaut, qui peut conduire à la propagation d'une fissure, voire rupture de la pièce.



## Influence de la porosité et de la taille des grains sur l'endommagement d'une céramique

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

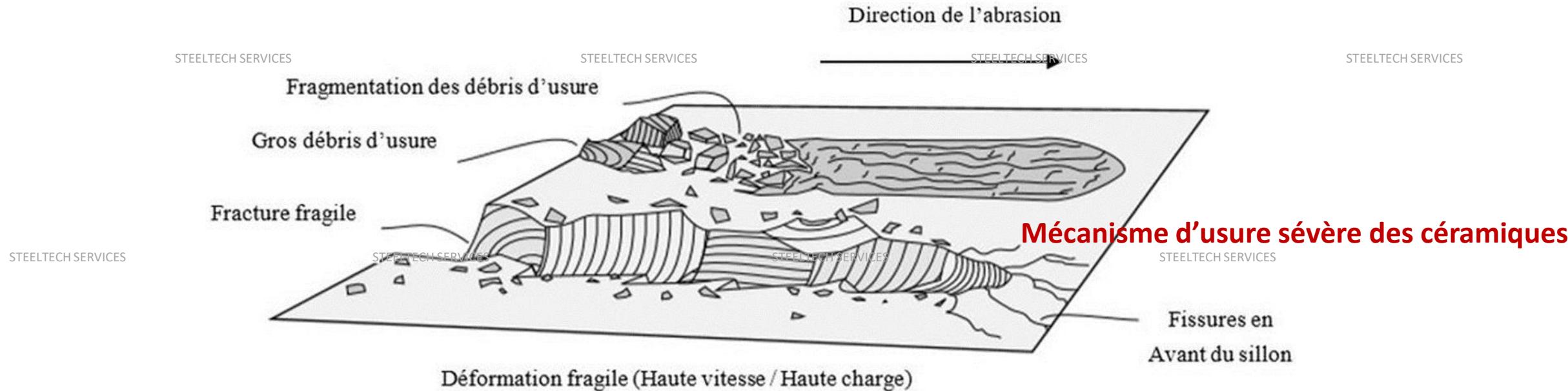
Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

# Frottement sec céramique-céramique

Le frottement non lubrifié des céramiques est en général fortement influencé par les conditions de **glissement, et la présence ou non d'humidité**. Les mécanismes de déformation mis en jeu lors du frottement sec peuvent être **soit ductiles, soit fragiles**, essentiellement selon les conditions de **vitesse et de chargement**.

La déformation ductile est observée dans des conditions modérées de frottement (vitesse peu élevée, etc.)

Le contact rugueux entraîne la déformation plastique et le déplacement de matière, plutôt qu'un enlèvement, ainsi que de relativement faibles valeurs de coefficient de frottement.



La transition vers de l'usure sévère intervient si l'on augmente beaucoup la vitesse et/ou la charge. Lors de la déformation fragile, le passage d'une aspérité dans le contact entraîne une propagation importante de fissures aux joints de grains. Des grains entiers de la céramique peuvent être cassés, puis fragmentés dans le contact, créant un lit de débris. Ce mode d'usure s'accompagne de **fortes valeurs de coefficient de frottement**.

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Notre offre n'est pas la moins chère. Nous prélevons les caractéristiques de nos produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société.

# Frottement sec céramique-céramique

## Influence de la température

STEELTECH SERVICES

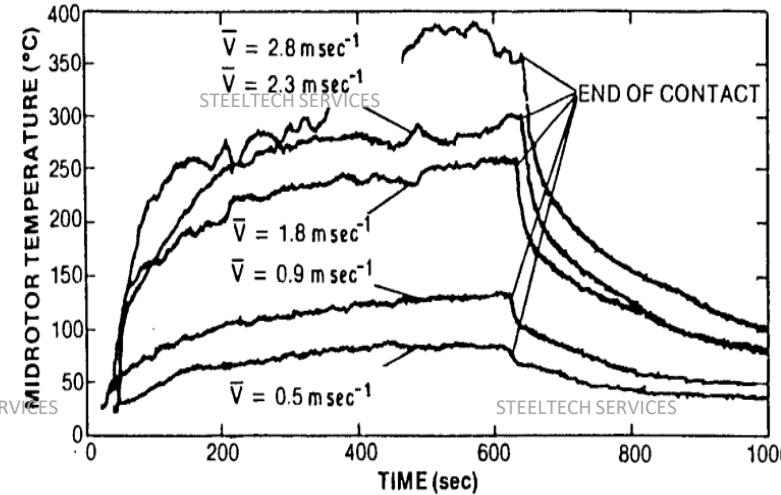
STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

La montée en température due au frottement peut affecter la surface des céramiques non conductrices de chaleur, en provoquant de la fissuration lors du refroidissement après le passage de l'antagoniste.

STEELTECH SERVICES



L'usure et les valeurs du coefficient de frottement des céramiques sont souvent plus élevées aux hautes températures. Les céramiques autres que les oxydes (comme le nitride ou le carbure de silicium) sont sujettes à de l'usure par oxydation puis par abrasion de la surface d'oxyde en présence d'air ou d'oxygène. Cependant, dans certaines plages de températures et sous certaines atmosphères, une amélioration des propriétés tribologiques de céramiques comme l'alumine ( $Al_2O_3$ ), ou de certaines céramiques à base de silicium, a été observée.

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

# Frottement sec céramique-céramique

## Influence de l'humidité

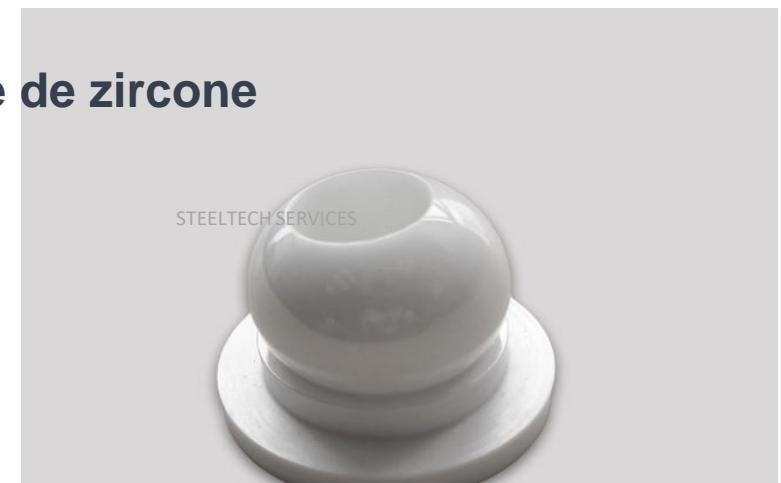
STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

L'humidité peut avoir un rôle aussi bien spécifique qu'aggravant sur le comportement en usure des céramiques. L'effet le plus bénéfique est la formation d'une fine couche hydratée sur la surface de la céramique (alumine ou céramiques à base de silicium) qui se comporte comme un lubrifiant. Cependant, si cette couche hydratée devient trop épaisse, une d'usure corrosive apparaît, avec enlèvement de cette couche lors du passage de l'antagoniste.



**La bille et des sièges de soupape en céramique de zircone**

La bille de soupape en céramique et le siège de soupape sont précisément adaptés pour assurer de bonnes performances d'étanchéité et obtenir une fuite nulle.

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

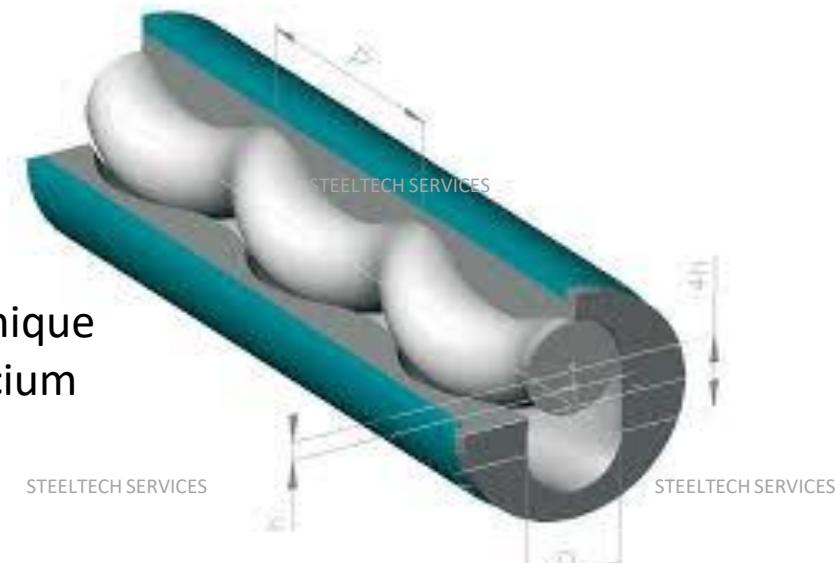
# Frottement sec métal-céramique

Le coefficient de frottement dans un contact sec métal-céramique dépend du type de métal et des conditions de charge et/ou de vitesse qui influencent directement la température de contact et le niveau d'oxydation de ce métal.

D'après la littérature, la gamme de coefficients de frottement des céramiques contre les aciers se situe entre 0,2 et 0,8.

Contre les alliages chrome-cobalt entre 0,3 et 0,4.

Rotor en céramique  
carbure de silicium



Stator en acier

Billes en  $\text{Al}_2\text{O}_3$



Cage et bague extérieure  
en acier

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

# Frottement sec métal-céramique

Il s'avère que plus la céramique est dure, plus le métal s'use.

Dans certains cas cependant, comme par exemple lors de la coupe de pièce en acier par un outil en céramique à base de silicium, des réactions chimiques à l'interface entraînent l'usure de la céramique.



Le métal se dépose sur la céramique et la forte température due au frottement entraîne une oxydation rapide de ce transfert qui devient donc une couche de métal recouvert d'un film d'oxyde. Cette couche peut ensuite être arrachée, et emporter avec elle des morceaux de la céramique préalablement endommagée par le gradient de température. Le comportement dépend aussi de la rhéologie du 3<sup>ème</sup> corps qui est lié plus particulièrement à l'aptitude des débris à s'agglomérer entre eux, à former des couches interfaciales continues suffisamment résistantes pour créer une barrière efficace entre les surfaces. Un système qui vibre beaucoup piégera moins, ou plus précisément éliminera beaucoup plus de débris qu'un système bien équilibré qui vibre peu.

Pour diminuer l'usure, il faut favoriser le développement de ce 3<sup>ème</sup> corps et éviter son élimination.

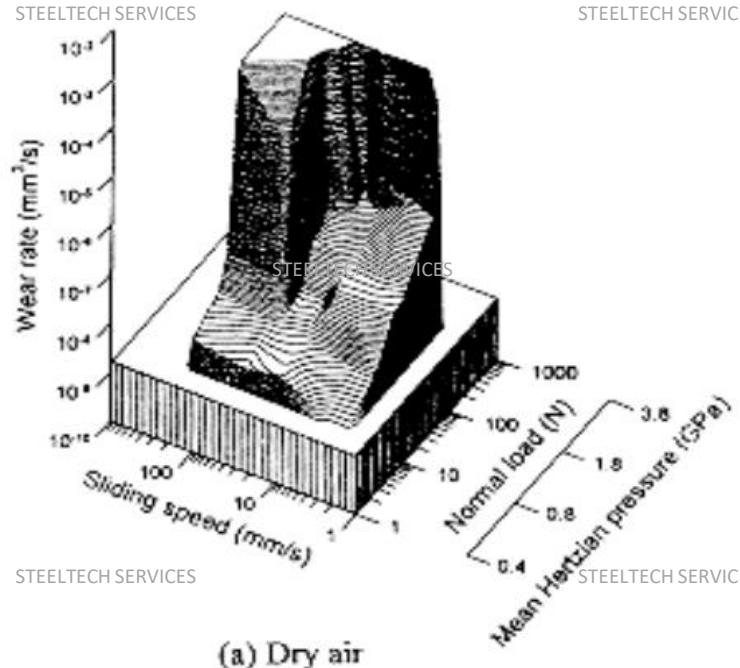
Un bon tribosystème doit être capable de former des débris et de les maintenir dans le contact afin d'assurer la séparation des premiers corps et donc de créer une portance. En d'autres termes "un bon tribosystème est prêt à sacrifier sa surface pour sauvegarder son volume".

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous ne sommes pas responsables des malentendus ou erreurs dans les descriptions techniques et commerciales.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société.

# Paramètres influençant l'usure des céramiques



(a) Dry air

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'usure des céramiques :

- Mécaniques
- Cinétiques
- Géométriques, etc..

**Influence de la charge et de la vitesse :**

Pour ces deux paramètres on peut dire qu'aux faibles charges, le transfert est limité à la porosité. Et aux charges moyennes, le transfert est plus important, et le taux est faible. Mais pour les charges élevées, le transfert est limité du contact. Ceci est également valable pour l'influence de la vitesse.

**Influence de la taille des grains :**

C'est un facteur très important, parce qu'il peut affecter plusieurs paramètres mécaniques par leurs tailles et leurs formes, et surtout la rigidité et la résistance à la rupture du matériaux. C'est très important lors du choix d'un matériau céramique.

# Conclusions

Georges WENDERS

Expert International en Anti-Usure Minérale

CEO – STEELTECH SERVICES SPRL



Le comportement tribologique des céramiques est très satisfaisant pour un certain nombre d'applications.

Leur dureté leur assure une bonne tenue à l'usure lors d'utilisations sous des conditions peu sévères.

Cependant, leur caractère fragile entraîne une aggravation de l'usure, avec transition vers une usure importante, lorsque les conditions deviennent sévères.

En général le frottement d'une céramique contre un métal se traduit par l'usure de ce métal, notamment du fait de la différence de dureté entre eux. L'humidité et la température ont une influence bénéfique ou non selon les couples de matériaux utilisés.

Pour diminuer l'usure des céramiques, il faut avoir un troisième corps entre les surfaces de frottement qui peut être des aspérités des deux surfaces, ou un film lubrifiant comme l'eau, l'huile. Les aspérités des deux surfaces forment une usure autogène.